

12

## DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

22 Date de dépôt : 28 août 1987.

30 Priorité :

43 Date de la mise à disposition du public de la demande : BOPI « Brevets » n° 9 du 3 mars 1989.

60 Références à d'autres documents nationaux apparentés :

71 Demandeur(s) : ETAT FRANÇAIS représenté par le Ministre Délégué des Postes et Télécommunications (Centre National d'Etudes des Télécommunications). — FR et Jan MULAWKA. — PL.

72 Inventeur(s) : Jan Mulawka ; Konczykowska Agnieszka ; Michel Bon.

73 Titulaire(s) :

74 Mandataire(s) : Brevatome.

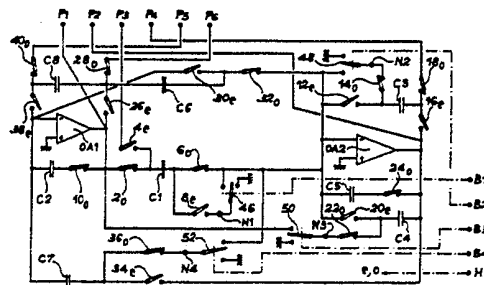
54 Cellule biquadratique à capacités commutées sans boucle continue de contre-réaction et à faible sensibilité par rapport au gain des amplificateurs opérationnels et au ratio des capacités.

57 La cellule biquadratique comprend deux amplificateurs opérationnels OA1 et OA2, huit condensateurs C1-C8, et des interrupteurs comprenant des interrupteurs d'indice « 0 » et des interrupteurs d'indice « e » commandés par un signal d'horloge H.

La cellule biquadratique comporte six connexions P1-P6 et peut être utilisée comme filtre passe-bas, passe-bande ou passe-haut selon les connexions choisies pour l'entrée et la sortie du signal à filtrer.

Des commutateurs 46-52 permettent de sélectionner une configuration parmi plusieurs, pour chaque fonction de filtrage; les différentes configuration se distinguent par leurs sensibilités par rapport au gain des amplificateurs opérationnels et par rapport au ratio de capacité.

Application au filtrage des signaux de la gamme vidéo (quelques mégahertz).



CELLULE BIQUADRATIQUE A CAPACITES COMMUTEES SANS BOUCLE  
CONTINUE DE CONTRE-REACTION ET A FAIBLE SENSIBILITE PAR  
RAPPORT AU GAIN DES AMPLIFICATEURS OPERATIONNELS ET AU RATIO  
DES CAPACITES

5

## DESCRIPTION

La présente invention a pour objet une cellule biquadratique à capacités commutées sans boucle continue de contre-réaction.

10

L'invention concerne le traitement des signaux de la gamme vidéo, c'est-à-dire de signaux ayant une fréquence de quelques mégahertz.

15

Les cellules biquadratiques sont des filtres du second ordre. Pour la réalisation d'un filtre d'ordre  $n$  supérieur à 2, il suffit de mettre en cascade  $n/2$  cellules biquadratiques, si  $n$  est pair ou  $(n-1)/2$  cellules biquadratiques plus un filtre du premier ordre si  $n$  est impair.

20

Les cellules biquadratiques à capacités commutés sont apparues il y a une dizaine d'années dans la littérature scientifique et on donné lieu très rapidement à des applications industrielles en technologie MOS dans le domaine du traitement du signal de basse fréquence, essentiellement le spectre audio.

25

Plus récemment, l'accroissement des performances des amplificateurs opérationnels a permis l'utilisation des cellules biquadratiques à capacités commutées dans le domaine du traitement de signal vidéo (quelques mégahertz).

30

Les cellules biquadratiques à capacités commutées comprennent des amplificateurs opérationnels, des condensateurs et des interrupteurs. Dans un tel circuit, une résistance électrique est simulée par un condensateur et deux interrupteurs. La valeur de la résistance est de  $1/fC$ , ou  $f$  est la fréquence de commutation des interrupteurs et  $C$  la capacité du condensateur. La fréquence du signal d'horloge de commutation des interrupteurs doit être environ 20 fois plus élevée que la fréquence du signal

à traiter. Dans le domaine des cellules biquadratiques à capacités commutées de haute fréquence, les recherches s'orientent vers des circuits ayant une faible sensibilité par rapport au gain des amplificateurs opérationnels, car pour les applications dans le domaine haute fréquence, seuls des amplificateurs opérationnels simples et à gain relativement faible peuvent être utilisés.

Dans l'article A1, cité en annexe, il est proposé de réduire l'effet de gain fini en introduisant un tampon et trois interrupteurs dans une cellule biquadratique de type Fleischer-Laker, telle que décrite dans l'article A2.

Une telle cellule biquadratique n'est pas satisfaisante car elle comporte des éléments additionnels qui la rendent plus complexe.

Par ailleurs, la capacité totale des condensateurs est élevée, ce qui se traduit par une cellule biquadratique de taille importante sous forme intégrée.

On connaît également des intégrateurs à capacités commutées sans boucle continue de contre-réaction, qui permettent de minimiser l'influence de gain fini des amplificateurs. De tels intégrateurs sont décrits dans les articles A3, A4 et A5. L'utilisation de ces intégrateurs pour la réalisation d'un filtre nécessite l'introduction d'un amplificateur sommateur pour séparer les étages successifs du filtre, ou l'utilisation d'une horloge à trois phases.

Enfin, une cellule biquadratique sans boucle continue de contre-réaction est décrite dans l'article A6. Cette cellule biquadratique comprend deux amplificateurs opérationnels et de 9 à 15 condensateurs. La sensibilité de cette cellule biquadratique aux éléments passifs, c'est-à-dire la sensibilité par rapport à une variation des valeurs relatives des condensateurs, n'est pas contrôlée et peut être élevée. De même, la sensibilité par rapport au gain des amplificateurs opérationnels est assez forte.

L'invention a pour but de remédier aux inconvénients des cellules biquadratiques à capacités commutées connues. Elle a

pour objet une cellule biquadratique sans boucle continue de contre-réaction ayant une faible sensibilité par rapport au gain des amplificateurs opérationnels, une faible sensibilité par rapport au ratio de capacité et une faible capacité totale.

5 L'invention a également pour objet une cellule biquadratique comprenant une pluralité de connexions d'entrée-sortie et permettant d'obtenir différentes fonctions de filtrage suivant le choix de la connexion d'entrée et de la connexion de sortie du signal à traiter.

10 L'invention a enfin pour objet une cellule biquadratique munie de commutateurs permettant de sélectionner, pour chaque fonction de filtrage, une configuration de circuit parmi une pluralité de configurations ayant des sensibilités différentes par rapport au gain des amplificateurs opérationnels et par  
15 rapport au ratio de capacité.

De manière précise, l'invention a pour objet une cellule biquadratique à capacités commutées comprenant six connexions d'entrée-sortie P1, P2, ..., P6, et une entrée d'horloge H pour recevoir un signal d'horloge pour commander la fermeture et  
20 l'ouverture d'un ensemble d'interrupteurs, lesdits interrupteurs comprenant une première famille d'interrupteurs qui sont commandés dans l'état ouvert pendant une première demi-période de chaque période du signal d'horloge et qui sont commandés dans l'état fermé pendant une seconde demi-période de chaque période  
25 du signal d'horloge, et une seconde famille d'interrupteurs qui sont commandés dans l'état fermé pendant ladite première demi-période de chaque période du signal d'horloge et dans l'état fermé pendant ladite seconde demi-période de chaque période du signal d'horloge, ladite cellule biquadratique étant caractérisée  
30 en ce qu'il comprend :

- un premier amplificateur opérationnel OA1 muni d'une entrée non inverseuse reliée à la terre, d'une entrée inverseuse E1, et d'une sortie inverseuse S1 reliée à la première connexion P1 du filtre,
- 35 - un second amplificateur opérationnel OA2 muni d'une

entrée non-inverseuse reliée à la terre, d'une entrée inverseuse E2, et d'une sortie S2 reliée à la deuxième connexion P2 du filtre,

5 - un premier condensateur C1 et des interrupteurs pour connecter ledit condensateur entre la sortie S1 du premier amplificateur opérationnel et l'entrée E2 du second amplificateur opérationnel pendant lesdites premières demi-périodes du signal d'horloge, et pour connecter ledit condensateur à la connexion P3 et à un noeud N1 pendant lesdites secondes demi-périodes du signal d'horloge,

10 - un deuxième condensateur C2 et des interrupteurs pour connecter ledit condensateur entre l'entrée E1 et la sortie S1 du premier amplificateur opérationnel pendant lesdites premières demi-périodes du signal d'horloge, et pour connecter ledit condensateur uniquement à l'entrée E1 du premier amplificateur opérationnel pendant lesdites secondes demi-périodes du signal d'horloge,

15 - un troisième condensateur C3 et des interrupteurs pour connecter ledit condensateur entre un noeud N2 et la connexion P4 pendant lesdites premières demi-périodes du signal d'horloge, et pour connecter ledit condensateur entre l'entrée E2 et la sortie S2 du second amplificateur opérationnel pendant lesdites secondes demi-périodes du signal d'horloge,

20 - un quatrième condensateur C4 et des interrupteurs pour connecter ledit condensateur entre un noeud N3 et la sortie S2 du second amplificateur opérationnel pendant lesdites premières demi-périodes du signal d'horloge, et pour connecter ledit condensateur entre l'entrée E2 et la sortie S2 du second amplificateur opérationnel pendant lesdites secondes demi-périodes du signal d'horloge,

25 - un cinquième condensateur C5 et des interrupteurs pour connecter ledit condensateur entre l'entrée E2 et la sortie S2 du second amplificateur opérationnel pendant lesdites premières demi-périodes du signal d'horloge, et pour connecter ledit condensateur uniquement à l'entrée E2 du second amplificateur

30

35

opérationnel pendant lesdites secondes demi-périodes du signal d'horloge,

5 - un sixième condensateur C6 et des interrupteurs pour connecter ledit condensateur entre la connexion P6 et l'entrée E2 du second amplificateur opérationnel pendant lesdites premières demi-périodes du signal d'horloge, et pour connecter ledit condensateur entre la sortie S1 et l'entrée E1 du premier amplificateur opérationnel pendant lesdites secondes demi-périodes du signal d'horloge,

10 - un septième condensateur C7 et des interrupteurs pour connecter ledit condensateur entre l'entrée E1 du premier amplificateur opérationnel et un noeud N4 pendant lesdites premières demi-périodes du signal d'horloge, et pour connecter ledit condensateur entre l'entrée E1 du premier amplificateur  
15 opérationnel et la sortie S2 du second amplificateur opérationnel pendant lesdites secondes demi-périodes du signal d'horloge,

- un huitième condensateur C8 et des interrupteurs pour connecter ledit condensateur entre les connexions P5 et P6 pendant lesdites premières demi-périodes du signal d'horloge, et  
20 pour connecter ledit condensateur entre l'entrée E1 et la sortie S1 du premier amplificateur opérationnel pendant lesdites secondes demi-périodes du signal d'horloge, et

- quatre commutateurs à deux positions commandés par des signaux appliqués sur des bornes B1, B2, B3, B4 de la cellule  
25 biquadratique, le premier commutateur étant disposé pour relier le noeud N1 à l'entrée E2 du second amplificateur opérationnel ou à la terre, le deuxième commutateur étant disposé pour relier le noeud N2 à l'entrée E2 du second amplificateur opérationnel ou à la terre, le troisième commutateur étant disposé pour relier le  
30 noeud N3 à la sortie S1 du premier amplificateur opérationnel ou à la terre, et le quatrième commutateur étant disposé pour relier le noeud N4 à l'entrée E2 du second amplificateur opérationnel ou à la terre.

35 Cette cellule biquadratique permet de réaliser des filtres passe-bas, passe-bande ou passe-haut, selon les

connexions choisies pour appliquer le signal à filtrer et pour recueillir le signal filtré.

Pour une fonction de filtrage déterminée, la sensibilité du filtre par rapport aux variations de gain des amplificateurs opérationnels et la sensibilité par rapport au ratio de capacité peut être choisie en commandant les commutateurs doubles.

Les caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront mieux de la description qui va suivre, donnée à titre illustratif mais non limitatif, en référence aux dessins annexés, sur lesquels :

- la figure 1 représente schématiquement un mode de réalisation de la cellule biquadratique de l'invention,

- la figure 2 représente schématiquement une boucle de contre-réaction utilisée classiquement pour stabiliser un amplificateur opérationnel d'une cellule à capacités commutées sans boucle continue de contre-réaction,

- la figure 3 représente schématiquement une cellule biquadratique à faible sensibilité par rapport au gain des amplificateurs opérationnels, cette cellule correspondant à une première configuration de la cellule biquadratique de la figure 1,

- les figures 4a à 4c illustrent différents filtres obtenus selon les signaux appliqués sur les connexions d'entrée-sortie P1-P6 de la cellule biquadratique de la figure 3,

- la figure 5 représente schématiquement une cellule biquadratique ayant une faible sensibilité par rapport au ratio de capacité, cette cellule correspondant à une seconde configuration de la cellule biquadratique de la figure 1,

- les figures 6a à 6e illustrent différents filtres obtenus selon les signaux appliqués sur les connexions d'entrée-sortie P1-P6 de la cellule biquadratique de la figure 5,

- la figure 7 représente schématiquement une cellule constituant un compromis entre les cellules représentées sur les figures 3 et 5, cette cellule correspondant à une troisième configuration de la cellule représentée sur la figure 1,

- les figures 8a à 8d représentent différents filtres obtenus selon les signaux appliqués sur les connexions d'entrée-sortie P1-P6 de la cellule biquadratique de la figure 7, et

5 - les figures 9, 10, 11 sont des graphiques représentant respectivement le facteur de surtension  $Q$ , l'erreur relative sur le facteur de surtension  $\Delta Q/Q$  et l'erreur relative  $\Delta \omega / \omega$  - où  $\omega$  est la pulsation correspondant à la fréquence centrale du signal à traiter - en fonction du gain  $A$  des amplificateurs opérationnels pour des cellules biquadratiques connues et des cellules biquadratiques selon l'invention.

10 La cellule biquadratique de l'invention est destinée notamment au traitement des signaux situés dans la gamme vidéo, c'est-à-dire ayant une fréquence centrale de l'ordre de quelques mégahertz. Une telle cellule biquadratique est réalisée avantagement en technologie MESFET (DFET) sur GaAs, et le signal d'horloge de commande des interrupteurs a une fréquence de l'ordre de quelques centaines de mégahertz.

15 Un mode de réalisation de la cellule biquadratique de l'invention est représenté sur la figure 1. Cette cellule biquadratique comprend un premier amplificateur opérationnel OA1, un second amplificateur opérationnel OA2, huit condensateurs C1-C8, et des interrupteurs commandés par un signal d'horloge H. Ces interrupteurs comprennent une première famille d'interrupteurs, notés "e", qui sont ouverts pendant la première demi-période de chaque période du signal d'horloge et qui sont fermés pendant la seconde demi-période de chaque période du signal d'horloge, et une seconde famille d'interrupteurs, notés "o", qui sont fermés pendant la première demi-période de chaque période du signal d'horloge et qui sont ouverts pendant la seconde demi-période de chaque période du signal d'horloge.

20 25 30 35 La cellule biquadratique de l'invention est munie de six connexions d'entrée-sortie P1, P2, ..., P6 qui permettent de définir différentes fonctions de filtrage selon la connexion choisie pour appliquer le signal à filtrer et la connexion choisie pour recueillir le signal filtré.

Les amplificateurs opérationnels OA1, OA2 comprennent chacun une entrée inverseuse, une entrée non-inverseuse reliée à la terre, et une sortie. La sortie de l'amplificateur OA1 est reliée à la connexion P1 et la sortie de l'amplificateur OA2 est reliée à la connexion P2.

Le condensateur C1 a une extrémité reliée d'une part à la sortie de l'amplificateur opérationnel OA1 par l'intermédiaire d'un interrupteur 2 et d'autre part à la connexion P3 par l'intermédiaire d'un interrupteur 4, et une autre extrémité reliée d'une part à l'entrée inverseuse de l'amplificateur opérationnel OA2, par l'intermédiaire d'un interrupteur 6 et d'autre part, à un noeud N1 par l'intermédiaire d'un interrupteur 8. Le condensateur C2 a une extrémité reliée à l'entrée inverseuse de l'amplificateur opérationnel OA1 et une autre extrémité reliée, par un interrupteur 10, à la sortie de l'amplificateur opérationnel OA1. Le condensateur C3 a une extrémité reliée d'une part à l'entrée inverseuse de l'amplificateur opérationnel OA2 par un interrupteur 12 et d'autre part à un noeud N2 par un interrupteur 14, et une deuxième extrémité reliée d'une part à la sortie de l'amplificateur opérationnel OA2 par un interrupteur 16 et d'autre part à la connexion P4 par un interrupteur 18. Le condensateur C4 a une extrémité reliée d'une part à l'entrée inverseuse de l'amplificateur opérationnel OA2 par un interrupteur 20 et d'autre part à un noeud N3 par un interrupteur 22, et une autre extrémité reliée à la sortie de l'amplificateur opérationnel OA2. Le condensateur C5 a une extrémité reliée à l'entrée inverseuse de l'amplificateur opérationnel OA2 et une autre extrémité reliée par un interrupteur 24 à la sortie de l'amplificateur opérationnel OA2. Le condensateur C6 a une première extrémité reliée d'une part, à la sortie de l'amplificateur opérationnel OA1 par un interrupteur 26 et d'autre part à la connexion P6 par un interrupteur 28, et une deuxième extrémité reliée d'une part à l'entrée inverseuse dans l'amplificateur opérationnel OA1 par un interrupteur 30 et

d'autre part à l'entrée inverseuse de l'amplificateur opérationnel OA2 par un interrupteur 32. Le condensateur C7 a une extrémité reliée à l'entrée inverseuse de l'amplificateur opérationnel OA1 et une autre extrémité reliée d'une part, à la  
5 sortie de l'amplificateur opérationnel OA2 par un interrupteur 34 et d'autre part à un noeud N4 par un interrupteur 36. Le condensateur C8 a une extrémité reliée d'une part à l'entrée inverseuse de l'amplificateur opérationnel OA1 par un interrupteur 38 et d'autre part à la connexion P5 par un  
10 interrupteur 40 et une autre extrémité reliée d'une part à la sortie de l'amplificateur opérationnel OA1 par l'interrupteur 26 et d'autre part à la connexion P6 par l'interrupteur 28.

La cellule biquadratique de l'invention comprend en outre quatre commutateurs à deux positions qui permettent, pour chaque  
15 fonction de filtrage définie par un choix des connexions d'entrée et de sortie, d'obtenir différentes configurations de la cellule biquadratique qui se distinguent par leur sensibilité au gain des amplificateurs opérationnels et au ratio des capacités. L'état des commutateurs 46, 48, 50, 52 est commandé par des signaux  
20 appliqués sur des bornes B1, B2, B3, B4 de la cellule biquadratique.

Le commutateur 46 est disposé de manière à relier le noeud N1 à l'entrée inverseuse de l'amplificateur opérationnel OA2 ou à la terre ; le commutateur 48 est disposé de manière à  
25 relier le noeud N2 à l'entrée inverseuse de l'amplificateur opérationnel OA2 ou à la terre ; le commutateur 50 est disposé de manière à relier le noeud N3 à la sortie de l'amplificateur opérationnel OA1 ou à la terre ; et, le commutateur 52 est disposé de manière à relier le noeud N4 à l'entrée inverseuse de  
30 l'amplificateur opérationnel OA2 ou à la terre.

La cellule biquadratique de l'invention, dont un mode de réalisation est représenté schématiquement sur la figure 1, ne comporte pas de boucle continue de contre-réaction. Pour stabiliser les amplificateurs opérationnels, il est connu  
35 d'introduire sur chaque amplificateur opérationnel deux

condensateurs de petite capacité qui créent une boucle de contre-réaction comme on l'a représentée schématiquement sur la figure 2.

5 Sur cette figure, un amplificateur opérationnel 54 comprend une boucle de contre-réaction constituée par un condensateur  $C_x$  et un condensateur  $C_y$  connectés en série. Deux interrupteurs 56 et 58 sont en outre disposés chacun entre le point commun <sup>e</sup> des condensateurs et la terre. Cette boucle de contre-réaction est décrite notamment dans les articles A6 et A7.

10 On a représenté sur la figure 3 un circuit équivalent à la cellule biquadratique représentée sur la figure 1 dans laquelle les commutateurs 46, 48 et 52 sont reliés à l'entrée inverseuse de l'amplificateur opérationnel OA2, et le commutateur 50 est relié à la sortie de l'amplificateur opérationnel OA1.

15 Dans cet état du commutateur 46, les interrupteurs 6 et 8 de la figure 1 permettent de relier en permanence le condensateur  $C_1$  à l'entrée inverseuse de l'amplificateur opérationnel OA2. De même, le commutateur 48 met en parallèle les interrupteurs 12 et 14, ce qui permet de relier en permanence le condensateur  $C_3$  à l'interrupteur 32.

20 La cellule biquadratique représentée sur la figure 3 possède la propriété d'être peu sensible aux variations de gain des amplificateurs opérationnels. Elle présente également de bonnes performances en ce qui concerne la capacité totale des condensateurs.

25 La cellule biquadratique représentée sur la figure 3 peut être utilisée pour réaliser différentes fonctions de filtrage, selon la connexion choisie pour appliquer le signal à filtrer et la connexion choisie pour recueillir le signal filtré.

30 Les figures 4a, 4b et 4c illustrent schématiquement l'état des connexions P1, P2, P3, ..., P6, correspondant respectivement à un filtre passe-bande, un filtre passe-bas, et un filtre passe-haut.

35 Un filtre passe-bande BP1 est obtenu en appliquant le signal à filtrer  $V_{in}$  sur la connexion P5 et en recueillant le

signal filtré  $V_{out}$  sur la connexion P2, les connexions P1, P3, P4, et P6 étant reliées à la terre. La fonction de transfert de ce filtre est égale à :

$$F_{BP1}(z) = \frac{N_{BP1}(z)}{D(z)}$$

$$\text{où } N_{BP1}(z) = -z^{-1} \cdot (1-z^{-1}) \cdot C2 \cdot C6 \cdot C8 \cdot (C3 + C4) / W$$

$$\text{et } D(z) = 1 + z^{-1} \left[ -2 + \frac{C4 \cdot C7 \cdot (C1 \cdot C6 + C2 \cdot C6 + C1 \cdot C8)}{W} \right] + z^{-2} \left( 1 - \frac{C2 \cdot C4 \cdot C6 \cdot C7}{W} \right)$$

$$\text{avec } W = C2 \cdot C5 \cdot (C3 + C4) \cdot (C6 + C8)$$

Un filtre passe-bas LP1 s'obtient, comme représenté sur la figure 4b, en appliquant le signal à filtrer  $V_{in}$  sur la connexion P5 et en recueillant le signal filtré  $V_{out}$  sur la connexion P1, les connexions P2, P3, P4 et P6 étant reliées à la terre.

La fonction de transfert de ce filtre passe-bas est égale à :

$$F_{LP1}(z) = \frac{N_{LP1}(z)}{D(z)}$$

$$\text{où } N_{LP1}(z) = -z^{-2} \cdot C4 \cdot C6 \cdot C7 \cdot C8 / W$$

Un filtre passe-haut HP s'obtient, comme représenté sur la figure 4c, en appliquant le signal à filtrer  $V_{in}$  sur la connexion P6 et en recueillant le signal filtré  $V_{out}$  sur la connexion P2, les connexions P1, P3, P4 et P5 étant reliées à la terre. La fonction de transfert de ce filtre est définie par :

$$F_{HP}(z) = \frac{N_{HP}(z)}{D(z)}$$

$$\text{où } N_{HP}(z) = -(1-z^{-1})^2 \cdot C6 / C5$$

On a représenté sur la figure 5 une cellule biquadratique correspondant à une seconde configuration de cellule biquadratique de la figure 1. La cellule biquadratique de la figure 5 s'obtient en commandant les commutateurs 46, 48, 50 et 52 de la figure 1 de manière à relier les noeuds N1, N2, N3 et N4 à la terre.

Sur la figure 5, les éléments identiques à ceux de la figure 1 portent les mêmes références. Les interrupteurs 20e et 22 de la figure 1 sont respectivement confondus, sur la figure 5, avec les interrupteurs 12e et 14o.

Selon les connexions choisies pour l'entrée et la sortie du signal, la cellule biquadratique de la figure 5 constitue un filtre passe-bande, un filtre passe-bas, ou un filtre passe-haut. Des exemples de filtres sont représentés schématiquement sur les figures 6a à 6e.

La cellule biquadratique de la figure 5 permet d'obtenir les filtres décrits en référence aux figures 4a, 4b et 4c obtenus à partir de la cellule biquadratique de la figure 3. Ainsi, les figures 6a, 6c et 6e montrent comment obtenir respectivement le filtre passe-bande BP1, le filtre passe-bas LP1 et le filtre passe-haut HP ; les connexions pour l'obtention de ces filtres sont identiques à celles décrites en référence aux figures 4a, 4b et 4c.

La cellule biquadratique de la figure 5 peut être également connectée de manière à former un second filtre passe-bande BP2. Les connexions sont représentées sur la figure 6b : le signal à filtrer est reçu sur la connexion P4 et le signal filtré recueilli sur la connexion P1, les connexions P2, P3, P5 et P6 étant reliées à la terre. La fonction de transfert de ce filtre est définie par :

$$F_{BP2}(z) = \frac{N_{BP2}(z)}{D(z)}$$

où  $N_{BP2}(z) = z^{-1}(1-z^{-1})C3.C7.C5(C6+C8)/W$

La cellule biquadratique de la figure 5 peut être également connectée pour former un second filtre passe-bas LP2. Les connexions pour l'obtention de ce filtre sont représentées sur la figure 6d : le signal à filtrer est reçu sur la connexion P3 et le signal filtré est recueilli sur la connexion P2, les connexions P1, P4, P5 et P6 étant reliées à la terre. La fonction de transfert de ce filtre est définie par :

$$F_{LP2}(z) = \frac{N_{LP2}(z)}{D(z)}$$

où  $N_{LP2}(z) = -(1-z^{-1})^2.C6/C5$

La cellule biquadratique représentée sur la figure 5 présente la propriété d'être peu sensible au ratio de capacité et de bonnes performances en ce qui concerne la capacité totale des condensateurs.

On a représenté sur la figure 7 une troisième cellule biquadratique correspondant à une configuration particulière de la cellule biquadratique de la figure 1. La cellule biquadratique représentée sur la figure 7 correspond à la cellule biquadratique représentée sur la figure 1 dans laquelle le noeud N1 est relié à l'entrée inverseuse de l'amplificateur opérationnel OA2, le noeud N2 est relié à la terre, le noeud N3 est relié à la sortie de l'amplificateur opérationnel OA1 et le noeud N4 est relié à la terre. Les interrupteurs 6 et 8 sont ainsi en parallèle, ce qui permet une connexion permanente du condensateur C1 à l'entrée inverseuse de l'amplificateur opérationnel OA2.

La cellule biquadratique représentée sur la figure 7 constitue un compromis, du point de vue de la sensibilité au gain des amplificateurs opérationnels et au ratio de capacité, par rapport aux cellules biquadratiques représentées sur les figures 3 et 5.

Selon les connexions choisies pour l'entrée et la sortie du signal, la cellule biquadratique de la figure 7 permet d'obtenir le filtre passe-bande BP1, le filtre passe-bande BP2, le filtre passe-bas LP1 et le filtre passe-haut HP. Les connexions à réaliser pour l'obtention de ces filtres sont représentées sur les figures 8a à 8d. Ces connexions sont respectivement identiques à celles illustrées sur les figures 6a, 6b, 6c et 6e.

Pour chacune des figures représentées sur les figures 3, 5 et 7, le demandeur a analysé l'effet du gain fini des amplificateurs opérationnels sur le facteur de surtention  $Q$ , et sur la pulsation  $\omega_0$  correspondant à la fréquence centrale  $f_0$  du signal à traiter. Ces paramètres sont définis par la relation suivante :

$$\omega_0 \cdot T_s = \frac{C1 \cdot C4 \cdot C7}{C2 \cdot C5 \cdot (C3 + C4)}$$

$$Q = \frac{C6 + C8}{C6} \cdot \sqrt{\frac{C1 \cdot C5 \cdot (C3 + C4)}{C2 \cdot C7 \cdot C4}}$$

où  $T_s$  est la période du signal d'horloge de commande des interrupteurs.

Le tableau 1 montre les erreurs relatives sur les paramètres  $Q$  et  $\omega_0$ , pour différentes valeurs des condensateurs, avec des amplificateurs opérationnels ayant un gain égal à 50 et pour des valeurs nominales  $Q = 16$  et  $\omega_0 T_s = 0,25$ .

Dans ce tableau 1,  $\eta$  représente le rapport entre la capacité du plus grand condensateur et la capacité du plus petit condensateur et  $\sum C$  représente la somme des capacités des condensateurs, sans les condensateurs auxiliaires  $C_x$  et  $C_y$  représentés sur la figure 2. A titre d'exemple, les capacités des condensateurs pour  $\sum C = 34$ , ont pour valeur relative :

$$C1 = C4 = 5; C3 = C6 = C7 = 1; C2 = 5,5; C5 = 12; C8 = 3,5.$$

TABLEAU 1

$\eta$	7		7		10		12		20		30,5	
	$\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0}$ [%]	$\frac{\Delta Q}{Q}$ [%]	$\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0}$ [%]	$\frac{\Delta Q}{Q}$ [%]	$\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0}$ [%]	$\frac{\Delta Q}{Q}$ [%]	$\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0}$ [%]	$\frac{\Delta Q}{Q}$ [%]	$\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0}$ [%]	$\frac{\Delta Q}{Q}$ [%]	$\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0}$ [%]	$\frac{\Delta Q}{Q}$ [%]
$\sum c$	18		22,1		26,4		34**		55		84,5	
erreurs relatives												
Cellule biquad. selon fig.3	2,12	62,6	2,34	50,8	2,46	44,4	2,65	38,0	2,91	29,1	3,1	23,1
Cellule biquad. selon fig.5	3,44	51,8	3,4	40,8	3,49	35,4	3,59	28,8	3,8	20,9	4,0	15,6
Cellule biquad. selon fig.7	3,90	55,2	3,74	48,2	3,72	45,4	3,74	45,9	3,89	47,8	4,1	49,3

Le tableau 1 ci-dessus met en évidence les propriétés différentes des cellules biquadratiques représentées sur les figures 3, 5 et 7. Les cellules biquadratiques des figures 3 et 5 présentent, pour une même capacité totale, des erreurs relatives plus faibles que la cellule biquadratique de la figure 7. La cellule biquadratique de la figure 5 présente la plus petite erreur relative sur la surtension, pour une capacité totale égale à 84,5, mais en revanche l'erreur sur  $\omega_0$  est importante. A l'inverse, la cellule biquadratique représentée sur la figure 3 présente la plus petite erreur relative sur  $\omega_0$ , pour une capacité totale de 18, mais l'erreur relative sur la surtension  $Q$  est alors plus importante.

Cependant, ces résultats ne sont pas significatifs en eux-mêmes et doivent être comparés avec ceux correspondant à des cellules biquadratiques connues.

A titre d'exemple, la cellule biquadratique représentée sur la figure 1b de l'article A2 présente les erreurs suivantes :

$$\begin{aligned}\Delta \omega_0 / \omega_0 &= 2,76 \%, \\ \Delta Q / Q &= 48,12 \%,\end{aligned}$$

pour une capacité totale  $\sum C = 23,1$ .

De même, la cellule biquadratique représentée sur la figure 5 de l'article A6 présente les erreurs relatives suivantes :

$$\begin{aligned}\Delta \omega_0 / \omega_0 &= 2,26 \%, \\ \Delta Q / Q &= 88,43 \%,\end{aligned}$$

pour une capacité totale égale à  $\sum C = 29,95$ .

On constate ainsi que la cellule biquadratique de la figure 3, pour laquelle la capacité totale est de 26,4 ou 18, présente des erreurs relatives sur  $Q$  et  $\omega_0$  inférieures à celles des cellules biquadratiques connues.

L'influence du gain des amplificateurs opérationnels sur le comportement des cellules biquadratiques est représentée sur les figures 9 à 11. Sur ces figures, on a représenté respectivement le facteur de surtension  $Q$ , l'erreur relative

sur le facteur de surtension  $\Delta Q/Q$  et l'erreur relative sur  $\Delta\omega_0/\omega_0$  en fonction du gain de l'amplificateur. Sur chacun de ces graphiques, on a représenté cinq courbes correspondant aux cellules biquadratiques indiquées dans le tableau 2.

5

TABLEAU 2

	COURBE	CELLULE BIQUADRATIQUE	$\Sigma c$	$\eta$
	1	Article A2 : fig. 1b	23,1	8,1
10	2	Invention : fig. 3	18	7
	3	Invention : fig. 5	84,5	30,5
	4	Invention : fig. 3	34	12
	5	Article A6 : fig.5	29,95	4

## ANNEXE

## Documents cités dans la description

- A1 : G. Fisher, G.S. Moschytz, SC filters for high frequencies with compensation for finite-gain amplifiers, IEEE Trans. CAS, vol.32, Oct. 1985, pp. 1050-1056.
- A2 : P.E. Fleicher, K.R. Laker, A Family of active switched capacitor biquad building blocks, The bell Syst. Tech. J., vol.58, Dec. 1979, pp. 2235-2268.
- A3 : K. Haug, F. Maloberti, G.C. Temes, Switched-capacitor integrators with low finite-gain sensitivity, Electr. Lett., 21st Nov., vol.21, 1985, pp. 1156-1157.
- A4 : K. Nagaraj, K. Singhal, T.R. Viswanathan, Y. Vlach, Reduction of finite-gain effect in switched-capacitor filters, Electr. Lett. 18th July 1985, vol.21, 1985, pp.644-645.
- A5 : K. Nagaraj, J. Vlach, T.R. Viswanathan, K. Singhal switched-capacitor integrator with reduced sensitivity to amplifier gain, Electr., Lett., 9th October 1986, vol.22, n°21, pp.1103-1105.
- A6 : A.E. Said, M.E. Zaghloul, Stray-free switched-capacitor general biquad blocks, IEE Proc. Pt-G, vol.133, June 1986, pp.154-158.
- A7 : K.R. Laker, P.E. Fleischer, A. Ganesan, Parasitic insensitive, biphasic switched capacitor filters realised with one operational amplifier per pole pair. The Bell Syst. Tech., vol.61, (5), 1982, pp.685-707.

## RENDICATIONS

5 1. Cellule biquadratique à capacités commutées  
comprenant six connexions d'entrée-sortie P1, P2, ..., P6, et une  
entrée d'horloge H pour recevoir un signal d'horloge pour  
commander la fermeture et l'ouverture d'un ensemble  
d'interrupteurs, lesdits interrupteurs comprenant une première  
famille d'interrupteurs qui sont commandés dans l'état ouvert  
pendant une première demi-période de chaque période du signal  
d'horloge et qui sont commandés dans l'état fermé pendant une  
10 seconde demi-période de chaque période du signal d'horloge, et  
une seconde famille d'interrupteurs qui sont commandés dans  
l'état fermé pendant ladite première demi-période de chaque  
période du signal d'horloge et dans l'état fermé pendant ladite  
seconde demi-période de chaque période du signal d'horloge,  
15 ladite cellule biquadratique étant caractérisée en ce qu'il  
comprend :

- un premier amplificateur opérationnel OA1 muni d'une  
entrée non inverseuse reliée à la terre, d'une entrée inverseuse  
E1, et d'une sortie inverseuse S1 reliée à la première connexion  
20 P1 du filtre,

- un second amplificateur opérationnel OA2 muni d'une  
entrée non-inverseuse reliée à la terre, d'une entrée inverseuse  
E2, et d'une sortie S2 reliée à la deuxième connexion P2 du  
filtre,

25 - un premier condensateur C1 et des interrupteurs pour  
connecter ledit condensateur entre la sortie S1 du premier  
amplificateur opérationnel et l'entrée E2 du second amplificateur  
opérationnel pendant lesdites premières demi-périodes du signal  
d'horloge, et pour connecter ledit condensateur à la connexion P3  
30 et à un noeud N1 pendant lesdites secondes demi-périodes du  
signal d'horloge,

- un deuxième condensateur C2 et des interrupteurs pour  
connecter ledit condensateur entre l'entrée E1 et la sortie S1 du  
premier amplificateur opérationnel pendant lesdites premières

demi-périodes du signal d'horloge, et pour connecter ledit condensateur uniquement à l'entrée E1 du premier amplificateur opérationnel pendant lesdites secondes demi-périodes du signal d'horloge,

5                   - un troisième condensateur C3 et des interrupteurs pour connecter ledit condensateur entre un noeud N2 et la connexion P4 pendant lesdites premières demi-périodes du signal d'horloge, et pour connecter ledit condensateur entre l'entrée E2 et la sortie S2 du second amplificateur opérationnel pendant  
10 lesdites secondes demi-périodes du signal d'horloge,

                  - un quatrième condensateur C4 et des interrupteurs pour connecter ledit condensateur entre un noeud N3 et la sortie S2 du second amplificateur opérationnel pendant lesdites  
15 premières demi-périodes du signal d'horloge, et pour connecter ledit condensateur entre l'entrée E2 et la sortie S2 du second amplificateur opérationnel pendant lesdites secondes demi-périodes du signal d'horloge,

                  - un cinquième condensateur C5 et des interrupteurs pour connecter ledit condensateur entre l'entrée E2 et la sortie  
20 S2 du second amplificateur opérationnel pendant lesdites premières demi-périodes du signal d'horloge, et pour connecter ledit condensateur uniquement à l'entrée E2 du second amplificateur opérationnel pendant lesdites secondes demi-périodes du signal d'horloge,

25                   - un sixième condensateur C6 et des interrupteurs pour connecter ledit condensateur entre la connexion P6 et l'entrée E2 du second amplificateur opérationnel pendant lesdites premières demi-périodes du signal d'horloge, et pour connecter ledit condensateur entre la sortie S1 et l'entrée E1 du premier  
30 amplificateur opérationnel pendant lesdites secondes demi-périodes du signal d'horloge,

                  - un septième condensateur C7 et des interrupteurs pour connecter ledit condensateur entre l'entrée E1 du premier  
35 amplificateur opérationnel et un noeud N4 pendant lesdites premières demi-périodes du signal d'horloge, et pour connecter

ledit condensateur entre l'entrée E1 du premier amplificateur opérationnel et la sortie S2 du second amplificateur opérationnel pendant lesdites secondes demi-périodes du signal d'horloge,

5 - un huitième condensateur C8 et des interrupteurs pour connecter ledit condensateur entre les connexions P5 et P6 pendant lesdites premières demi-périodes du signal d'horloge, et pour connecter ledit condensateur entre l'entrée E1 et la sortie S1 du premier amplificateur opérationnel pendant lesdites secondes demi-périodes du signal d'horloge, et

10 - quatre commutateurs à deux positions commandés par des signaux appliqués sur des bornes B1, B2, B3, B4 de la cellule biquadratrice, le premier commutateur étant disposé pour relier le noeud N1 à l'entrée E2 du second amplificateur opérationnel ou à la terre, le deuxième commutateur étant disposé pour relier le  
15 noeud N2 à l'entrée E2 du second amplificateur opérationnel ou à la terre, le troisième commutateur étant disposé pour relier le noeud N3 à la sortie S1 du premier amplificateur opérationnel ou à la terre, et le quatrième commutateur étant disposé pour relier le noeud N4 à l'entrée E2 du second amplificateur opérationnel ou  
20 à la terre.

2. Cellule biquadratique à capacités commutées caractérisée en ce que des commutateurs sont commandés pour relier les noeuds N1, N2 et N4 à l'entrée inverseuse du second amplificateur opérationnel OA2 et le noeud N3 à la sortie du  
25 premier amplificateur opérationnel OA1.

3. Cellule biquadratique à capacités commutées caractérisée en ce que les commutateurs sont commandés de manière à relier les noeuds N1, N2, N3 et N4 à la terre.

4. Cellule biquadratique à capacités commutées  
30 caractérisée en ce que les commutateurs sont commandés de manière à relier le noeud N1 à l'entrée inverseuse de l'amplificateur opérationnel OA2, le noeud N3 à la sortie de l'amplificateur opérationnel OA1 et les noeuds N2, N4 à la terre.

5. Cellule biquadratique à capacités commutées selon  
35 l'une quelconque des revendications 2 à 4, pour former un filtre

5  
 10  
 15  
 20  
 25  
 30

5. passe-bande, caractérisée en ce que les connexions d'entrée et de sortie du filtre sont respectivement les connexions P5 et P2, les connexions P1, P3, P4 et P6 étant reliées à la terre.

6. Cellule biquadratique à capacités commutées selon l'une quelconque des revendications 3 et 4 pour former un filtre passe-bande, caractérisée en ce que les connexions d'entrée et de sortie du filtre sont respectivement les connexions P4 et P1, les connexions P2, P3, P5 et P6 étant reliées à la terre.

7. Cellule biquadratique à capacités commutées selon l'une quelconque des revendications 2 à 4 pour former un filtre passe-bas, caractérisée en ce que les connexions d'entrée et de sortie du filtre sont constituées respectivement par les connexions P5 et P1, les connexions P2, P3, P4 et P6 étant reliées à la terre.

8. Cellule biquadratique à capacités commutées selon la revendication 3 pour former un filtre passe-bas, caractérisée en ce que les connexions d'entrée et de sortie du filtre sont constituées respectivement par les connexions P3 et P2, les connexions P1, P4, P5 et P6 étant reliées à la terre.

9. Cellule biquadratique à capacités commutées selon l'une quelconque des revendications 2 à 4 pour former un filtre passe-haut, caractérisée en ce que les connexions d'entrée et de sortie du filtre sont constituées respectivement par les connexions P6 et P2, les connexions P1, P3, P4 et P5 étant reliées à la terre.

10. Cellule biquadratique à capacités commutées selon l'une quelconque des revendications des revendications 1 à 9, caractérisée en ce que chaque amplificateur opérationnel comporte une boucle continue de contre réaction comprenant deux condensateurs de faible capacité  $C_x$  et  $C_y$  connectés en série, un interrupteur de la première famille  $x$  d'interrupteurs et un interrupteur de la seconde famille  $y$  d'interrupteurs disposés chacun entre le point commun des condensateurs  $C_x$  et  $C_y$  et la terre.



FIG. 2

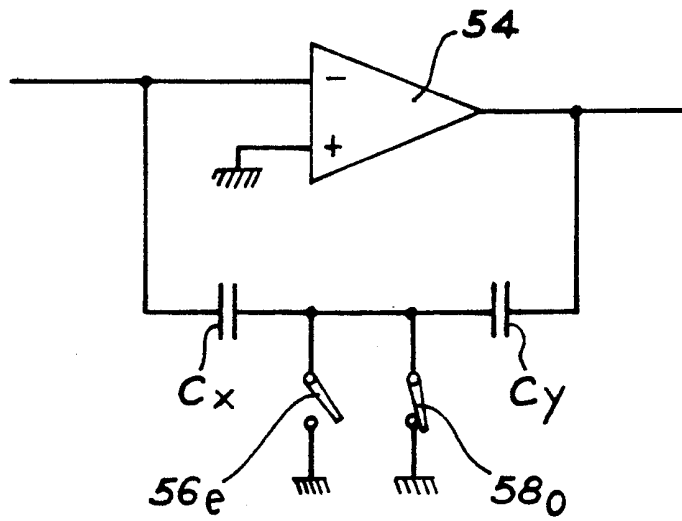
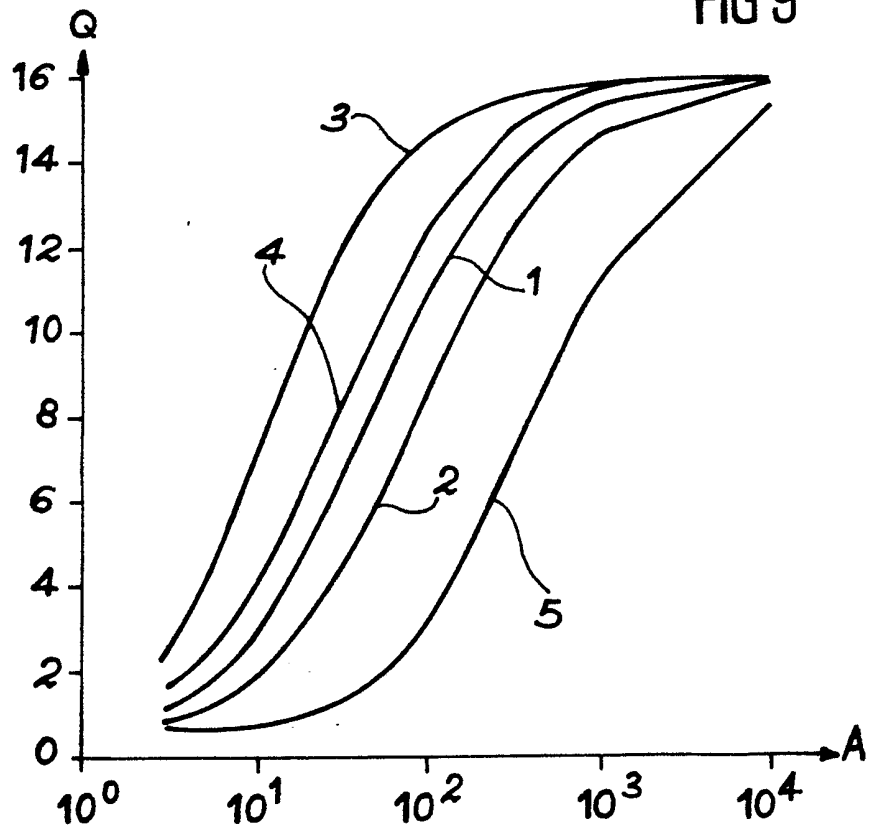


FIG 9



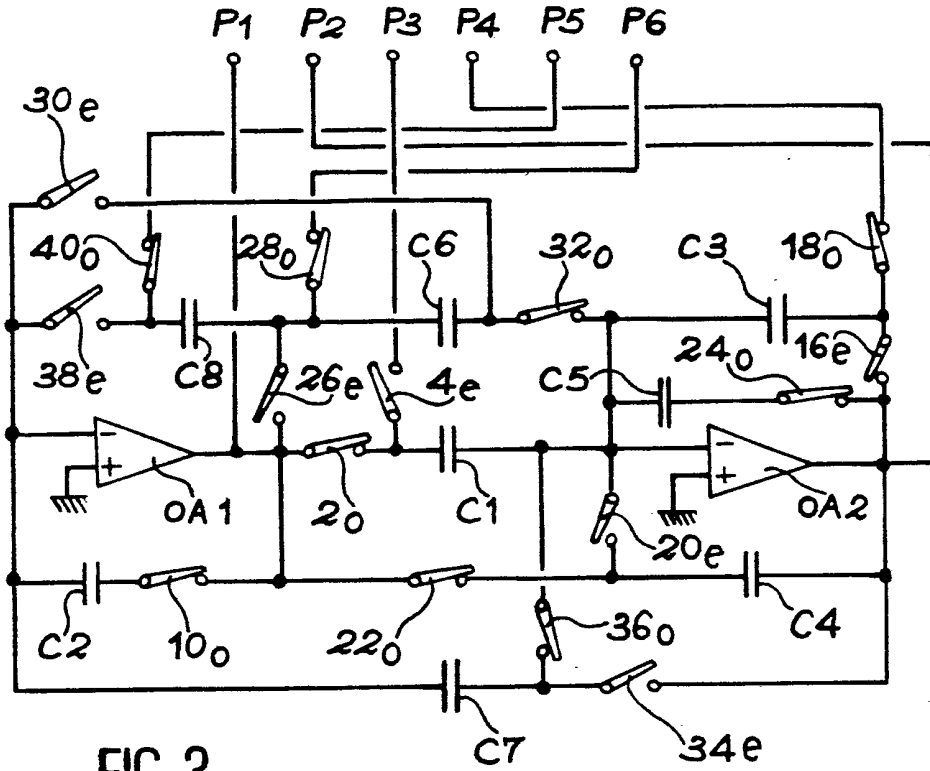
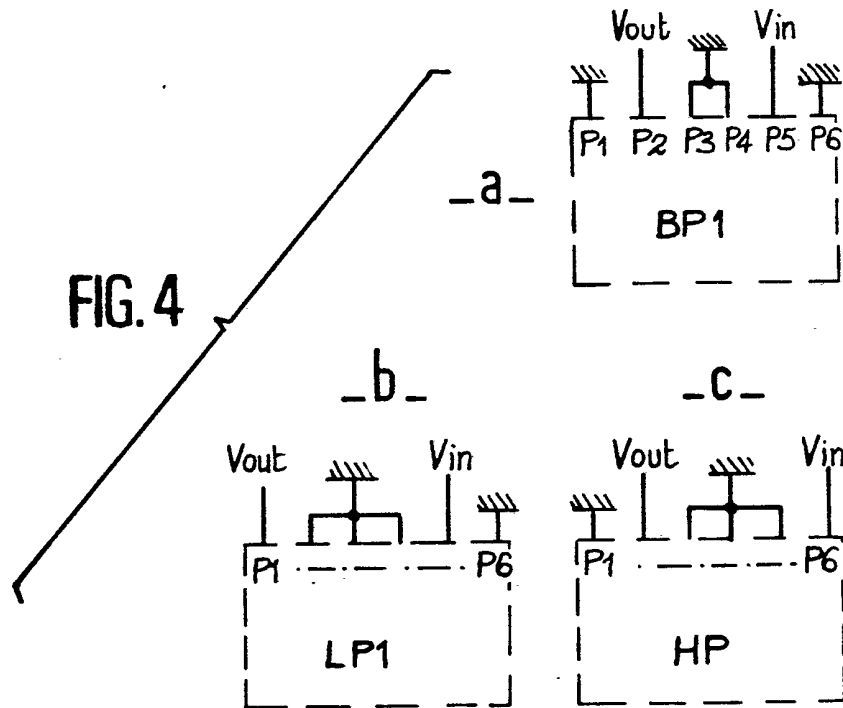


FIG. 3



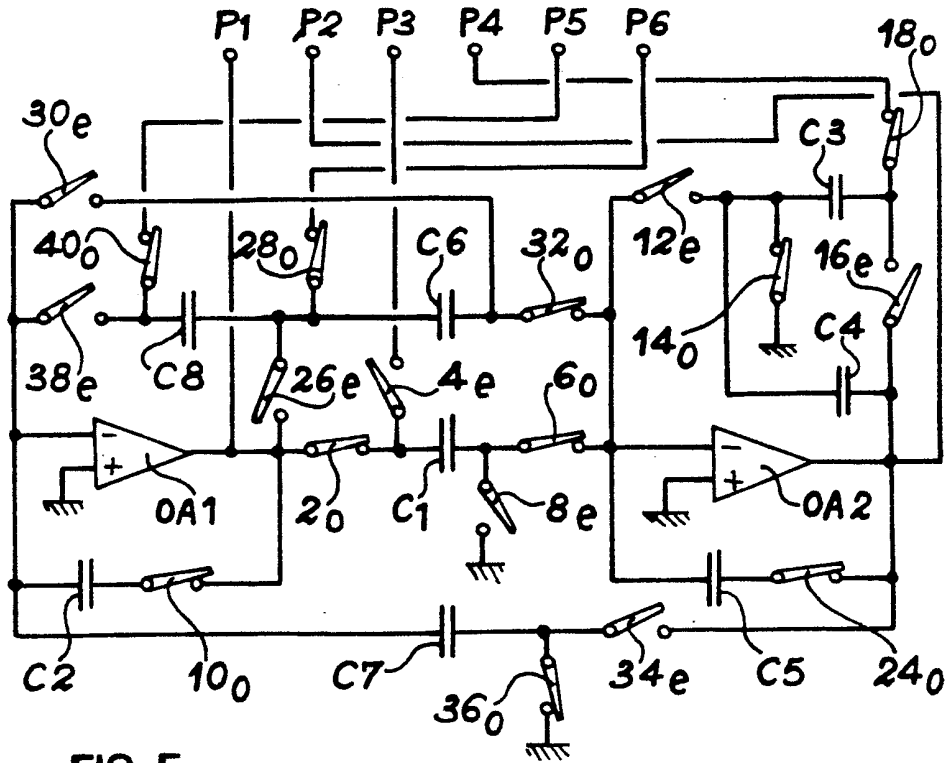
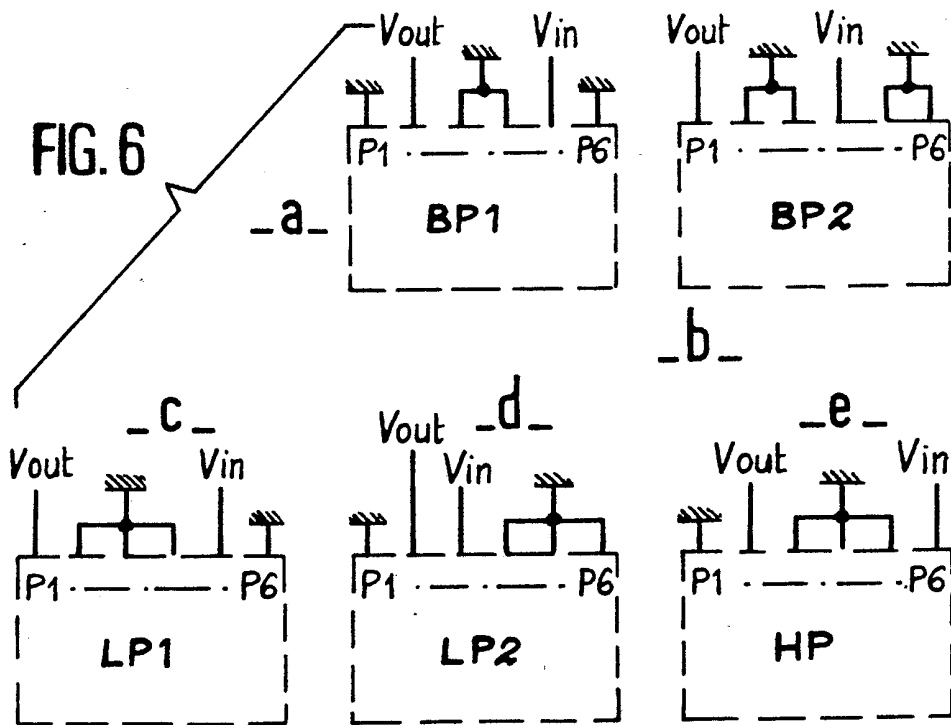


FIG. 5



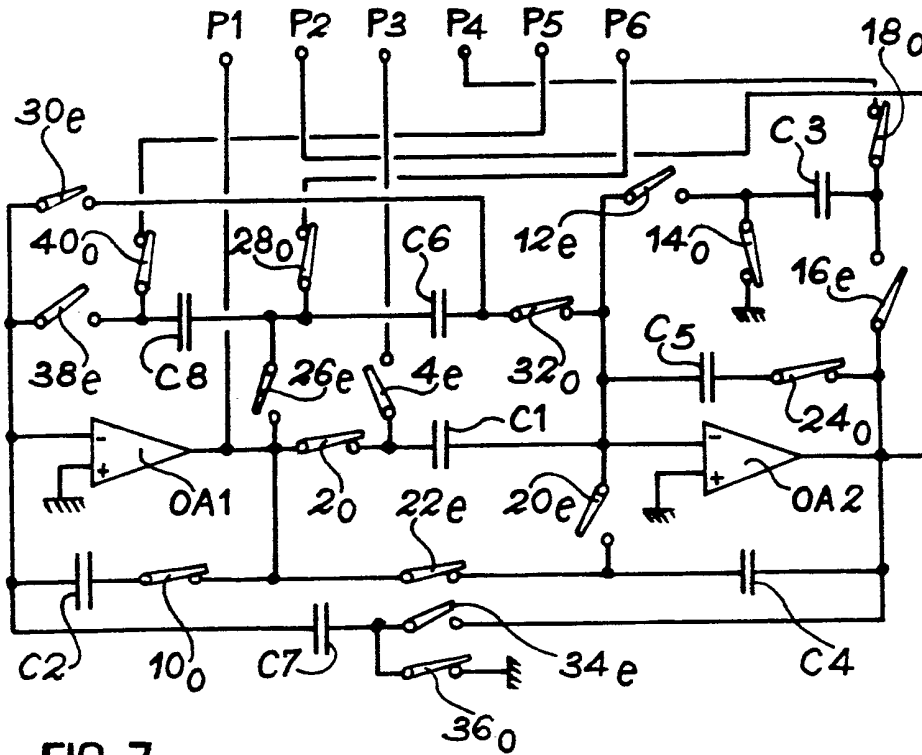


FIG. 7

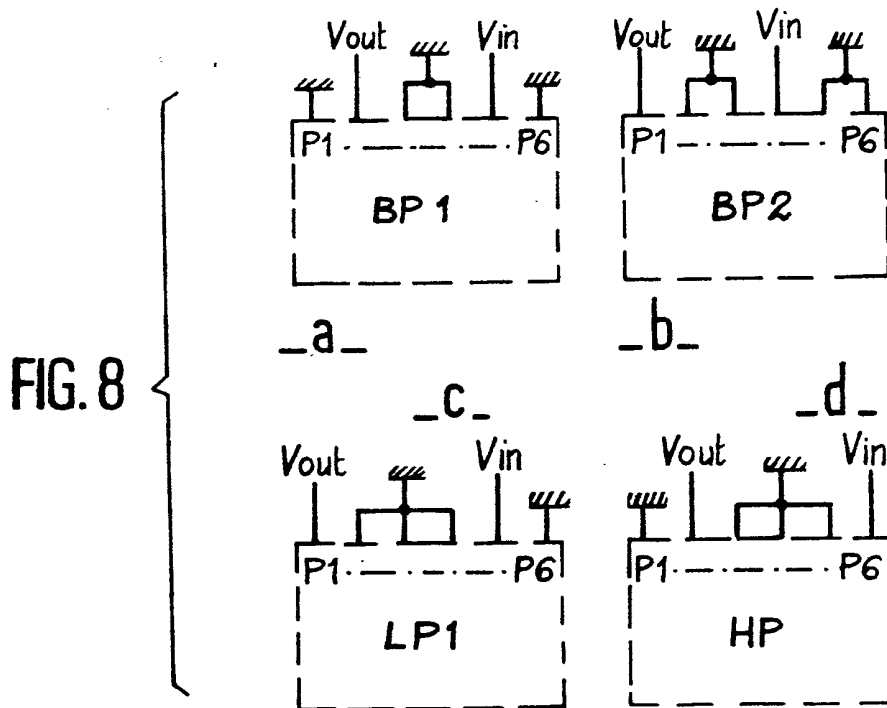


FIG. 8

