

A1

**DEMANDE
DE BREVET D'INVENTION**

⑫

N° 80 24514

⑤④ Système de modulation de fréquence par oscillateur à cristal à fréquence commandée.

⑤① Classification internationale (Int. Cl.³). H 03 C 3/00.

②② Date de dépôt..... 19 novembre 1980.

③③ ③② ③① Priorité revendiquée :

④① Date de la mise à la disposition du
public de la demande..... B.O.P.I. — « Listes » n° 20 du 21-5-1982.

⑦① Déposant : SOCIÉTÉ NATIONALE D'ÉTUDE ET DE CONSTRUCTION DE MOTEURS D'AVIATION (SNECMA), société anonyme, résidant en France.

⑦② Invention de : Bernard Albert Jean Chevallier.

⑦③ Titulaire : *Idem* ⑦①

⑦④ Mandataire : François Moinat, service des brevets SNECMA,
BP 81, 91003 Evry Cedex.

Système de modulation de fréquence par oscillateur à cristal à fréquence commandée.

La présente invention se rapporte à un système de modulation de fréquence par oscillateur à cristal à fréquence commandée, du type comprenant un cristal ou quartz piézo-électrique et une réactance simulée variant de façon linéaire avec une tension de modulation et branchée en série avec le cristal pour moduler la fréquence d'oscillation du cristal.

On connaît déjà des dispositifs connus sous l'appellation "oscillateur à quartz commandé par une tension" ou "oscillateur à fréquence contrôlée" et souvent désignés en abrégé par VCXO. De tels types d'oscillateurs à quartz ont été décrits par exemple dans la revue l'Onde Electrique, vol XLVI, n° 466 de janvier 1966, dans un article de P.Vovelle.

De tels oscillateurs à fréquence commandée permettent, en principe, de réaliser directement une modulation de fréquence tout en gardant à la fréquence centrale la stabilité du quartz. Mais leurs limitations sont les suivantes :

- pratiquement la déviation de fréquence possible est limitée à 10 fois la stabilité du quartz et ce n'est qu'avec une taille spéciale ou des circuits de compensation élaborés que l'on peut obtenir un facteur 100 sur un quartz fonctionnant sur son fondamental ;
- la linéarité aux basses fréquences de modulation est critique et, de plus, les fréquences de modulation de l'ordre de 100 kHz et au dessus excitent des modes parasites d'oscillation du quartz amenant une distorsion inacceptable.

Avec les dispositifs de l'art antérieur, qui utilisent par

exemple pour compenser la capacité inter-électrode C_0 du quartz la mise en oeuvre d'une inductance L_0 telle que le produit $L_0 C_0$ corresponde à une résonance dans la bande de fréquence utilisée, les déviations de fréquence possibles en fonction de la valeur du module d'un élément réactif X mis en série avec le quartz sont totalement dissimilables pour $X > 0$ et $X < 0$ et la compensation de C_0 n'étant que ponctuelle, il n'est pratiquement pas possible d'obtenir une excursion symétrique de part et d'autre de la fréquence naturelle du quartz f_N .

Par ailleurs, la linéarité de la modulation dépend non seulement de la linéarité de la déviation de fréquence en fonction du module de la réactance X mise en série avec le quartz, mais également de la variation de ce module avec la tension de commande appliquée.

La réactance X est habituellement obtenue au moyen d'un circuit LC dont le condensateur est constitué par une diode à capacité variable encore appelée varactor ou varicap. Ce dispositif permet effectivement d'obtenir des variations positives et négatives du module de X s'il est accordé à la fréquence f_N pour une tension appliquée à la diode à capacité variable égale à la médiane de la plage de commande. Par contre, sa linéarité n'est pas suffisante pour les spécifications exigées et la stabilité, notamment en température, est liée à celle de nombreux composants (self, varicap, tension de commande etc...).

Enfin, l'un des facteurs influant sur la linéarité de la modulation est le comportement du quartz aux fréquences de modulation supérieures à 100 kHz environ, car ces fréquences sont susceptibles d'exciter des modes secondaires du quartz qui introduisent une perturbation abrupte dans la courbe de modulation. Par suite, les dispositifs de l'art antérieur présentent une bande passante de modulation qui est généralement limitée.

La présente invention vise précisément à remédier aux inconvénients précités et à permettre la réalisation d'un système de modulation de fréquence par oscillateur à cristal à fréquence commandée qui présente à la fois une excellente linéarité de modulation, une large bande passante de modulation, des déviations de fréquence positives ou négatives symétriques, et une excellente stabilité relative de fréquence.

- 10 Ces buts sont atteints grâce à un système de modulation de fréquence par oscillateur à cristal à fréquence commandée, caractérisé en ce que la synthèse de la réactance simulée variable en série avec le cristal est réalisée par une boucle comprenant en série un circuit d'élaboration d'une tension proportionnelle au courant traversant le cristal, un circuit déphaseur de 90° , et un multiplicateur quatre quadrants recevant sur une de ses entrées la tension de commande de modulation.
- 15
- 20 De façon plus particulière, le circuit d'élaboration d'une tension proportionnelle au courant traversant le cristal comprend une résistance d'amortissement et de prélèvement connectée en série avec le cristal et un premier circuit amplificateur dont l'entrée différentielle est branchée aux bornes de ladite résistance d'amortissement et de prélèvement et la sortie est connectée audit circuit déphaseur.
- 25

La boucle de synthèse de la réactance simulée variable comprend en outre un second amplificateur connecté en série entre le multiplicateur et le cristal.

30

La boucle de synthèse de la réactance simulée variable comprend en outre un circuit de réaction connecté entre la borne de la résistance non reliée au cristal et entre la sortie du premier amplificateur.

35

Selon une caractéristique avantageuse de l'invention, le

système de modulation de fréquence comprend pour compenser la capacité inter-électrode C_0 du cristal, un amplificateur opérationnel et un condensateur extérieur qui réalisent un neutrodynage, l'entrée de l'amplificateur étant reliée à la sortie du multiplicateur quatre quadrants, l'une des sorties différentielles de l'amplificateur étant connectée à une électrode du cristal et l'autre sortie différentielle de l'amplificateur étant reliée par l'intermédiaire du condensateur de compensation à l'autre électrode du cristal.

Dans un générateur de fréquence appliquant le système de modulation selon l'invention, le signal de commande de modulation issu de l'ensemble constitué par le cristal piézo-électrique et la réactance simulée associée variant linéairement avec la tension de modulation, est appliqué à un discriminateur de phase auquel est également appliqué le signal HF dérivé d'un oscillateur à fréquence commandée et le signal issu du discriminateur de phase est appliqué à l'entrée de commande dudit oscillateur à fréquence commandée.

Un tel générateur peut comprendre un réseau intégrateur qui est interposé entre la borne d'entrée de la tension de commande de modulation et le multiplicateur quatre quadrants. La sortie du réseau intégrateur est également reliée à l'entrée de commande de l'oscillateur à fréquence commandée par l'intermédiaire d'un circuit additionneur auquel est également appliqué le signal issu du discriminateur de phase.

Selon une caractéristique particulièrement avantageuse, l'oscillateur à fréquence commandée est reliée au discriminateur de phase par l'intermédiaire d'un circuit diviseur.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention ressortiront de la description qui fait suite de modes

particuliers de réalisation, donnés uniquement à titre d'exemples, en référence au dessin annexé, sur lequel :

- 5 - la figure 1 est une vue d'ensemble d'un émetteur à modulation de fréquence stabilisé par quartz mettant en oeuvre le système de modulation conforme à l'invention ;
- 10 - la figure 2 est le schéma équivalent d'un cristal piézoélectrique tel qu'un cristal de quartz utilisé dans un montage conforme à l'invention.

A titre d'exemple, on décrira le système selon l'invention appliqué à un émetteur à modulation de fréquence en bande
15 S stabilisé par cristal piézoélectrique de haute précision tel qu'un cristal de quartz, et dont le générateur de fréquence remplit les conditions suivantes :

- 20 1) le signal émis se situe en bande S entre 2188 et 2475 MHz
- 2) la stabilité relative de fréquence de $2,5 \cdot 10^{-5}$ est pratiquement celle d'un quartz
- 3) la déviation de fréquence de 1,5 MHz exprimée en relatif est de $6,5 \cdot 10^{-4}$
- 25 4) la bande passante de la modulation s'étend du continu à 1,5 MHz
- 5) la linéarité est, dans cette bande, de 1 à 2%.

Le principe de l'élaboration du signal sous harmonique du
30 signal émis ressort du schéma de la figure 1 qui utilise une modulation de fréquence produite à l'aide d'un oscillateur à quartz commandé par une tension 10 (VCXO) et met en oeuvre un seul oscillateur HF commandé en tension 1 (VCO).

35 On notera que la mise en oeuvre d'un générateur de fréquence par synthèse dans lequel un signal issu d'un oscillateur à

quartz, qui apporte la stabilité, serait mélangé à un signal provenant d'un oscillateur commandé en tension, qui permet la modulation de fréquence, présenterait le défaut de ne pas éliminer les raies parasites.

5 .

Un type de générateur par analyse classique ne présenterait pas l'inconvénient précité mais impliquerait, pour réaliser la modulation de fréquence, de mettre en oeuvre un oscillateur MF commandé en tension qui limiterait les performances du système.

10

Au contraire, selon le système de la présente invention, grâce à la mise en oeuvre d'une modulation de fréquence par VCXO, il est réalisé une synthétisation de fréquence instantanée qui accroît la vitesse de modulation, améliore la stabilité et permet d'obtenir une déviation de fréquence importante, linéaire et symétrique. Les différents éléments de circuit qui concourent à ce résultat seront décrits en référence à la figure 1. Toutefois, afin de faciliter les explications, le schéma équivalent d'un cristal de quartz 12 est également représenté sur la figure 2.

15

20

Dans le schéma équivalent de la figure 2, C_0 représente la capacité inter-électrode et L, C, R représentent le circuit résonnant série équivalent qui constitue la partie utile et stable de l'oscillateur. Pour réaliser une déviation de fréquence dans l'oscillateur incorporant le cristal piézoélectrique 12, il convient de mettre en série avec le cristal 12 un élément réactif X tel que l'ensemble LCX donne une fréquence d'accord f qui est différente de la fréquence naturelle du cristal f_N .

25

30

Dans ces conditions, l'impédance présentée par l'ensemble L.C. n'est plus nulle et l'influence de C_0 se fait sentir d'autant plus qu'on s'est plus écarté de f_N . Par ailleurs, les déviations de f en fonction du module de X sont totalement dissemblables pour $X > 0$ et $X < 0$ et la linéarité n'est

35

obtenue que si C_0 est parfaitement compensé par un circuit qui annule son influence. En dehors de cette configuration, il n'est pratiquement pas possible d'obtenir une excursion symétrique de part et d'autre de f_N .

5

Selon l'invention, on a remédié aux inconvénients précités en associant au cristal piézoélectrique 12, à la façon d'un neutrodynage, un condensateur extérieur 13 et un amplificateur opérationnel 11 afin de créer une impédance qui compense exactement la capacité inter-électrode C_0 du cristal 12 sur une large bande de fréquence. Une sortie de l'amplificateur opérationnel 11 est reliée à une électrode du cristal 12, tandis que l'autre électrode du cristal 12 est elle-même reliée à une autre sortie inversée de l'amplificateur 11 par l'intermédiaire du condensateur 13. Par ce moyen, il est possible d'obtenir par variation du module de la réactance X une déviation linéaire et symétrique de part et d'autre de la fréquence naturelle f_N du cristal.

20 La linéarité de la modulation de fréquence est garantie selon l'invention, non seulement par le fait que les effets de la capacité parasite du quartz sont supprimés du fait de la nature apériodique du montage de correction, mais encore par le fait que la variation du module de la réac-
25 tance X présente elle-même une excellente linéarité avec la tension de commande de modulation qui, sur le schéma de la figure 1 est appliqué sur la borne 25. Selon l'invention, il est créé une réactance synthétique X (14, 15, 16) qui est mise en série avec le cristal 12. La réactance X
30 doit, lorsqu'elle est parcourue par un courant $\vec{i}$, créer une tension à ses bornes $\vec{V}$ qui est d'amplitude proportionnelle à $\vec{i}$ et qui se trouve en quadrature de phase avec $\vec{i}$. Ceci est réalisé, d'après le schéma de la figure 1, par une résistance 14 de valeur R_2 qui est mise en série avec le
35 cristal 12 et permet de prélever l'information $\vec{i}$ traversant le cristal 12, puis par un amplificateur 15 de gain A_1 , dont

les entrées sont reliées aux bornes de la résistance 14 et qui élabore en sortie une tension V proportionnelle à $\tilde{x}$, et enfin par un circuit déphaseur 16 de 90° qui déphase le signal de tension issu de l'amplificateur 15.

5 L'amplificateur 11 de gain A_2 permet d'ajouter le signal déphasé issu du déphaseur 16 à la tension existant aux bornes du quartz 12. Ainsi, l'impédance équivalente Z_q du cristal 12, associé à la boucle 14, 15, 16, 11 qui se comporte comme une réactance en série avec le cristal 12,

10 peut s'exprimer par :

$$Z_q = \epsilon j A_1 A_2 R_2 \quad (1)$$

où ϵ est compris entre $+1$ et -1 selon l'amplitude et le signe de la tension de commande appliquée au multiplicateur 18 dont le rôle sera décrit plus loin.

15

A_1 et A_2 sont les gains respectivement de l'amplificateur 15 et de l'amplificateur 11.

20 R_2 est la valeur de la résistance 14 .

Il ressort de l'équation (1) qu'à l'équilibre (pour $\epsilon = 0$) du système l'impédance équivalente présentée par le cristal 12 et sa boucle associée est résistive, c'est-à-dire que

25 la fréquence f de ce système est égale à la fréquence naturelle f_N du cristal 12. Selon le signe de ϵ , le signe du déphasage est de $+90^\circ$ ou -90° , la réactance que présente le cristal et sa boucle associée est donc soit positive, soit négative et l'écart de fréquence $f_N - f$ est ainsi soit

30 positif, soit négatif. Tout se passe donc bien comme si le cristal 12 était "tiré" par une réactance, même si cette réactance n'est pas constituée par une inductance par exemple, mais est synthétisée.

35 On considérera à titre d'exemple un cristal de quartz dont le coefficient de surtension Q vaut $50 \cdot 10^3$ et la résistance

interne R est de 20Ω . Pour une déviation de fréquence Δf faible telle que celle recherchée autour de la résonance où $\frac{\Delta f}{f} = \pm 7 \cdot 10^{-4}$ (si l'on considère une modulation maximum de 1,5 MHz à une fréquence de sortie sur la borne 26 de 2300 MHz), on peut considérer l'équation suivante :

$$Z_q = jR \cdot Q^2 \cdot \frac{\Delta f}{f} \quad (2)$$

En considérant également l'équation (1) et les valeurs numériques considérées, il s'ensuit que dans ce cas :

$$A_1 A_2 R_2 = 1400$$

Un compromis peut alors aisément être établi entre la valeur R_2 de la résistance 14 qui mise en série avec le cristal 12 l'amortit et la valeur du gain de boucle du système $A_1 A_2$.

On peut ainsi par exemple choisir une valeur $R_2 = 10 R = 200 \Omega$ pour la résistance 14 (ce qui dans l'exemple considéré ramène la surtension du système à $5 \cdot 10^3$, ce qui est acceptable) et une valeur $A_1 A_2 \approx 7$, qui permet de concevoir un système stable.

La déviation de fréquence Δf peut être exprimée par l'équation (3) suivante qui est dérivée des équations (1) et (2) :

$$\Delta f = A_1 A_2 \frac{R_2}{2R} \frac{f}{Q}$$

Divers moyens peuvent être envisagés pour produire une déviation linéaire de fréquence Δf à l'aide de la réactance synthétique associée au cristal 12, à partir d'une tension de commande, afin de réaliser une modulation de fréquence. On peut ainsi par exemple agir sur le gain $A_1 A_2$ des amplificateurs 15 et 11 au moyen d'une commande

automatique de gain linéaire. Toutefois, cette technique ne permettrait pas d'obtenir une inversion de la phase de 180° du signal en fonction de la tension de commande.

5 Aussi, selon l'invention, il est réalisé une commande de la déviation de fréquence à l'aide d'un multiplicateur 18 à quatre quadrants qui reçoit sur une de ses entrées le signal de tension déphasé V_s issu du déphaseur 16 et sur
10 l'autre entrée la tension de commande U appliquée sur la borne 25. Le signal de sortie du multiplicateur 18 est le produit de ces deux signaux V_s et U , c'est-à-dire un signal dont l'amplitude est proportionnelle à la tension de modulation U et dont la phase est $+90^\circ$ ou -90° selon le signe conféré par la polarité de U . La sortie du multiplicateur
15 18 est ainsi directement appliquée à l'entrée de l'amplificateur 11. Naturellement, un amplificateur de réaction 17 dont l'entrée est branchée à la sortie de l'amplificateur 15, et dont la sortie est connectée à la borne de la résistance 14 non reliée au cristal 12, permet à l'ensem-
20 ble du cristal 12 et de sa boucle associée de fonctionner en oscillateur. La stabilité de cet oscillateur peut être excellente car elle ne dépend que d'éléments tels que des amplificateurs ou le multiplicateur 18 qui peuvent être constitués par des circuits intégrés de haute qualité.

25

Le signal issu de l'oscillateur 10 à cristal à fréquence commandée (VCXO) et prélevé sur la borne de la résistance 14 non reliée au cristal 12, est appliqué à un discriminateur de phase 4 qui reçoit sur une autre entrée le signal
30 issu d'un oscillateur HF à fréquence commandée 1 (VCO) classique, par l'intermédiaire d'un circuit diviseur 3 (divisant par 32 dans l'exemple considéré) qui rend la fréquence du signal, issu du VCO 1 et appliqué au discriminateur de phase 4, égale à celle du signal issu du VCXO
35 et également appliqué au discriminateur de phase 4. Un multiplicateur 2 (multipliant par 4 dans l'exemple considéré) permet d'obtenir à l'entrée de l'amplificateur de

sortie 5 un signal de fréquence voulue (de l'ordre de 2300 MHz dans l'exemple considéré) à partir du VCO 1. Le signal issu du discriminateur de phase 4 est appliqué par l'intermédiaire de l'additionneur 7, dont le rôle sera décrit plus loin, et du filtre 6, au VCO 1 pour l'asservir en phase. De la sorte, on obtient bien sur la borne 26 de sortie un signal répondant aux conditions voulues de fréquence et de modulation.

10 Selon une caractéristique avantageuse du montage de la figure 1, la tension de commande U est appliquée au multiplicateur 18, non pas directement, mais par l'intermédiaire d'un réseau intégrateur 20.

15 On sait en effet que la linéarité de la déviation de fréquence peut être affectée aux fréquences de modulation supérieures à environ 100 kHz, car ces fréquences sont susceptibles d'exciter des modes secondaires de quartz qui introduisent une perturbation abrupte dans la courbe de modulation.

Pour pallier cet inconvénient, tout en conservant une large bande passante de modulation, la tension de commande U est appliquée audit réseau intégrateur 20 qui intègre des composantes du spectre supérieures à une fréquence donnée, par exemple 25 kHz. Ainsi, la partie basse fréquence du spectre, y compris la composante continue est passée en modulation de fréquence sans modification, de la façon indiquée précédemment, par application de la tension de commande au multiplicateur 18 du VCXO 10. Au contraire, la partie du spectre supérieure à 25 kHz environ est dirigée en modulation de phase directement sur la boucle de phase de l'oscillateur HF à fréquence commandée 1 (VCO) du générateur de fréquence, et est appliquée à l'additionneur 7 pour être additionnée au signal d'erreur de la boucle de phase du VCO qui provient du discriminateur de phase 4. Le VCO 1 acquiert alors une phase apportant une erreur qui annule la perturbation additionnelle

. ainsi ramenée depuis la sortie du circuit intégrateur 20.

De cette manière, tout se passe comme si l'oscillateur
à fréquence commandée 1 était modulé en fréquence par la
5 totalité du spectre.

Le circuit intégrateur 20 peut être classique et peut
comprendre par exemple un amplificateur opérationnel 21
connecté par l'intermédiaire d'une résistance 22 à la
10 borne d'entrée 25, et associé à un réseau parallèle conden-
sateur 23 - résistance 24 connecté entre l'entrée et la
sortie de l'amplificateur 21.

REVENDEICATIONS

1. Système de modulation de fréquence par oscillateur à cristal à fréquence commandée, du type comprenant un cristal ou quartz piézoélectrique et une réactance simulée variant de façon linéaire avec une tension de modulation et branchée en série avec le cristal pour moduler la fréquence d'oscillation du cristal, caractérisé en ce que la synthèse de la réactance simulée variable en série avec le cristal (12) est réalisée par une boucle comprenant en série un circuit (14, 15) d'élaboration d'une tension proportionnelle au courant traversant le cristal, un circuit déphaseur (16) de 90°, et un multiplicateur quatre quadrants (18) recevant sur une de ses entrées la tension de commande de modulation.
2. Système de modulation de fréquence selon la revendication 1, caractérisé en ce que le circuit d'élaboration d'une tension proportionnelle au courant traversant le cristal (12) comprend une résistance (14) d'amortissement et de prélèvement connectée en série avec le cristal et un premier circuit amplificateur (15) dont l'entrée différentielle est branchée aux bornes de ladite résistance (14) d'amortissement et de prélèvement et la sortie est connectée audit circuit déphaseur (16).
3. Système selon la revendication 1 ou la revendication 2, caractérisé en ce que la boucle de synthèse de la réactance simulée variable comprend en outre un second amplificateur (11) connecté en série entre le multiplicateur (18) et le cristal (12).
4. Système selon l'une quelconque des revendications 2 et 3, caractérisé en ce que la boucle de synthèse de la réactance simulée variable comprend en outre un circuit de réaction (17) connecté entre la borne de la résistance (14) non reliée au cristal (12) et entre la sortie du premier amplificateur (15).

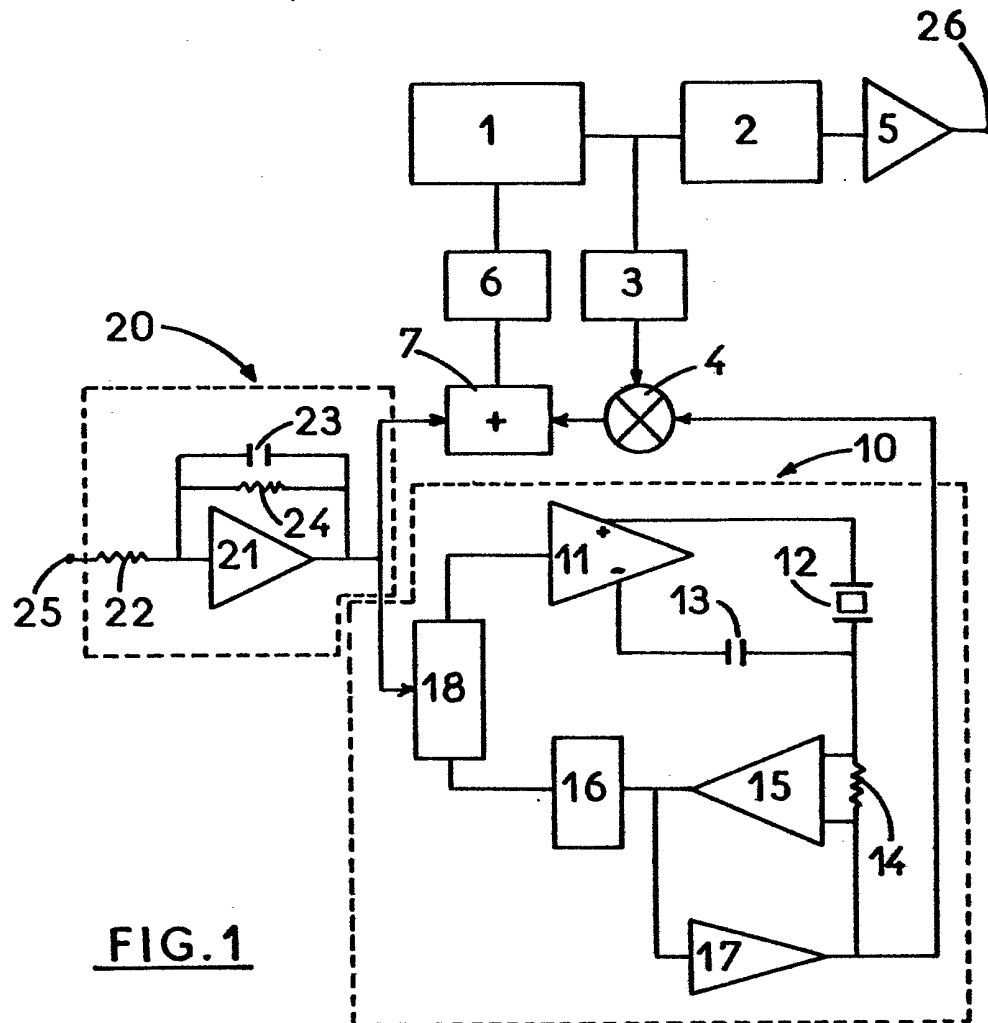
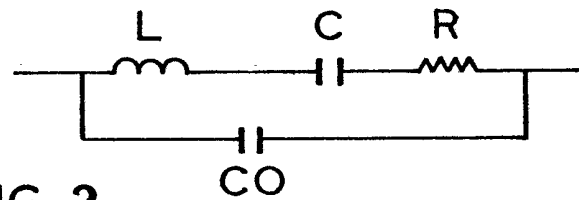
5. Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce qu'il comprend pour compenser la capacité inter-électrode C_0 du cristal (12), un amplificateur opérationnel (11) et un condensateur extérieur (13) qui réalisent
5 un neutrodynage, l'entrée de l'amplificateur (11) étant reliée à la sortie du multiplicateur quatre quadrants (18), l'une des sorties différentielles de l'amplificateur (11) étant connectée à une électrode du cristal (12) et l'autre sortie différentielle de l'amplificateur (11) étant reliée par l'in-
10 termédiaire du condensateur (13) de compensation à l'autre électrode du cristal (12).

6. Système selon l'une quelconque des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que le signal de commande de modulation
15 issu de l'ensemble constitué par le cristal piézoélectrique et la réactance simulée associée variant linéairement avec la tension de modulation, est appliqué à un discriminateur de phase (4) auquel est également appliqué le signal HF dé-
rivé d'un oscillateur à fréquence commandée (1) et en ce que
20 le signal issu du discriminateur de phase (4) est appliqué à l'entrée de commande dudit oscillateur à fréquence commandée (1).

7. Système selon la revendication 6, caractérisé en ce qu'un
25 réseau intégrateur (21,22,23,24) est interposé entre la borne d'entrée de la tension de commande de modulation et le multiplicateur quatre quadrants (18), et en ce que la sortie du réseau intégrateur est également reliée à l'entrée de commande de l'oscillateur à fréquence commandée par l'intermédiaire
30 d'un circuit additionneur (7) auquel est également appliqué le signal issu du discriminateur de phase (4).

8. Système selon la revendication 7, caractérisé en ce que la sortie de l'oscillateur à fréquence commandée (1) est
35 reliée au discriminateur de phase (4) par l'intermédiaire d'un circuit diviseur (3).

1/1

FIG. 1FIG. 2