

Les SECRETS DE LA RADIO ET DE LA TÉLÉVISION dévoilés aux débutants

N° 141

LA CONSTRUCTION ET LE MONTAGE MODERNES RADIO - TV - ÉLECTRONIQUE

CARACTÉRISTIQUES PRATIQUES DES TRANSFORMATEURS B. F.

NOUS avons récemment étudié les propriétés et les caractéristiques générales des transformateurs de sortie ou de modulation de différentes formes; il existe encore un type de transformateur basse fréquence de la même catégorie, mais de type un peu particulier, qui est le transformateur de ligne.

LE TRANSFORMATEUR DE LIGNE

Ce n'est pas, à proprement parler, un transformateur de sortie sous la forme habituelle, puisqu'il n'est pas relié de la manière classique à l'étage de sortie de l'amplificateur. Cependant, les indications données précédemment s'appliquent encore à cet élément, aussi bien qu'aux modèles habituels et, en particulier, le rapport du nombre des spires du primaire et du secondaire est déterminé de la même manière. La réponse en fréquence et le déphasage dépendent des mêmes facteurs, et, en particulier, des inductances de primaire et de fuite.

Les transformateurs de ligne fonctionnent habituellement avec des niveaux de puissance assez faibles, de l'ordre de quelques milliwatts, de sorte qu'il peut être utile de les blinder, afin de les protéger de l'effet des champs magnétiques parasites.

Il est également parfois nécessaire d'équilibrer la ligne par rapport à la masse. Cela signifie que la capacité d'une des extrémités du primaire par rapport à la masse, doit être égale à celle de l'autre et, de même, la capacité d'une extrémité du secondaire par rapport à la masse doit être égale à celle de l'autre. Ce résultat est atteint en disposant symétriquement les bobines, comme on le voit, par exemple, sur la figure 1.

LES TRANSFORMATEURS DE LIAISON

Le rôle du transformateur d'entrée placé avant le premier étage d'un amplificateur consiste toujours, comme nous l'avons déjà noté, à coupler une source de tension à fréquence audible, telle qu'un microphone, un pick-up phono-

graphique ou une ligne téléphonique, à l'électrode d'entrée du premier élément amplificateur, qui peut être, par exemple, la grille d'un tube à vide.

Le transformateur de liaison proprement dit doit relier la sortie d'un élément amplificateur à l'entrée de l'élément suivant, par exemple, la plaque d'un tube électronique à la grille du suivant. Chaque

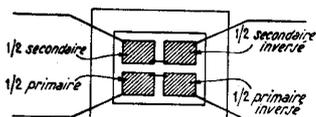


FIG. 1

type utilisé doit présenter une caractéristique de réponse en fréquence bien déterminée, et doit fournir une amplification en tension aussi élevée que possible; ainsi que nous l'avons déjà noté, d'ailleurs, les transformateurs de liaison de ce genre sont beaucoup moins utilisés qu'autrefois.

Quel que soit le type de transformateur, la charge est formée par le circuit d'entrée, par exemple, le circuit de grille d'un tube à vide, et son impédance est ainsi très élevée, fréquemment de l'ordre du mégohm. Elle n'est quelquefois pas supérieure à celle de la capacité d'entrée du tube, bien que parfois une résistance de l'ordre de 100.000 à 500.000 ohms soit placée aux bornes du secondaire; avec une telle charge à haute impédance, la capacité de l'enroulement secondaire n'est pas négligeable. La capacité de l'enroulement secondaire et la capacité de la charge conditionnent ainsi de façon essentielle la réponse en haute fréquence et le rapport des nombres de tours des enroulements du transformateur.

LES VARIATIONS DES CARACTÉRISTIQUES DU TRANSFORMATEUR DE LIAISON

Les caractéristiques en fréquence pour les fréquences basses moyennes et médium, peuvent être étudiées de la même manière que pour les autres éléments précédemment indiqués. S'il n'y a pas de

résistance de charge dans le secondaire, les équations à considérer deviennent plus simples; ainsi la relation déjà indiquée précédemment pourra se mettre sous la forme :

$$V_2 = \frac{N_s}{N_p} \times V_1 \times \frac{V_o}{r_a + r_o}$$

Dans laquelle, V_2 représente la tension de sortie, N_s et N_p les nombres de tours du secondaire et du primaire, V_1 la tension d'entrée, r_o et r_a , les résistances capacitive et de charge.

Pour les fréquences élevées, le schéma représentatif du circuit équivalent est indiqué par la figure 2. Si nous considérons le cas où il n'y a pas de charge de résistance secondaire, les circuits équivalents se simplifient, comme il est indiqué sur la figure 3, et on obtient, on le voit, un circuit résonant simple.

On peut étudier les caractéristiques de ce circuit en traçant une famille de courbes indiquant le rapport de la tension par rapport à la fréquence.

Considérons maintenant le cas normal, dans lequel une résistance de charge est placée aux bornes du secondaire, combinée avec la capa-

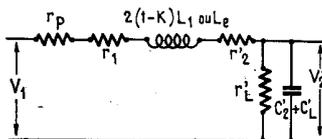


FIG. 2

cité d'entrée du tube et les capacités des enroulements secondaires. Le circuit est équivalent et alors représenté encore par le schéma de la figure 2. La résistance de charge réduit la pointe de résonance de fuite; en même temps, elle abaisse la tension de sortie sur la gamme de fréquences médium. Cependant, l'effet est plus prononcé dans la région de la résonance de fuite, et il en résulte ainsi une sorte d'aplatissement général de la caractéristique de réponse.

Le rapport du nombre des spires du primaire et du secondaire dans un transformateur d'entrée ou de liaison est déterminé par la capacité secondaire, c'est-à-dire par la

somme de la capacité de l'enroulement secondaire, C_s , et de la capacité d'entrée du tube électronique, par exemple, C_L . Appelons C cette capacité totale, et supposons que sa valeur résultante sur le primaire soit C' ; la valeur convenable de cette capacité C' est trouvée d'après les nécessités de la réponse en fréquence indiquée plus haut et, dans ces conditions, les éléments doivent satisfaire à la relation :

$$\frac{N_s}{N_p} = \sqrt{\frac{C'}{C}}$$

La capacité répartie et par rapport à la masse de l'enroulement secondaire ne peut être calculée avec précision avant que la construction du transformateur soit terminée. En première approximation, et pour déterminer le rapport du nombre pratique de tours, on peut se baser sur une valeur de 50 picofarads. La capacité d'entrée d'un tube, par exemple, est donnée par la formule :

$$C_L = C_{st} + C_{sp} (1 + \mu)$$

Dans laquelle C_{st} est la capacité statique entre la grille et le filament, C_{sp} la capacité statique entre la grille et la plaque, et μ l'amplification efficace du tube.

Supposons, par exemple, que toutes les capacités secondaires soient au total de 100 picofarads et que la réponse sur les fréquences élevées du transformateur nous ait indiqué une fréquence de résonance de l'ordre de 10 000 Hz; le rapport élévateur peut être obtenu avec des enroulements présentant un rapport de 1 à 4 pour un générateur de l'ordre de 10 000 ohms, de 1 à 17,8 pour un générateur de 500 ohms, tel qu'une ligne de transmission. Avec un générateur de 100 ohms, tel qu'un microphone au charbon, il faudrait un rapport de 1 à 40, tandis qu'avec un microphone à ruban, d'une résistance de 0,2 ohm, il faudrait un rapport de 1 à 890.

LE BLINDAGE UTILE

Les transformateurs d'entrée et de liaison fonctionnent souvent avec des niveaux de tension très

faibles. Comme nous l'avons déjà indiqué précédemment, les tensions induites dans les enroulements par les champs magnétiques ambiants peuvent être aussi élevées, sinon davantage que le voltage du signal utile. Ces champs de dispersion parasites sont produits par les transformateurs d'alimentation voisins du bobinage de filtrage, des circuits en forme de boucles, parcourus par des courants alternatifs de forte intensité, des générateurs, des moteurs, etc... Un ronflement à la fréquence même du champ parasite peut être introduit dans l'amplificateur musical.

L'élimination d'un tel ronflement doit, de préférence, être assurée à la source. Comme nous l'avons déjà noté, la densité du flux dans les transformateurs et les bobines d'arrêt peut être réduite par une disposition convenable, l'utilisation d'entrefer dans les bobinages, de carters de blindage autour des enroulements, ou en torsadant les conducteurs qui transportent des courants de forte intensité.

En écartant le transformateur d'entrée ou de liaison aussi loin que possible de la source de perturbation, et en l'orientant de telle sorte que son bobinage se trouve à angle droit avec le bobinage de l'élément perturbateur, on obtient souvent des résultats appréciables dans un amplificateur.

Les transformateurs d'entrée sont souvent réalisés avec des noyaux magnétiques à deux branches, comme nous l'avons déjà également signalé, une moitié du primaire et une moitié du secondaire étant placées sur chaque bras. Les deux moitiés de chaque enroulement sont reliées en série, de telle sorte qu'ils ajoutent leurs flux dans le noyau, mais les soustraient pour des champs extérieurs. Une telle construction anti-ronflement est très efficace, si le champ extérieur est uniforme, car elle agit alors également sur les deux parties du transformateur, et on peut obtenir une réduction de l'ordre de 40 dB à l'entrée.

Le blindage du transformateur d'entrée ou de liaison est également très efficace dans ce cas. Un boîtier d'alliage de nickel avec un couvercle bien serré permet de réduire le niveau de l'ordre de 30 dB. Deux blindages d'alliage de nickel, l'un à l'intérieur de l'autre, séparés par un blindage analogue en cuivre, pourrait même réduire le niveau de 60 dB environ. Trois blindages en nickel, et deux blindages en cuivre assureraient une réduction de 90 dB; de tels blindages en série sont possibles, en principe, mais évidemment rarement employés dans les cas courants.

LE TRANSFORMATEUR DRIVER

En classe B, le montage de sortie classique à transformateur exige l'emploi d'un étage auxiliaire d'am-

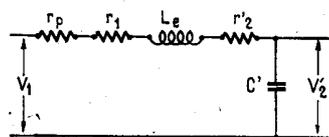


Fig. 3

plification appelé **étage driver** ou de pré-amplification ou encore, étage excitateur. Le transformateur driver a ainsi pour but de coupler les circuits de plaque du tube d'attaque aux grilles de l'étage d'amplification en classe B. Le rôle de l'étage driver consiste à fournir au circuit de grille de l'étage de sortie des pointes de tension positives suffisantes pour son fonctionnement de sorte que cet étage driver est analogue au transformateur de sortie habituel, mais il doit posséder des propriétés additionnelles caractéristiques, qui entraînent des particularités de construction.

La charge secondaire sur un transformateur driver varie sur une assez large gamme durant chaque alternance, à partir d'une résistance très élevée, lorsque les deux grilles du tube sont négatives; jusqu'à une faible résistance, lorsque ces grilles sont positives. Le rapport du nombre de spires du transformateur doit ainsi être choisi, de telle sorte que ce changement de la résistance de charge n'ait pas d'effet important sur la distorsion produite par le tube d'excitation, et cette condition est satisfaite en utilisant un rapport abaisseur de la tension. La valeur du rapport de nombre de tours doit être déterminée en étudiant un compromis entre la distorsion et la puissance d'excitation.

La réponse en fréquence dépend des mêmes facteurs que pour le transformateur de sortie, c'est-à-dire de l'inductance primaire pour les fréquences basses, et de l'inductance de fuite pour les fréquences élevées. Il y a pourtant une différence, puisque la charge du transformateur driver n'a pas une résistance constante, mais varie durant le cycle de fonctionnement. L'inductance primaire doit être assez élevée pour assurer la réponse dé-

sirée sur des fréquences basses, lorsque la résistance de charge instantanée est très grande. L'inductance de fuite doit être assez basse; par contre, pour assurer la réponse en fréquence désirée, lorsque la résistance de charge correspond au rapport entre la variation de la tension de pointe de la grille et la variation de l'intensité de pointe du courant de grille.

La réactance de fuite dans un transformateur driver est une réactance disposée en série avec les grilles des tubes de l'étage monté en classe B; il en résulte une distorsion de la forme de la tension de grille pour les fréquences les plus élevées. La gamme de fonctionnement d'un transformateur driver sur les fréquences élevées est ainsi limitée par la distorsion, plutôt que par la variation de la tension secondaire.

La fuite entre le primaire et le secondaire doit donc être maintenue à un valeur minimale. Il est également important que chaque moitié du secondaire soit couplée de la même manière avec le primaire, sans quoi la tension secondaire pour les fréquences élevées ne peut être la même pour les deux alternances, ce qui produit des harmoniques pairs du signal de tension de grille.

Les conditions permettant d'obtenir une faible fuite et des couplages égaux sont réalisées, par exemple, en utilisant la disposition des bobinages indiqués sur la figure 4. Les capacités des enroulements et la capacité d'entrée des tubes ont, en réalité, une influence très faible sur la réponse en fréquence ou la distorsion. Cependant, il peut se produire des résonances avec la réactance de fuite pour des fréquences supra-audibles, ce qui détermine des oscillations parasites de l'étage en classe B. De telles oscillations ne peuvent être supprimées au moyen d'une résistance de grille en série, sans augmenter la distorsion. Il est donc désirable de placer en shunt une petite capacité, à partir de la grille de chaque tube en classe B reliée à la masse.

DONNEES GENERALES DE CONSTRUCTION DES TRANSFORMATEURS BF

Avant d'indiquer des méthodes simples et pratiques d'établissement des transformateurs BF et, en particulier, des éléments de sortie, il convient d'étudier rapidement leurs caractéristiques générales, et leurs dispositions, en quelque sorte, « mécaniques ».

Le premier travail à exécuter lorsqu'on veut étudier ou établir un transformateur BF, consiste à étudier un schéma des circuits à relier avec les valeurs du générateur et de l'impédance de charge, le courant continu qui doit traverser chaque enroulement, et les autres données utiles. Les constantes désirées du transformateur, telles que le rapport du nombre de tours, l'inductance primaire, l'inductance de fuite, la capacité du secondaire, les résistances des enroulements, la

résistance de fuite du circuit magnétique, sont déterminées d'après les résultats que l'on veut obtenir.

Il n'y a pas de **méthode directe** pour établir immédiatement les caractéristiques mécaniques et physiques d'un transformateur BF; en général, on procède par essais successifs, chacun d'eux permettant de se rapprocher de plus près des constantes désirées et, comme nous le précisons, on procède généralement de la manière suivante :

1° On suppose adopté un certain matériau constituant le **noyau magnétique** et une certaine dimension pour ce noyau, choisi, d'ailleurs, d'après des règles définies.

2° On calcule le nombre de spires d'enroulement primaire, qui donne la valeur désirée de l'inductance primaire.

3° On multiplie le nombre des spires de l'enroulement primaire par le rapport de transformation pour trouver le nombre des spires de l'enroulement secondaire.

4° On détermine les sections des fils de l'enroulement primaire et secondaire. On n'emploie pas normalement de fil inférieur à 10/100 mm. C'est seulement pour des transformateurs très légers que l'on a recours à des fils d'un diamètre de l'ordre de 8/100 mm; mais, autant que possible, on évite l'emploi des fils trop fins, à cause des risques de rupture au moment du bobinage. Si l'enroulement est traversé par un courant continu et alternatif, l'intensité du courant efficace total a pour expression :

$$I_{\text{total}} = \sqrt{I^2_{\text{continu}} + I^2_{\text{alter}}}$$

5° On place les enroulements. Il est préférable de calculer le nombre de spires par couche, et le nombre de couches de chaque enroulement, plutôt que de se baser

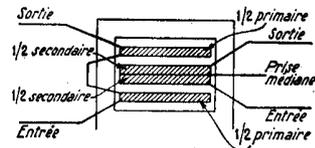


Fig. 4

sur l'emplacement du bobinage. La disposition des enroulements peut être déterminée par les nécessités de conditions spéciales pour chaque transformateur, comme nous l'avons déjà indiqué précédemment. S'il n'y a aucune raison particulière d'agir autrement, le primaire est d'abord bobiné, et le secondaire au-dessus de lui.

6° Si le total calculé pour le bobinage comprenant la bobine, l'isolement des couches et l'enveloppe dépasse 90 % de la hauteur de la fenêtre du circuit magnétique, le noyau magnétique est trop réduit et il faut répéter les mêmes opérations, en utilisant un noyau plus grand, ou avec une ouverture plus large d'une forme modifiée, ou encore un noyau établi avec un matériau de propriétés magnétiques meilleures. Si le noyau construit est par contre très inférieur à 90 % de la hauteur de la fenêtre du circuit magnétique, un noyau plus réduit doit être essayé.

7° Après avoir déterminé ainsi un noyau et un bobinage, qui assurent l'inductance primaire nécessaire et le rapport du transformateur, les autres constantes doivent être calculées à partir de ces données. Il s'agit des résistances primaire et secondaire, de la résistance de perte du noyau et de l'inductance de fuite. Dans le cas des transformateurs d'entrée et de liaison, la capacité répartie et la capacité par rapport à la masse du secondaire doivent aussi être calculées. Dans le cas des transformateurs de sortie à niveau élevé et de modulation, la densité maximale du flux pour la fréquence la plus basse, le rendement sur la gamme médium et l'échauffement doivent aussi être déterminés.

8° On modifie certaines caractéristiques de construction, si cela est nécessaire, d'après le résultat des premiers essais. L'inductance de fuite et la capacité du secondaire peuvent ainsi varier dans des proportions importantes, lorsqu'on change la disposition et la forme des enroulements. La résistance des enroulements peut aussi être modifiée en employant du fil de section plus faible ou plus forte.

est formée par les capacités des couches intérieure et extérieure de l'enroulement par rapport aux surfaces auxquelles elles touchent. Les capacités des extrémités d'un enroulement sont normalement négligeables. Habituellement, un enroulement est bobiné sur l'autre concentriquement avec un isolement de 0,25 à 1 mm entre eux. La capacité entre les deux enroulements est ainsi la capacité entre deux surfaces parallèles de même étendue, ayant entre elles une distance très réduite.

La tension alternative entre les deux surfaces n'est pas habituellement la même en tous les points, parce que la tension alternative entre la couche extérieure d'un enroulement n'est pas habituellement la même que celle produite aux extrémités de la couche de l'autre. La capacité calculée entre la couche supérieure d'un enroulement et la couche inférieure de l'autre, est supposée déterminée entre la fin d'un enroulement et le commencement de l'autre, mais il en résulte des erreurs très réduites, si le nombre de couches de chaque enroulement est supérieur à dix.

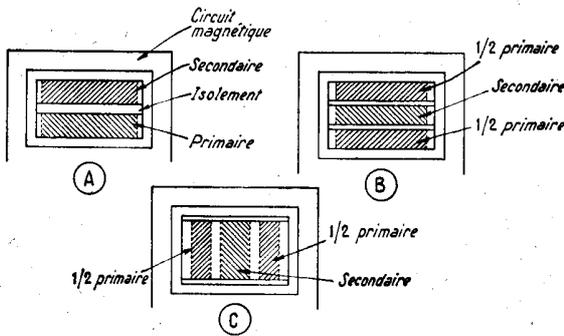


FIG. 5

LA CAPACITE REPARTIE

La capacité répartie d'un transformateur BF est formée par la capacité entre les couches des enroulements en série; la capacité entre spires, au contraire, est négligeable. Un enroulement à plusieurs couches présente, par conséquent, une capacité répartie plus faible qu'un enroulement comportant peu de couches et cette capacité C_a a pour expression :

$$C_a = \frac{0,3 \text{ c l K (T - 1)}}{25 \text{ d T}_2} \text{ picofarads}$$

Dans laquelle c est la longueur moyenne en mm d'une spire de l'enroulement; l , la longueur de l'enroulement; d , la distance entre les couches, cuivre à cuivre; T , le nombre de couches de l'enroulement, et K , une constante diélectrique moyenne de l'isolement de la couche, qu'il s'agisse de fil émaillé ou de composés d'imprégnation. Pour les couches isolées au papier, $K = 3$, par exemple.

La capacité par rapport à la masse, ou entre les enroulements,

Si la circonférence moyenne de l'espace entre les deux enroulements a pour valeur C , la longueur de l'enroulement l , et la séparation des enroulements d , et si K est la constante diélectrique de l'isolement entre elles, la capacité d'enroulement à enroulement C a pour expression :

$$C_e = \frac{0,225 \text{ c l K}}{25 \text{ d}} \text{ picofarads}$$

avec les mêmes notations.

La même formule peut être employée pour la détermination des autres capacités, telles que celle par rapport au noyau magnétique ou au blindage.

Mais les différentes caractéristiques et les qualités du transformateur BF ont pu être améliorées dans des proportions importantes par une modification de leur construction et, en particulier, par des progrès des **noyaux magnétiques**. C'est ce que nous montrerons dans une prochaine étude.

R. S.