

LE LABORATOIRE DE L'AMATEUR ELECTRONICIEEN

7. les générateurs à basse fréquence

(Suite voir N° 1482)

DANS le dernier article, nous avons décrit les montages les plus simples à réaliser, capables, cependant, d'aider l'amateur dans ses vérifications de base et ses mesures élémentaires.

Pour répondre à d'autres objectifs plus ambitieux, en visant un peu plus haut, nous proposons, cette fois-ci la réalisation d'un générateur BF classique à variation continue, à pont de Wien, susceptible de satisfaire des exigences plus sévères.

La version décrite est à variation de résistance mais nous indiquerons la marche à suivre dans le cas d'une variation de capacité.

Il n'est cependant pas question de rivaliser avec les meilleures réalisations commerciales pour la présentation et, peut-être, la facilité d'utilisation. Il en est différemment pour ce qui est du coût à performances égales. Comme toujours, ce dernier argument séduira les amateurs, d'autant que, pour les plus adroits, une telle réalisation ne présentera pas de difficultés et constituera, nous l'espérons une agréable façon de meubler des loisirs d'hiver...

RAPPEL DU PRINCIPE DU GENERATEUR A PONT DE WIEN

Nous avons reproduit, sur la figure 1, le schéma de principe de cet oscillateur que nous avons déjà cité dans l'article précédent.

Il s'agit d'un amplificateur opérationnel à entrées différentielles dont l'une (entrée +) reçoit la tension réinjectée en phase, ce qui entraîne l'oscillation et l'autre (entrée -) sert à réguler l'amplitude par réaction négative.

Le circuit sélectif est situé dans la ligne de réaction positive et comprend essentiellement deux résistances R_p et R_s et deux condensateurs C_p et C_s montés comme il est indiqué sur la figure.

Le plus généralement $R_s = R_p = R$ et $C_p = C_s = C$, mais on peut envisager d'autres rapports de valeur différente permettant un fonctionnement également sûr.

La branche série présente une impédance Z_s telle que :

$$Z_s = R - \frac{\gamma}{C\omega}$$

Aux fréquences basses cette impédance est très élevée. Elle décroît au fur et à mesure que la fréquence augmente. A $f_0 = 1/2\pi RC$, sa valeur atteint $2R$. Au-delà, Z_s tend vers R .

La branche parallèle a une impédance :

$$Z_p = \frac{R(1 + \gamma RC \omega)}{1 + R^2 C^2 \omega^2}$$

Aux basses fréquences, la réactance de C a un effet négligeable et la valeur de l'impédance est pratiquement égale à R . Si l'on augmente la fréquence, la réactance de C diminue jusqu'à ce que sa valeur atteigne R pour f_0 ; dans ce cas, l'impédance Z_p est égale à $R/2$. Pour des fréquences croissantes au delà de f_0 , l'impédance tend vers 0.

Ces caractéristiques permettent de calculer le transfert de cette cellule à partir de la formule :

$$V_{\text{réinjectée}} = V_{\text{sortie}} \frac{Z_p}{Z_s + Z_p}$$

Le résultat de ce calcul montre une augmentation sensible de la transmission à la fréquence f_0 .

De la même façon, on observe une variation de phase telle que celle-ci s'annule pour f_0 .

Ces deux conditions se conjuguent pour assurer l'oscillation à la fréquence caractéristique

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

Le réglage d'amplitude se fait en diminuant le gain dans le support :

$$\frac{R_q + R_l}{R_l}$$

La résistance R_g est ajustable. On parfait l'automatisme de ce réglage en disposant en R_l une résistance non linéaire à coefficient positif de température telle qu'une lampe à filament de tungstène. Une autre solution aurait été d'utiliser une thermistance à coefficient négatif de température pour R_g mais cette disposition a l'inconvénient d'être trop sensible aux variations de température et la constante de temps de correction est trop longue pour une utilisation courante.

La figure 2 représente le schéma de l'oscillateur de base qui nous a servi à déterminer les valeurs précises du pont de Wien.

Ce montage est classique. Il

comporte un circuit intégré linéaire bien connu le μA 709, alimenté par des tensions symétriques de ± 15 V. On se reportera à l'article précédent qui indique les recommandations à suivre pour la réalisation de cet oscillateur. R_5 sert à doser le gain en liaison avec R_6 , R_7 et R_8 qui est une ampoule de 6 V (0,6 W) de feu arrière de bicyclette.

Afin de présenter au réseau RC une résistance aussi élevée que possible, nous avons disposé à l'entrée (+) de l'amplificateur un étage FET à « source follower » qui n'est autre qu'un abaisseur d'impédance non déphaseur.

La liaison entre le BC 245 et le circuit intégré s'opère à travers C_1 qui isole le continu afin d'éviter d'avoir à recourir à un système de compensation de polarisation qui risquerait d'introduire une dérive du point de fonctionnement.

Le circuit entouré d'un trait pointillé est entièrement contenu sur une carte imprimée de 90 x 35 mm dont les caractéristiques principales sont indiquées sur la figure 3.

Cet oscillateur peut être relié à un réseau en pont de Wien extérieur pour assurer une oscillation stable et sans distorsions entre 5 à 10 Hz et 200 kHz au moins.

Les éléments du réseau seront calculés à partir de la formule :

$$R = \frac{1}{6,28 f_0 C}$$

ou

$$C = \frac{1}{6,28 f_0 R}$$

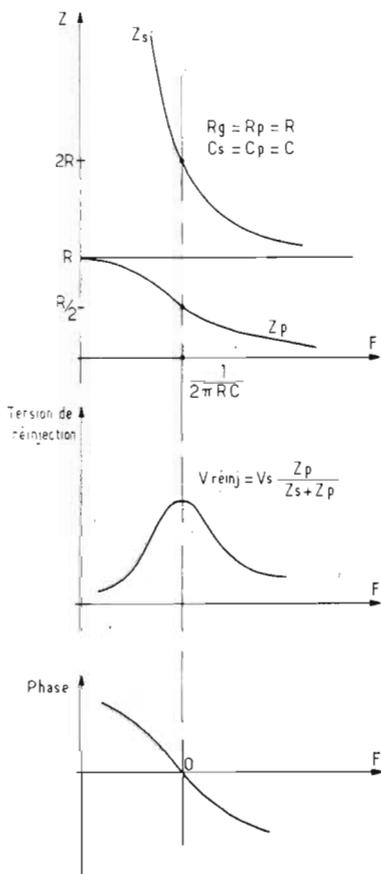
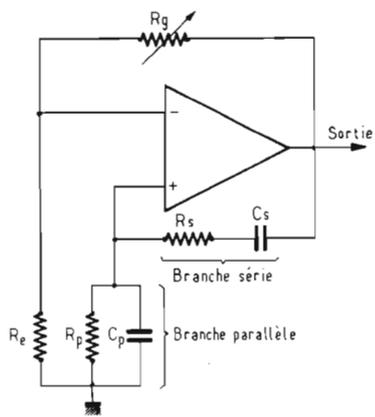


Fig. 1 - Oscillateur à pont de Wien.

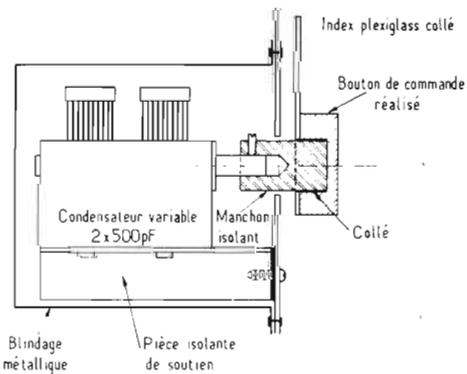


Fig. 4 - Montage d'un oscillateur à condensateur variable.

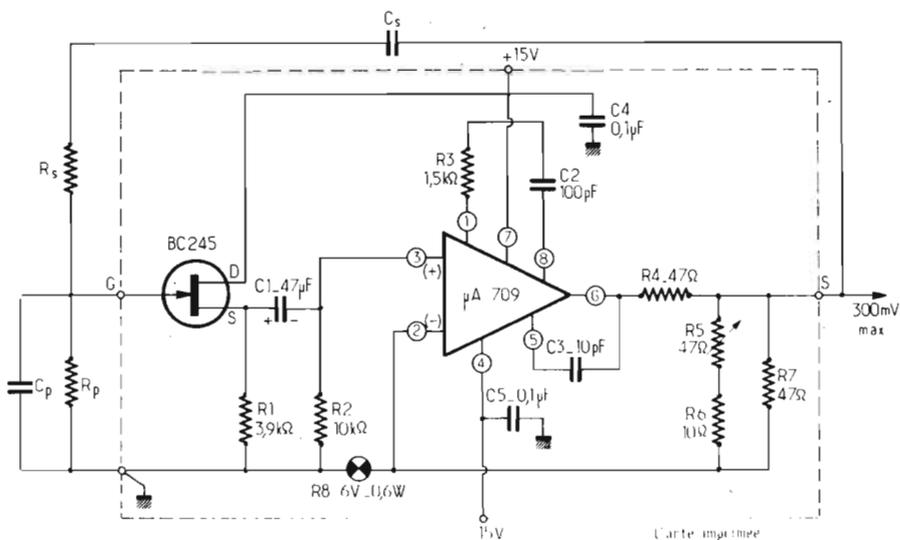


Fig. 2 - Montage expérimental d'oscillateur.

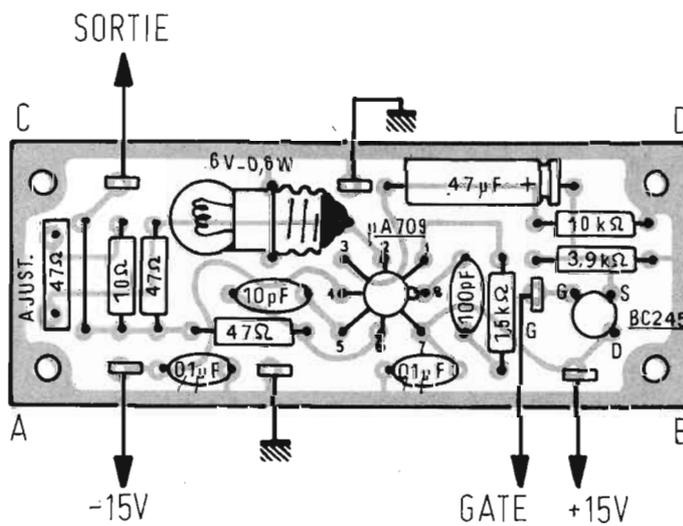


Fig. 3 - Carte imprimée d'oscillateur expérimental.

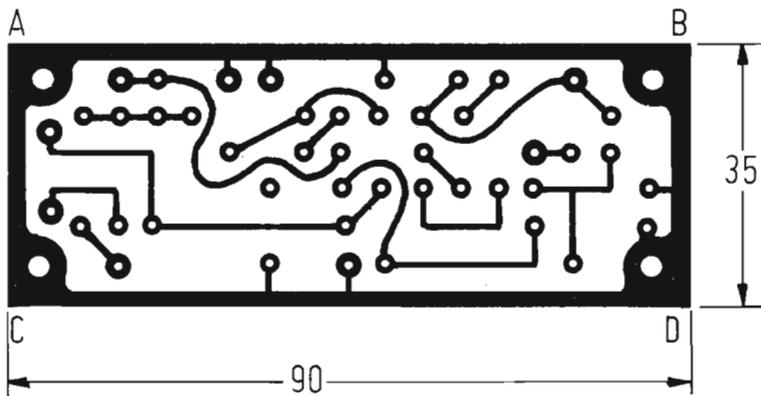


Fig. 3

Il est conseillé de prendre $C_{\min} \geq 50$ pF pour ne pas être gêné par les capacités parasites du montage.

Bien qu'expérimental, l'oscillateur de la figure 2 peut être « l'âme » d'un générateur dont la tension de sortie ne dépasserait pas 300 mV efficaces. On pourra l'utiliser avec profit pour la détermination précise des composants d'un générateur plus important.

OSCILLATEUR A VARIATION CONTINUE

On peut facilement adjoindre à l'oscillateur de la figure 2 des éléments variables de façon à rendre la fréquence continûment réglable entre deux limites pré-établies. Il faut alors disposer d'un condensateur variable à deux sections ou d'un potentiomètre double. Dans l'un et l'autre cas, il convient de définir le nombre de gammes et les fréquences limites de chacune d'elles.

Soient :

- m le nombre de gammes,
- n le rapport de la fréquence la plus élevée d'une gamme à sa fréquence la plus basse,
- F1, F2, etc. Fm + 1, les fréquences extrêmes de chacune des gammes couvertes :
- gamme 1 : de F1 à F2
- gamme 2 : de F2 à F3

— gamme m : de Fm à Fm + 1
Il vient :

$$n = F2/F1 = F3/F2 = \dots = Fm + 1/Fm$$

et :

$$F2 = nF1, F3 = nF2 = n^2F1, \dots$$

$$Fm + 1 = nFm = n^m F1 \text{ d'où :}$$

$$n = \sqrt[m]{\frac{Fm + 1}{F1}}$$

où F1 et Fm + 1 sont les fréquences extrêmes couvertes par le générateur. Par exemple, si l'on choisit une couverture globale de 10 Hz à 100 kHz en 4 gammes (m = 4) on aura :

$$\frac{Fm + 1}{F1} = \frac{100\,000}{10} = 10^4$$

d'où n = 10, et la couverture est définie de la façon suivante :

- gamme 1 : 10 Hz à 100 Hz
- gamme 2 : 100 Hz à 1 kHz
- gamme 3 : 1 kHz à 10 kHz
- gamme 4 : 10 kHz à 100 kHz

Pour une même couverture, avec m = 5, on aurait obtenu :

$$n = \sqrt[5]{10^4} = 6,31 \text{ d'où :}$$

- gamme 1 : 10 Hz à 63,1 Hz
- gamme 2 : 63,1 Hz à 398 Hz
- gamme 3 : 398 Hz à 2,5 kHz

- gamme 4 : 2,5 kHz à 15,8 kHz
- gamme 5 : 15,8 kHz à 100 kHz

Dans la pratique courante, il est conseillé d'utiliser une valeur de n au moins 20 % plus grande que celle donnée par le calcul pour assurer un bon recouvrement. Ainsi, on pourrait réaliser pratiquement un générateur ayant les 5 gammes suivantes :

- gamme 1 : 10 Hz à 80 Hz
- gamme 2 : 60 Hz à 480 Hz
- gamme 3 : 400 Hz à 3,2 kHz
- gamme 4 : 2,5 kHz à 20 kHz
- gamme 5 : 16 kHz à 100 kHz

OSCILLATEUR A CONDENSATEUR VARIABLE

Imaginons que la variation de fréquence soit obtenue en même temps que la rotation d'un condensateur variable double ; le modèle le plus répandu ayant une variation de capacité de 490 pF par cage.

Les capacités de câblage et le trimer ajustable amènent la capacité minimale à 35 pF (ce qui est un peu faible compte tenu de ce que nous avons indiqué plus haut). Le rapport des capacités est :

$$\frac{C_{\max}}{C_{\min}} = \frac{490 + 35}{35} = \frac{525}{35} = 15$$

La variation de fréquence d'oscillation est inversement proportionnelle à la variation de capacité, de sorte que lorsque le condensateur varie de 525 pF à 35 pF, la fréquence croît dans le rapport de 1 à 15. Dans des conditions moins idéales mais peut-être plus réalistes, la variation totale de capacité aurait été de 490 + 50 = 540 pF à 50 pF et le rapport des fréquences de 1 à 10,8.

Soit à réaliser un générateur de 10 Hz à 100 kHz en 4 gammes (m = 4) avec un rapport de fréquences n compris entre 10 et 15 (ce qui est compatible avec ce que nous avons estimé). On pourra avoir :

- gamme 1 : 10 Hz à (10 à 150 Hz)
- gamme 2 : 100 Hz à (1 à 1,5 kHz)
- gamme 3 : 1 kHz à (10 à 15 kHz)
- gamme 4 : 10 kHz à (100 à 150 kHz)

(si le nombre de gammes avait été limité à 3, le rapport aurait dû être de 21 ce qui n'est pas dans les possibilités du matériel envisagé).

On complètera la détermination des éléments de l'oscillateur par le calcul des résistances : gamme 1 : 20 MΩ ; gamme 2 : 2 MΩ ; gamme 3 : 200 kΩ et gamme 4 : 20 kΩ.

L'oscillateur à condensateur variable présente deux avantages :

- l'identité des capacités de chaque cage pour une position angulaire donnée qui assure à l'oscillateur un fonctionnement stable,
- le rapport élevé des fréquences limites dans chaque gamme (jusqu'à 15) qui permet de limiter le nombre de gammes.

Cependant, on peut noter de nombreux inconvénients :

- la constitution courante des C.V. doubles est telle que l'électrode commune aux deux condensateurs est l'armature métallique habituellement réunie à la masse sur les radio récepteurs. Il faut ici l'isoler puisque cette électrode est réunie au « gate » du FET d'entrée. Ceci oblige à réaliser un blindage important pour toute la partie oscillateur, d'autant que la résistance est élevée sur la gamme à la fréquence la plus basse, ce qui facilite l'induc-

tion parasite par couplage capacitif extérieur,

- la rotation ne s'effectue que sur 180°. Pour obtenir plus il faut passer par l'intermédiaire d'un démultiplicateur,
- le condensateur risque d'être microphonique et sa suspension doit être amortie.

Nous indiquons sur la figure 4 le montage mécanique préconisé pour un tel oscillateur. Le condensateur variable est fixé sur une pièce isolante en bakélite épaisse ou en araldite vissée sur le panneau avant de l'appareil. On veillera à ce que l'axe soit bien isolé de l'effet de main. Pour cela, on réalisera un manchon isolant assez long que l'on collera dans un bouton de commande réalisé.

Le blindage sera construit en tôle mince étamée (boîte à thé, par exemple). Il contiendra également la carte imprimée d'oscillateur et le commutateur de gammes.

OSCILLATEUR A RESISTANCES VARIABLES

On peut obtenir une variation continue en faisant varier simultanément et d'une même quantité les résistances Rs et Rp, tout en utilisant les valeurs fixes commutables des condensateurs pour définir les gammes.

Comme les potentiomètres commerciaux courants ont une mauvaise définition de leur résistance résiduelle près de la valeur minimale, il convient de monter en série avec chaque résistance variable un élément fixe de 10 % de la valeur maximale, par exemple.

La figure 5 A montre la courbe théorique d'un potentiomètre parfaitement linéaire de 10 kΩ en

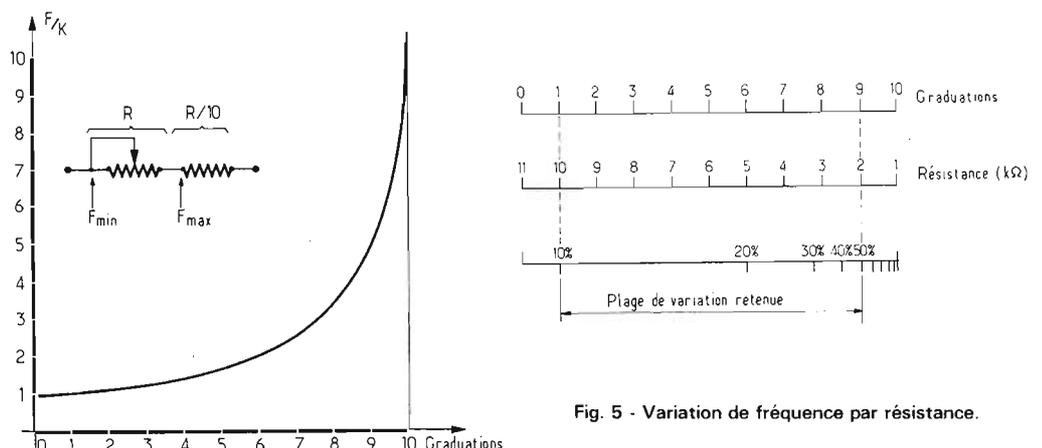


Fig. 5 - Variation de fréquence par résistance.

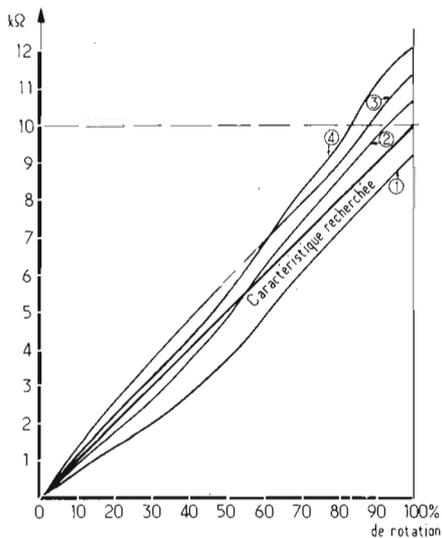


Fig. 6 - Linéarité de quelques potentiomètres du commerce.

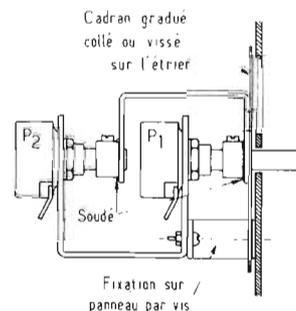
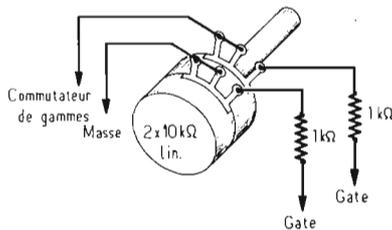


Fig. 7 - Montage d'un système de variation de fréquence par résistance : a) par potentiomètre double ; b) par potentiomètres simples couplés mécaniquement.

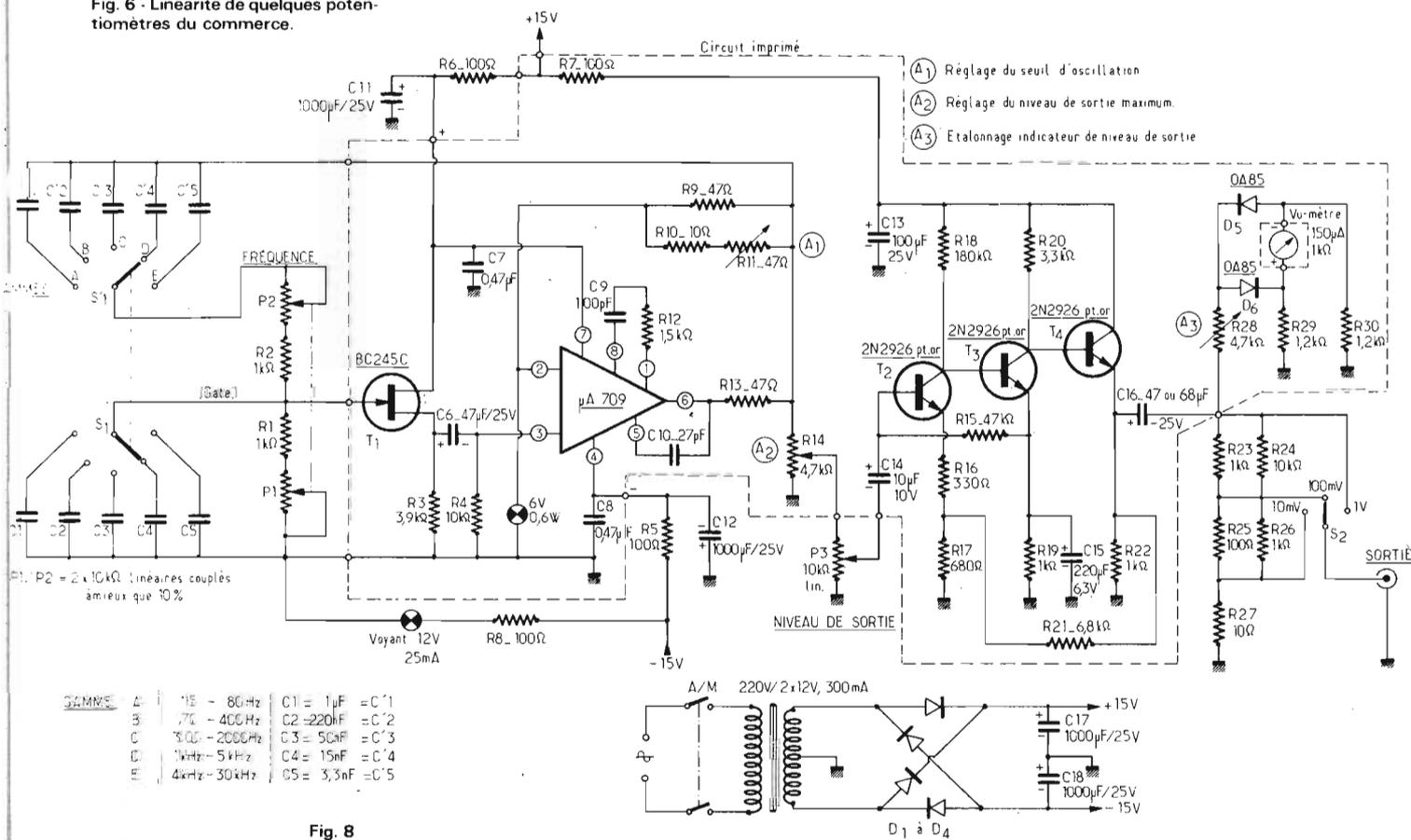


Fig. 8

série avec une résistance de 1 kΩ.

On a gradué de 0 à 10 la courbe totale du potentiomètre. A chaque division correspond donc une variation de 1 kΩ exactement. Dans ces conditions la fréquence variera dans le rapport de 1 à 10, alors que la valeur totale de la résistance varie de 11 kΩ à 1 kΩ.

La courbe représentée est loin d'être linéaire puisqu'il faut tourner le potentiomètre à 90 % de sa rotation totale pour n'obtenir que 50 % de variation de fréquence,

les 50 % restants étant assurés par les 10 % de la course finale du bouton de réglage.

Nous avons montré sur le diagramme de la figure 5 B l'équivalence résistance/pourcentage de variation de fréquence : il paraît sage de limiter à 5 le rapport des fréquences extrêmes sous peine d'avoir un haut de gamme presque illisible ; cela représente cependant 80 % de la rotation totale du potentiomètre.

Bien entendu, toutes ces consi-

dérations sont assez théoriques. Dans la pratique courante, un potentiomètre ne saurait être parfaitement linéaire. Les courbes expérimentales de la figure 6 montrent que cette linéarité n'est réalisée que de - 7 % à + 20 % pour quatre échantillons choisis au hasard.

En fait ce qui est le plus important, c'est d'obtenir deux courbes aussi identiques que possible avec un potentiomètre double ou deux potentiomètres simples que l'on

aura mécaniquement couplés. Ainsi, sur l'exemple de la figure 6 on pourrait admettre un couplage entre les échantillons 2 et 3 ou 4 mais certainement pas entre 1 et chacun des trois autres.

Il existe sur le marché des potentiomètres bobinés, doubles de précision assez chers. D'autres modèles plus économiques à piste moulée pourront s'avérer satisfaisants s'ils sont à 10 %. Le câblage des sorties est représenté sur la figure 7 A.

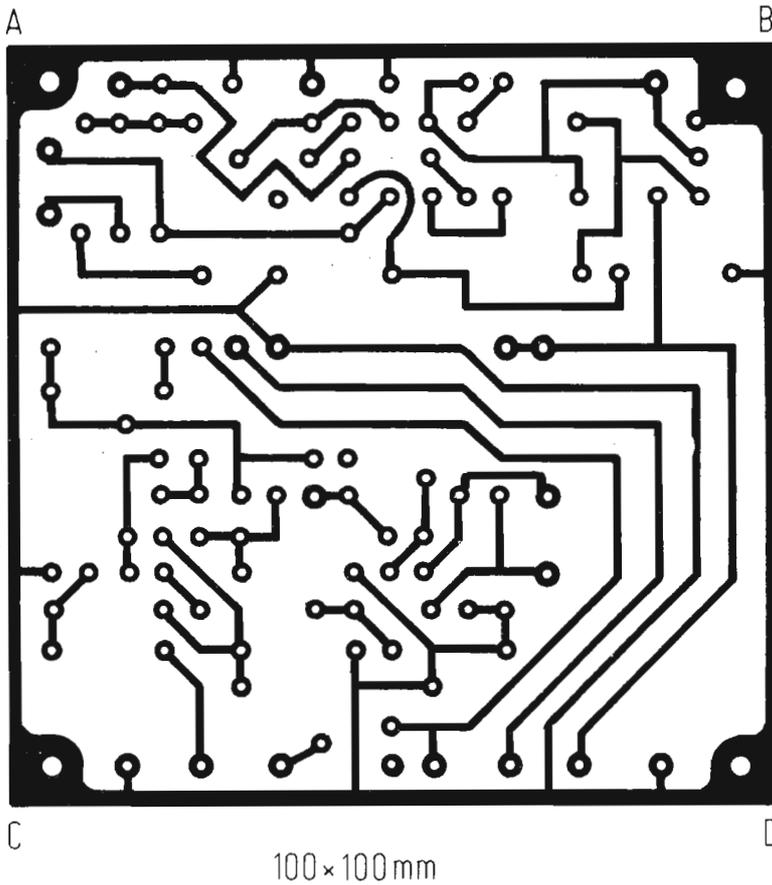
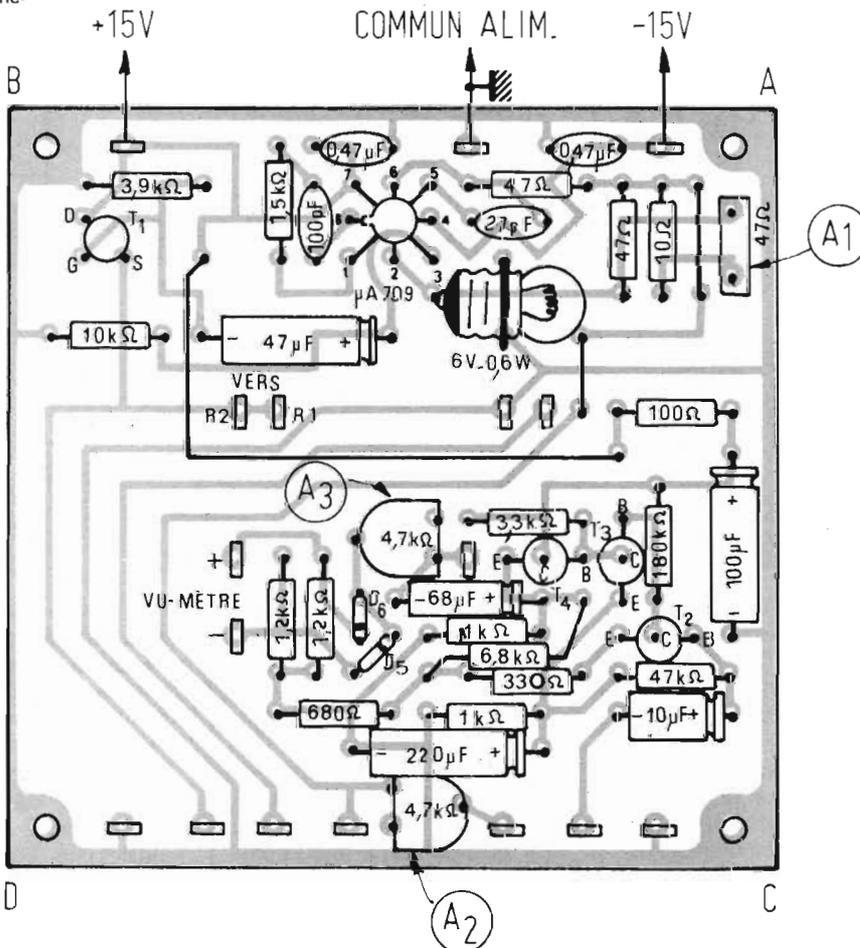


Fig. 9 - Carte imprimée du générateur RC.



Dans le cas où l'on préfère choisir, après essai, 2 potentiomètres séparés aussi identiques que possible (on mesure les résistances avec un bon multimètre branché en ohmmètre), il sera possible de réaliser un couplage simple par étriers comme indiqué sur la figure 7 B. Nous laissons au lecteur le soin d'imaginer des solutions de couplage plus astucieuses.

REALISATION D'UN GENERATEUR RC COMPLET

Nous avons traité le cas d'un générateur classique couvrant de 15 Hz à 30 kHz qui assurera des fonctions courantes dans le laboratoire de l'amateur.

Le schéma est représenté sur la figure 8. On y voit un oscillateur du même type que celui du montage expérimental de la figure 2, à quelques variantes près. La variation de fréquence est assurée par un potentiomètre double de $2 \times 10 \text{ k}\Omega$ linéaire (10 %) à pistes moulées. Chaque piste est montée en série avec une résistance de butée de $1 \text{ k}\Omega$, 5 % (R1 et R2).

La commutation des cinq gammes se fait par le choix de deux groupes de cinq condensateurs. On prendra ces condensateurs de préférence dans une série de précision (polystyrène par exemple) à 1 ou 2 %.

Le réglage A1 du seuil d'oscillation se fait en agissant sur le gain de l'amplificateur différentiel (dosage de la réaction négative) de façon à obtenir une tension efficace de 300 mV environ à la jonction de R13 et R14. Dans ces conditions, la distorsion reste faible ($\leq 0,2 \%$) et la tension de sortie demeure constante à 1 dB près sur toute l'étendue de la couverture en fréquence.

La sortie de l'oscillateur est reliée à un amplificateur de sortie constitué de trois étages T2, T3 et T4 en liaison directe. L'amplification de 20 dB est assurée par T2 et T3. La base de T2 est réunie à l'émetteur de T3 par la résistance de polarisation R15, ce qui confère à cet amplificateur une très bonne stabilité. L'étage de sortie T4 est un classique abaisseur d'impédance à émetteur follower. Une contre-réaction aperiodique globale entre la sortie et une prise aux 2/3 sur l'émetteur de T2 assure une très faible distorsion et un gain stable à cet amplificateur pour des niveaux de sortie jusqu'à 3 V eff au moins.

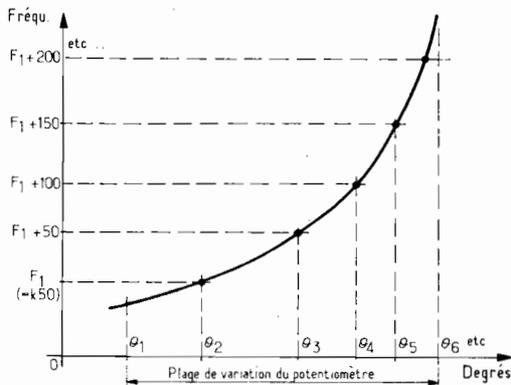
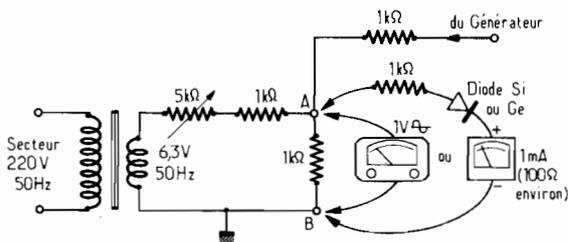
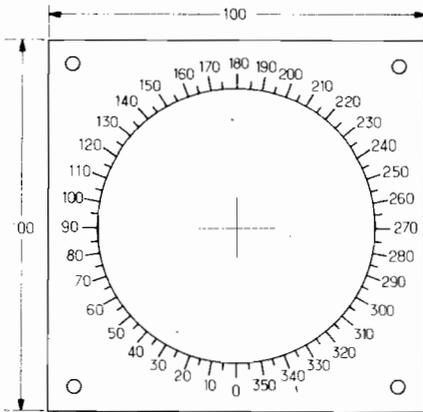


Fig. 12 - Étalonnage du générateur.

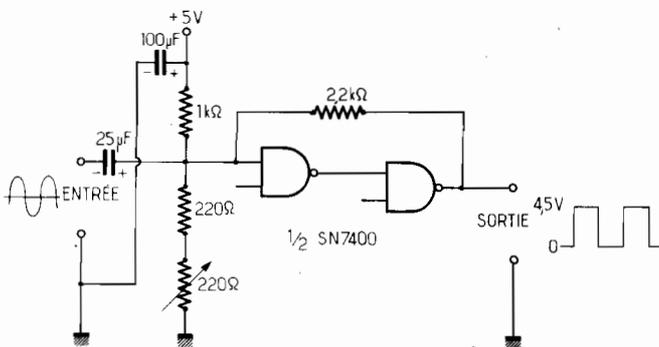


Fig. 13 - Circuit de rectangularisation d'un signal sinusoïdal symétrique.

tre digital, car la lecture est immédiate et il suffit simplement de transcrire les indications relevées. L'amateur qui dispose d'un tel appareil (que nous décrirons en son temps) ou qui peut s'en faire prêter un aura résolu son problème d'étalonnage.

Une autre méthode consiste à comparer l'appareil à étalonner à un appareil commercial précis. Cette méthode est assez facile à la condition que l'on apporte beaucoup de soin dans la comparaison des fréquences pour ne pas « mélanger » des combinaisons harmoniques indésirables. On peut utiliser un oscilloscope pour obtenir des battements zéro (Lissajous) ou même un amplificateur BF à large bande. Dans ce dernier cas, on attaquera une même entrée par les deux générateurs avec des résistances série de 1 kΩ et une résistance commune de même valeur entre l'entrée et la masse (l'adjonction d'une diode de signal en parallèle sur la résistance commune peut, à forts niveaux, favoriser le mélange des deux fréquences.

La dernière méthode fait appel à des moyens réduits : elle est donc à la portée de la plupart des amateurs, mais elle demande un soin attentif. On utilisera les deux accessoires présentés sur la figure 12 :

- un cadran en carton de 100 x 100 mm évidé au centre d'un trou de 80 mm de diamètre et au bord duquel sont portées des graduations angulaires de 0 à 360°, tous les 5°, comme indiqué sur la figure ; ce cadran sera fixé au point d'attache des quatre entretoises de maintien du circuit imprimé sur le panneau avant,

- un dispositif de comparaison entre le secteur 50 Hz et le générateur composé d'un transformateur 220 V/6,3 V, de trois résistances de 1 kΩ et d'une résistance ajustable de 5 000 kΩ.

La mesure se fera entre A et B sur un milliampèremètre de 1 mA (éventuellement le vu-mètre shunté par le 1/8^e de sa résistance interne), en série avec une résistance de 1 kΩ et une diode, ou au moyen d'un multimètre branché en voltmètre alternatif (sensibilité 1 V eff environ).

Lorsqu'il existera un rapport harmonique entre la fréquence du générateur et celle du secteur (très stable), l'aiguille de l'appareil de mesure indiquera, par des mouvements lents, le battement des deux signaux.

Avec un peu d'adresse, en dosant les niveaux, on pourra obte-

nir des battements entre 25 et 500 Hz. Ces opérations permettront de situer les points 25 et 50 Hz sur la gamme A, de 100 à 400 ou 450 Hz (tous les 50 Hz) sur la gamme B, enfin le début de la gamme C.

En se servant des résultats obtenus sur la gamme B, on tracera sur papier millimétré avec le plus de soin possible, une courbe de la fréquence en fonction de l'angle (voir figure). Cette courbe servira de référence pour tracer les courbes d'étalonnage des autres gammes. Pour cela, on utilisera la formule :

$$F_x \text{ (en Hz)} = \frac{220 F \text{ (en Hz)}}{C_x \text{ (en nF)}}$$

F_x est la fréquence à déterminer pour un angle donné θ

C_x la capacité de la gamme correspondante,

F la fréquence de la gamme B à l'angle θ

Une dizaine de points devraient suffire pour définir l'étalonnage d'une gamme. On vérifiera que le calcul des fréquences de la gamme A (25 et 50 Hz) et du début de la gamme C donne des valeurs cohérentes avec la présence de battements avec le secteur.

Lorsque l'on aura tracé les cinq courbes d'étalonnage et que l'on aura soigneusement repéré les angles des butées du potentiomètre, on démontera la face avant et l'on procédera à son marquage. Une solution plus facile mais peut-être moins esthétique consiste à utiliser une petite plaque de cartoline de 100 x 100 mm collée ou fixée après marquage.

LES SIGNAUX RECTANGULAIRES

Nous ne pourrions pas clore le chapitre des générateurs BF sans faire une allusion à la transformation des signaux sinusoïdaux en signaux rectangulaires de même récurrence, d'autant que ce résultat est facilement obtenu par une simple bascule de Schmitt.

Nous préconisons l'emploi d'un circuit intégré logique SN7400 composé de quatre portes Nand dont deux seulement seront utilisées. Le schéma de la figure 13 correspond à une application donnée par le fabricant de ce circuit. Le basculement s'opère pour une tension d'entrée de l'ordre de 300 mV eff seulement avec des temps de transition extrêmement brefs.

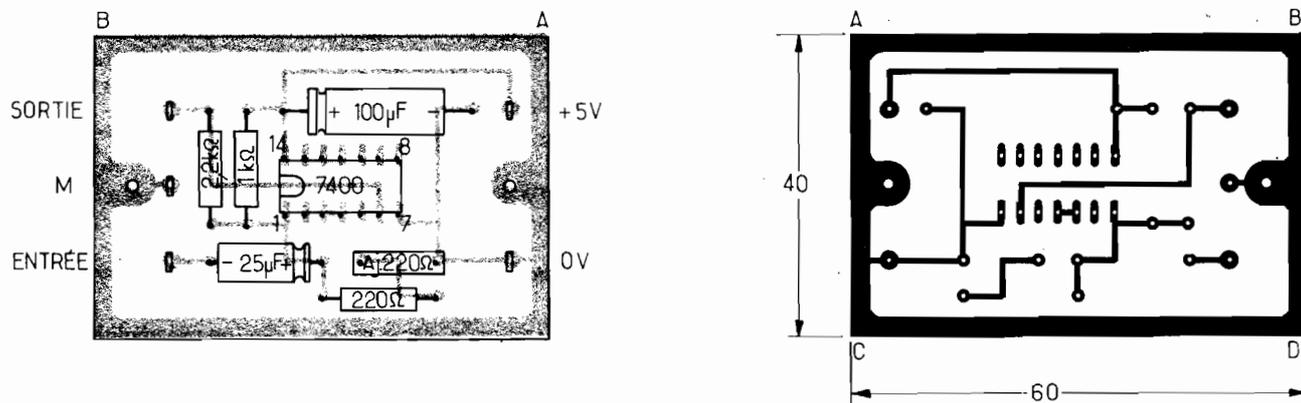


Fig. 14 - Réalisation pratique du circuit de la figure 13.

TABLEAU 15
QUELQUES GENERATEURS BF COMMERCIAUX

MARQUE	Ref.	Bande	Sinus + Carré	Z Sortie	V _{max} eff.	Prix	Remarques
CENTRAD	BF 163 k	10 Hz à 1 MHz	oui	150 ou 600 Ω	10 V	B	
"	BF 264	10 Hz à 1 MHz	oui	50 et 150 Ω	10 V	C	
"	BF 465 k	20 Hz à 200 kHz	oui	150 Ω	2 V	B	
"	BF 466 k	10 Hz à 1 MHz	oui	150/600 Ω	10 V	C	Sortie TTL
VOC	Minivoc 2	10 Hz à 100 kHz	oui	600 Ω	6 V	B	D = 0,3 %
HEATHKIT	IG 72 E	10 Hz à 100 kHz	Sinus	600 Ω	1 V/10 V	A (kit)	D ≤ 0,1 %
"	IG 18	1 Hz à 100 kHz	oui	600 Ω/52 Ω	1 V et 10 V	B (kit)	D ≤ 0,1 %
EURELCO	AFSQ 10	10 Hz à 1 MHz	oui	50 Ω	10 V	C	D = 0,1 %
REDELEC	OR 778	15 Hz à 250 kHz	oui		6 V	B	D = 0,1 %
MABEL	ME 117	10 Hz à 250 kHz	oui		6 V	A	
	MK 009	10 Hz à 1 MHz	oui			B	Alim. piles et secteur

A Jusqu'à 500 F
B 500 à 1 000 F
C plus de 1 000 F

On utilisera la résistance de 220 Ω ajustable pour régler la largeur des créneaux à exactement la moitié de la valeur de la période.

La sortie positive de 4,5 V crête est compatible avec une logique TTL. On veillera à ce que la tension d'alimentation soit bien égale (et surtout ne dépasse pas...) 5 V, ce qu'on pourra obtenir par une stabilisation à diode Zener non prévue sur le schéma.

On peut voir sur la figure 14 les caractéristiques de la carte imprimée correspondante. Ses dimensions très réduites devraient permettre de loger ce circuit dans un générateur existant pour en étendre les performances.

J.C.

(à suivre)

NOUVELLE ADRESSE

tradelec

9, Av. de la porte de la Plaine
75015 PARIS tél.: 531.51.37

Documentation sur demande...

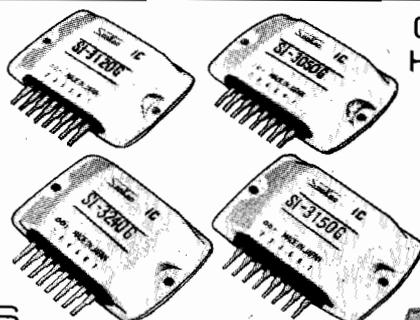
TRANSDUKTOR
TRANSFORMATEURS
TOROÏDAUX

dtp

C.I. AMPLIFICATEURS
HYBRIDES SANKEN

4 MODELES

10 W - 20 W - 30 W - 40 W



SANKEN

C.I. Régulateurs de Tension
et de Puissance Hybrides

