

- Abgleich:**
1. Sender auf Bandmitte (1835 kHz)
 2. Koaxschalter auf Kunstlast
 3. Sender wie gewohnt abstimmen
 4. Koaxschalter auf Anpassgerät
 5. C1 und C2 auf Mittelstellung
 6. Sender mit wenig Leistung einschalten (Kleiner 10 Watt)
 7. Abwechselnd beide Koaxkabel im Anpassgerät kürzen, bis das SWR-Meter kleiner 1 : 1,2 anzeigt, dabei Sender und Anpassgerät nicht verstellen.
- Betrieb:**
1. Empfänger auf Betriebsfrequenz (1810-1850 kHz)
 2. C1 und C2 auf max. Empfangssignal
 3. Koaxschalter auf Kunstlast
 4. Sender wie gewohnt abstimmen
 5. Koaxschalter auf Anpassgerät
 6. Sender ein. Mit C1 und C2 auf min. SWR abstimmen

Bei Leistungen bis 100 Watt kommt es zu keinen Überschlügen an den Drehkondensatoren. Die Ausbreitungsbedingungen auf 160m sind vor allem in den Wintermonaten während der Nacht sehr gut.

Bobinages, selfs, inductances, solenoïdes

Werner Tobler, HB9AKN, Chemin de Palud 4, 1800 Vevey

1. Introduction
2. Symboles utilisés
3. Théorie fondamentale
4. Mesures et calculs des bobinages
5. Fonctions d'une bobine
6. Réalisations pratiques
7. Conclusions

1. Introduction

Bobinages, selfs, inductances, solenoïdes

Nous allons tenter d'exposer le plus simplement et d'une façon la plus complète possible, les notions indispensables au bon emploi de ces éléments. Notre expérience nous a, en effet, montré à plusieurs reprises les difficultés de compréhension et d'utilisation correcte de ces composants. La diversité des unités employées, l'aspect physique très variable, ainsi que la multiplicité des spécifications, ne font que jeter le trouble chez l'ama-

teur constructeur, et même chez beaucoup de professionnels qui ont complètement oublié leurs notions de physique. On utilise des abaques ou des tabelles, sans même savoir d'où proviennent les chiffres, et lorsque le problème sort tant soit peu de l'habituel, on est embarrassé.

Je me propose donc de fournir au lecteur le bagage nécessaire à la bonne compréhension des phénomènes mis en jeu, avec un retour aux sources, en fuyant justement toute utilisation d'abaques ou autre table, qui sont très utiles pour une utilisation rapide et aveugle, mais qui ne satisfait pas celui qui veut comprendre et savoir d'où elles sont issues. C'est d'autant plus préjudiciable que les abaques font perdre de vue les phénomènes physiques mis en jeu.

L'expérience nous a aussi montré que les bobinages sont la grosse question pour l'amateur, et que c'est la première chose que l'on regarde sur un



schéma qu'on désire réaliser, afin de savoir si toutes les indications utiles y figurent. Or très souvent, ces indications sont très partielles, voir inexistantes, ou alors peu parlantes. Ainsi les «radio amateur Handbook» américains, par ailleurs très bien faits, indiquent volontiers des numéros de fils utilisés ce qui ne nous aide pas beaucoup si l'on a

pas la table correspondante ici en Suisse. Pourquoi ne pas indiquer alors directement le diamètre du fil et du bobinage, même en pouces puisque nos amis anglo-saxons tiennent tellement à leurs unités.

La technologie de certains bobinages a subi une évolution, mais à notre connaissance, à part une

exception, ils font toujours appel au phénomène de self induction et aux lois fondamentales de l'électricité, partie importante de la physique. Ils ont donc relativement peu évolué, comparativement à d'autres composants. Ainsi, on remarquera que les bonnes vieilles bobines qu'on voyait jadis montées sur les équipements ondes courtes, n'ont rien perdu de leur utilité, on les a chassées des étages finaux à transistors, et on les retrouve

dans les boîtes de couplage, plus jeunes que jamais. Dans les circuits oscillants HF, le bobinage est le siège de plus de pertes que son cousin le condensateur auquel il est fréquemment associé.

C'est pourquoi on ne se donnera jamais assez de peine pour le confectionner. Dans le meilleur des cas, le rapport de pertes est de 1:20 entre le CV et le bobinage.

2. Symboles utilisés

Système MKSA (mètre, kilogramme, seconde, ampère)

	Unités	Correspondance
V; U _i	Tension induite	Volts
Φ	Flux magnétique (phi)	Weber
t	Temps	seconde
L	Coefficient de self induction	Henrys
I	Courant électrique	Ampère
W	Energie électrique	Joules
Q	Facteur de qualité	sans unités
ω	Pulsation (omega)	Radians/sec.
R	Résistance électrique	Ohms
RHF	Résistance électrique à une fréquence élevée	Ohms
M	Longueur	Mètre
i	Valeur instantanée du courant	Ampère
I ₀	Amplitude maximum du courant	Ampère
Θ	Force magnétomotrice (teta)	Ampère tours
H	Champ magnétique	$\frac{\text{Ampère} \cdot \text{tours}}{\text{mètre}}$
B	Induction magnétique	$\frac{\text{Weber par m}^2}{\text{m}^2}$
μ ₀	Coefficient de perméabilité du vide	$\frac{\text{Ampère} \cdot \text{tours}}{\text{m}^2}$
μ _r	Coefficient de perméabilité relative	sans unité
r	Réductance du circuit magnétique	$\frac{\text{Mètre}}{\text{Ampère} \cdot \text{tours}}$
μ	Coefficient de perméabilité global	$\frac{\text{Ampère} \cdot \text{tours}}{\text{par m}^2}$

1 Weber = 10⁸ Maxwells

1 kWh = 3.600.000 joule

6,28 Radians/_{sec} = 360°/_{sec}

en Oersted H = 1,25 $\frac{NI}{l}$

$\frac{1 \text{ Weber}}{\text{m}^2} = 1 \text{ Testa} = 10^4 \text{ Gauss}$

Avertissement

Il faut que l'amateur reste cohérent dans ses calculs et reste fidèle au système MKSA. Il évitera ainsi de mélanger des unités incohérentes et d'obtenir des résultats faux.

3. Rappel de la théorie fondamentale

Nous allons donc retourner sur les bancs d'école et examiner le plus simplement possible les principales notions en dégagant l'essentiel, sans trop de développements fastidieux.

D'abord la terminologie. On parle de bobines, selfs, réactances inductives, inductances, sole-noïdes, beaucoup de termes qui ne font que désorienter le débutant et même le professionnel. Sans parler de la grande variété d'unités!

Ces termes et unités seront expliqués au fur et à mesure de l'exposé. Tout conducteur parcouru par un courant électrique génère autour de lui un champ magnétique qui sera fixe, c'est-à-dire constant si le courant qui le parcourt est lui-même constant ou au contraire variable, si ce même courant est variable. A noter que dans ce dernier cas, le champ magnétique variable est accompagné d'un champ électrique également variable.

L'existence de ce deuxième champ se déduit des équations de Maxwell écrites en 1865.

A noter également que le champ électrique est à tout moment perpendiculaire au champ magnétique, mais dans l'immédiat, le lecteur peut l'admettre comme vrai sans explications.

Alimentons un fil rectiligne à l'aide d'un courant continu. On peut s'imaginer le champ magnétique comme étant constitué de cercles concentriques

ques autour du fil. Ces cercles, on pourrait très bien les voir en faisant passer le fil à travers une feuille de papier soupoudrée de limaille de fer. A mesure qu'on s'éloigne du conducteur, ce champ magnétique s'affaiblit.

Chacun se souvient de ces souvenirs d'école. Essayons de renforcer ce champ magnétique. On peut bien sûr augmenter le courant, mais on peut aussi changer la disposition du fil. Mettre par exemple deux fils l'un à côté de l'autre, parallèles et alimentés par un courant dans le même sens, on aura un effet cumulatif des champs magnétiques respectifs. L'idée d'enrouler ainsi le fil sur lui-même vient donc tout naturellement. Nous avons ainsi constitué un bobinage ou une self. Nous verrons plus loin l'explication de cette dernière appellation. Rappelons que c'est Henry qui eut le premier l'idée d'enrouler du fil en 1832.

3.1 Lois de l'induction de Faraday (1831) ou d'Henry

Nous savons produire un champ magnétique et nous pouvons placer un conducteur dans celui-ci et redécouvrir ainsi les lois fondamentales de l'électricité qui défient le temps.

Aux bornes du conducteur ainsi placé, branchons un voltmètre, que verrons-nous:

En l'absence de courant continu dans le bobinage, c'est-à-dire en l'absence de champs magnétique continu, on observe aucune tension induite dans le conducteur, donc aucune déviation du voltmètre. Il en serait de même avec la présence d'un champs magnétique. En enclenchant le courant inducteur continu dans le bobinage, on verra l'aiguille du voltmètre faire un sursaut et retomber à zéro. De même en coupant le courant. C'est donc la **variation du champ magnétique** qui induit une tension dans un conducteur fixe se trouvant dans ce champs magnétique. Inversément, on pourrait enclencher le courant continu inducteur de façon à établir le champs magnétique fixe et traverser celui-ci à l'aide du conducteur, on obtiendrait aussi une impulsion de tension. C'est le principe du générateur que ce soit la dynamo et l'alternateur. Dans ce cas, nous avons l'inducteur (le champs magnétique) et l'induit (le conducteur). Tous ces phénomènes d'induction sur un conducteur situé à une certaine distance sont valables sur l'inducteur lui-même, c'est-à-dire la bobine. C'est le phénomène de self induction. On comprend maintenant d'où provient ce mot self pour désigner une bobine. Dans tous les cas on a:

$$\text{tension induite } U_i = - \frac{d\Phi}{dt}$$

avec $d\Phi$ la variation de flux magnétique exprimée en Weber dt le temps nécessaire pour la faire.

Le signe — provient du sens de la tension induite qui tend à s'opposer à la cause qui l'a créée, en l'occurrence la tension inductrice. Lorsqu'on coupe

la tension inductrice, au contraire la tension induite voudra prolonger celle-ci et aura le même sens (Loi de Lenz).

Une bobine idéale est un élément pour lequel il existe un coefficient de proportionnalité constant entre la tension qui apparaît à ses bornes et la dérivée par rapport au temps du courant qui la traverse. Ce coefficient appelé coefficient de self induction est donc défini par:

$$L \text{ (en Henrys)} = \frac{V}{\frac{di}{dt}} \text{ de même } L = \frac{\Phi}{i}$$

$$L di = d\Phi$$

$$L \frac{di}{dt} = \frac{d\Phi}{dt} \text{ comme } - \frac{d\Phi}{dt} = U_i:$$

donc on voit que $V = -U_i$

On comprend maintenant que si l'on alimente l'inducteur en tension alternative donnant lieu à un courant alternatif, on aura dans un conducteur situé à proximité, une tension induite également alternative qu'on pourra mesurer en permanence et non plus seulement à l'enclenchement ou au déclenchement. Après tout, il ne se passe pas autre chose entre une antenne d'émission (inductrice) et une antenne de réception (induite) où on recueille les microvolts nécessaires à la réception. Nous avons réinventé le transformateur.

Nous allons voir maintenant d'autres propriétés de la bobine ce qui nous permettra de préciser d'autres notions très utiles pour la compréhension. En effet, une fois bien compris tous les phénomènes de base, toutes les unités fort disparates ne seront que difficultés secondaires.

Nous l'avons vu, la bobine produit un champ magnétique et accumule donc de l'énergie sous cette forme. Cette énergie emmagasinée sous forme magnétique dans une bobine parcourue par un courant I sera:

$$W \text{ (Joules)} = \frac{L I^2}{2} \quad \textcircled{5}$$

Avec le coefficient de self induction exprimé en Henrys le courant inducteur exprimé en Ampères. Les bobines qu'on sait réaliser ne sont pas idéales et elles dissipent en chaleur une partie de l'énergie emmagasinée. On définira donc le facteur de qualité Q pour:

$$(10) Q = 2\pi \frac{\text{énergie emmagasinée } W}{\text{énergie transformée en chaleur pendant le temps } T W}$$

L'énergie transformée en chaleur par effet Joule vaut:

$$W \text{ (Joules)} = \int_0^T I^2 R dt$$

si le courant $i = I_0 \sin \omega t$

$$\text{avec } \omega = 2\pi \cdot f \text{ avec } T = \frac{1}{f} = > T = \frac{2\pi}{\omega}$$

avec T exprimée en seconde

$$W (\text{Joules}) = \frac{2\pi}{\omega} \cdot \frac{I_0^2 R}{2} \cdot \frac{\pi R I_0^2}{\omega}$$

$$\text{en reprenant (5) } W (\text{Joules}) = \frac{LI^2}{2}$$

en reprenant (10) toutes simplifications faites

$$Q = 2\pi \cdot \frac{W}{\omega} = \frac{\omega L}{R}$$

expression bien connue avec R exprimant la résistance ohmique du fil constituant la bobine. Seulement attention! Pour des fréquences relativement basses, disons 10 kHz, R pourra tout simplement être mesurée à l'ohmètre comme une simple résistance. A des fréquences plus élevées, il faudra tenir compte de l'effet pelliculaire ou effet Kelvin, c'est-à-dire que le courant aura tendance, à mesure que la fréquence augmente à se propager de moins en moins au milieu du conducteur. Ceci a pour effet d'augmenter R qui ne sera plus égale à la simple valeur ohmique, mais à une valeur supérieure RHF.

Considérons maintenant un solénoïde alimenté par un courant continu. Ce bobinage peut être assimilé à un générateur de flux Φ qui débite dans un circuit magnétique, en l'occurrence de l'air.

La force magnétomotrice Θ qui fait circuler le flux vaut:

$$\Theta = NI \text{ avec } N = \text{nombre de spires}$$
$$I = \text{courant en ampère.}$$

Le champ magnétique H vaut:

$$H = \frac{NI}{l} \text{ avec } N = \text{nombre de spires}$$

l = courant en ampère

l = longueur de l'enroulement en mètres

$$\text{donc } H = \frac{\Theta}{l}$$

Parlons du circuit magnétique.

Jusqu'à maintenant, nous n'avons considéré que l'air comme circuit magnétique, notre bobinage expérimental étant comme l'on dit «bobiné sur air». Augmentons Θ , le flux Φ augmentera proportionnellement. L'induction est la densité de flux, soit:

$$B = \frac{\Phi}{S} \left[\frac{\text{Weber}}{\text{m}^2} \right]$$

En plus, on a la relation: $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$

S = section du noyau magnétique dans l'air $B = \mu_0 H$ (puisque $\mu_r = 1$) avec μ_0 le coefficient de perméabilité du vide avec μ_r le coefficient de perméabilité relative (avec l'air $\mu_r = 1$).

Avec les circuits constitués de matériaux magnétiques, c'est-à-dire plus perméables que l'air au passage du flux magnétique, les choses se compliquent.

Il faudra considérer un nouveau coefficient de perméabilité relative propre au matériau utilisé qui tiendra compte de l'amélioration de perméabilité par rapport à l'air.

On a alors: $B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H$ avec μ_r coefficient de perméabilité relative du matériau considéré.

et $\mu_0 = 1,25 \cdot 10^{-6}$

Ce qui complique les choses, c'est que ce coefficient de perméabilité relative μ_r est fonction de l'induction alors que le μ_0 du vide est constant. En effet, avec l'air on a une proportionnalité constante entre la densité de flux ou induction et le champ magnétique nécessaire pour l'obtenir. De plus, on a aucun effet de saturation.

Avec un circuit constitué de matériaux magnétiques, on arrive alors forcément à un état de saturation du circuit magnétique. En augmentant encore la force magnétomotrice, le flux n'augmentera plus. Si l'on désigne par le mot réluctance, l'opposition du passage du flux magnétique on arrive à la loi d'Hopkinson qui est comparable à la loi d'Ohm, mais pour les circuits magnétiques.

$$\text{réluctance } r = \frac{\Theta}{\Phi} = \frac{l}{\mu_0 \mu_r \cdot S}$$

comparable à la célèbre équation d'Ohm

$$R (\Omega) = \frac{V}{I}$$

avec l = longueur du circuit magnétique

Il existe pour chaque matériau magnétique une courbe $B = f(H)$ qui permet de connaître la valeur du champ maximum à appliquer pour éviter que le circuit magnétique n'entre en saturation.

En guise de résumé, nous allons préciser chaque grandeur utilisée ainsi que les unités employées. Ainsi nous espérons mettre un peu d'ordre dans cette jungle d'unités qui ne fait que compliquer les choses.

Résumé de la théorie

Système MKSA

(mètre, kilogramme, seconde, ampère)

Le flux Φ s'exprime en Weber 1 Weber = 10^8 Maxwell.

Dimension de l'unité (Volt · Seconde).

Le champ magnétique H s'exprime en Ampère par Mètre.

Dimension de l'unité $\left(\frac{\text{Ampère}}{\text{Mètre}} \right)$

Il faut remarquer que dans l'ancien système d'unité CGS le champ magnétique H s'exprimait en Oersted du nom du savant qui, en 1819, fit la célèbre expérience de la déviation d'une aiguille aimantée par un courant passant dans un fil proximité, on avait:

$$H \text{ en Oersted} = 1,25 \frac{N \cdot I}{1}$$

L'induction B s'exprime en Weber par m² ou en Tesla

$$\text{Dimension} \left[\frac{\text{Volt} \cdot \text{seconde}}{\text{Mètre}^2} \right]$$

$$1 \text{ Weber par m}^2 = 1 \text{ Tesla}$$

$$1 \text{ Tesla} = 10^4 \text{ Gauss}$$

$$\text{La perméabilité } \mu_0 \text{ de l'air} = 1,257 \cdot 10^{-6}$$

$$\text{Dimension} \left[\frac{\text{Volt} \cdot \text{seconde}}{\text{Ampère} \cdot \text{mètre}} \right]$$

La force magnétomotrice Θ s'exprime en ampère-tours. Dimension (ampère).

$$\text{La réluctance } R = \frac{l}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S} \text{ s'exprime en } \frac{A}{V \cdot S}$$

3.2 Pertes dans les circuits magnétiques

Nous l'avons dit, il n'y a pas de phénomène de saturation du flux pour un bobinage dont le circuit magnétique est constitué par l'air ou le vide. L'établissement ou la disparition du flux n'occasionnera aucune perte.

Il n'en est pas de même pour les circuits magnétiques tels que la tôle de fer par exemple. Ceux-ci seront le siège de pertes d'autant plus élevées que la fréquence est élevée. Pour la fréquence industrielle de 50 Hz ou bien le 16 2/3 Hz des CFF (s'il existe encore!) on arrive à limiter les pertes en utilisant de la tôle de fer au silicium feuilletée isolée pour constituer le noyau magnétique au lieu de faire celui-ci d'un seul bloc. Ces pertes sont nommées pertes par courants de Foucault. Mais de grands progrès ont été réalisés dans la matière constituant ces noyaux, de sorte qu'on peut aujourd'hui parfaitement réaliser de véritables transformateurs travaillant avec des fréquences HF. On peut dès lors parfaitement utiliser l'expression:

$$\frac{n_1}{n_2} = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}$$

avec n_1 : nombre de spires au primaire
 n_2 : nombre de spires au secondaire

Expression qu'on utilise couramment avec les transformateurs BF pour réaliser une adaptation d'impédance.

Z_1 impédance côté primaire en Ohm

Z_2 impédance côté secondaire en Ohm

Z_1 et Z_2 étant les impédances à adapter.

On rappellera qu'on ne peut utiliser cette expression telle quelle pour calculer l'adaptation des impédances lors d'un couplage inductif par exemple, d'une bobine d'antenne avec le circuit oscillant de sortie d'un émetteur. La dispersion de flux est trop grande et fausse les calculs.

Tout le problème consiste à connaître exactement les spécifications des noyaux magnétiques utilisés. Il en existe actuellement d'excellents sur le marché. En particulier, il faudra connaître la fréquence maximale d'utilisation, ainsi que l'induction maximum possible. De plus, il faudra connaître l'ordre de grandeur des pertes par effet d'hystérésis, nous allons revenir sur ce dernier point. On le voit, il ne suffit pas de puiser dans son stock de pièces, d'en retirer un noyau toroïdal qui a bonne allure dont on ignore tout, et de vouloir l'utiliser pour une application HF. Les spécifications accompagnant tous matériaux magnétiques ont autant de valeur que le matériau lui-même. Faire les mesures des pertes soi-même est un travail long qui nécessite un appareillage coûteux. Il faut donc se référer aux spécifications des fabricants.

3.3 Pertes par hystérésis

Entourons un solénoïde d'un noyau de fer doux et alimentons ce solénoïde par un courant continu. Si l'on relève la courbe $B = f(H)$ ou ce qui revient au même la courbe $B = f(I)$ puisque I est la seule variable représentant le courant passant dans le solénoïde, on obtiendra le cycle bien connu, dit cycle d'hystérésis qui montre très bien le phénomène de rémanence. Pour annuler l'induction due à la rémanence, il faut inverser le sens du courant. Rappelons simplement que les pertes seront proportionnelles à la surface du cycle d'hystérésis ainsi qu'à la fréquence. L'idéal serait que la surface du cycle soit nulle pour la fréquence considérée. Il est important de se souvenir que de deux bobines ayant même coefficient de self induction, celle possédant un noyau, aura un total de pertes inférieur car on aura pu diminuer le nombre de spires. Après ce nécessaire rappel théorique, il est toujours bon de revenir aux sources, nous allons aborder une partie plus pratique qui traitera des mesures des bobinages. Nous ne prétendons nullement avoir été exhaustif dans l'évaluation des pertes affectant les bobinages.

Nous avons vu l'expression (3) $L = \frac{\Theta}{I}$ d'où l'on dé-

duit que L est d'autant plus grand que I est petit pour obtenir un flux Θ donné. ou raisonnement inverse, qu'un courant donné fournit un flux Θ plus élevé. L'expression $B = \mu_0 \mu_r H$ ou bien

$$\frac{\Theta}{S} = \mu_0 \mu_r \frac{NI}{l} \Rightarrow L = \frac{\Theta}{I} = \mu_0 \mu_r \frac{N \cdot S}{l}$$

nous montre que seul μ , peut intervenir pour un bobinage donné afin de modifier L. D'où, l'intérêt de trouver un matériau ayant une perméabilité relative μ , la plus élevée possible à la fréquence considérée et des pertes diverses les plus petites possibles.

Ainsi de deux bobinages ayant même coefficient de self induction L, le meilleur facteur de qualité Q sera obtenu pour celui qui utilise un noyau magnétique, car on aura pu diminuer les spires et les pertes ainsi supprimées, sont plus importantes que celles ajoutées par le noyau.

A titre d'exemple «A midon Associates» annonce une perméabilité relative de 8 pour leur noyau torroïdaux jaunes utilisables de 2 à 50 MHz. Philips «elcoma» annonce pour son matériau 4C6 utilisable jusqu'à 10 MHz une perméabilité relative de 80 au moins. Est-ce la forme du circuit magnétique (en pot) qui fait gagner ce facteur 10? Probablement. Au-delà de 10 MHz le pot ferroxube matériau 4C6 de Philips perd son avantage.

4. Mesures et calculs des bobinages

Nous l'avons vu, un bobinage est caractérisé par plusieurs grandeurs, parfois contradictoires entre

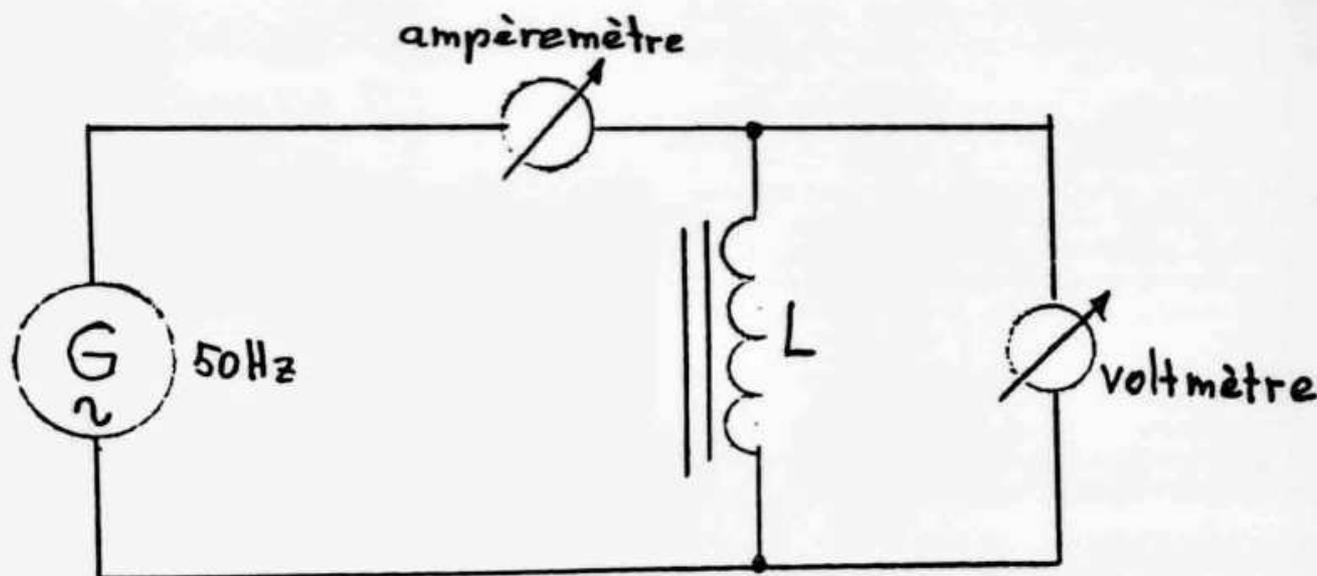
elles, et tout l'art de l'utilisateur sera précisément de savoir quelle spécification est la plus importante pour une application donnée.

4.1. Bobinages à noyau de fer

On distinguera immédiatement celui qui devra travailler avec un champ magnétique variable et celui qui travaillera avec un champ magnétique fixe. Le premier aura son circuit magnétique constitué de feuilles de fer au silicium isolées les unes des autres pour limiter les pertes, par courants de Foucault notamment.

Le second sera un électro aimant par exemple de levage et son circuit magnétique pourra être constitué d'un morceau d'acier doux massif.

C'est le premier cas qu'on rencontre le plus souvent en radioélectricité, en particulier pour les inductances de filtrage. Ces bobinages sont utilisés dans le domaine des basses fréquences industrielles, ou basses fréquences acoustiques, qui sont les applications les plus courantes. Pour ce genre de bobinages, le coefficient de self induction L est facile à déterminer avec le montage suivant très simple:



On se souvient en effet que:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2} = \frac{V}{I}$$

avec R résistance en ohm de la bobine

$$\omega = 2\pi \cdot f \left[\frac{\text{radians}}{\text{seconde}} \right]$$

L: coefficient de self induction (Henrys) toutes transformations faites on a:

$$L = \sqrt{\frac{Z^2 - R^2}{\omega^2}}$$

4.1.1 Manipulations

Il faudra s'assurer que L est parcourue par un courant correspondant à la valeur nominale. Si l'on ignore cette valeur, commencez par un courant plutôt petit, car il ne faut pas placer le noyau magnétique dans un état proche de la saturation. G peut être constitué par l'enroulement secondaire d'un transformateur travaillant sur le secteur à 50 Hz. R pourra cette fois être mesurée à l'aide d'un simple ohmmètre (ce qui n'est pas représentatif, rappelons le avec un bobinage HF). Le facteur de surtension d'un tel bobinage est le plus souvent peu important. Pour la construction proprement dite de ces éléments, nous renvoyons le lecteur à la bibliographie.

4.2 Bobinages à noyau de fer pulvérisé ou ferrite

On a cherché à augmenter la fréquence possible d'utilisation des circuits magnétiques en utilisant des ferrites. Cela permet ainsi d'obtenir des coefficients de self induction donnés avec moins de spires, donc d'obtenir des facteurs de qualité supérieurs. De plus, l'introduction d'un noyau réglable est très pratique pour ajuster le coefficient de self induction à une valeur bien déterminée.

Dans les réalisations disponibles sur le marché, nous citerons l'exécution sous forme de pots ferrocubes livrée, tant par Philips que par Siemens. Pour ceux qui ignorent ces réalisations, nous dirons que chaque noyau se compose de deux parties plaquant exactement l'une sur l'autre et contenant une bobine placée au milieu. Le tout est monté à l'intérieur d'un blindage cylindrique. Un noyau à visser permet l'ajustage de la self. Des formules données par le fabricant permettent de calculer exactement le nombre de spires nécessaire en tenant compte encore du réglage possible avec le noyau. L'avantage réside dans le fait qu'on a pas un champ magnétique HF dans tout le montage, qui pourrait provoquer des accrochages. Mais alors, il sera plus difficile de venir avec un grid dip pour voir s'il y a ou non de la HF, puisque tout est blindé.

Avec un tel ensemble, on pourra calculer une adaptation d'impédance exactement comme s'il s'agissait d'un transformateur à basse fréquence avec l'équation donnée plus haut. On pourra ainsi facilement s'adapter à un câble coaxial basse impédance avec tous les avantages qui en résultent. Comme autre réalisation disponible, nous citerons les noyaux torroïdaux bien connus des amateurs. Tous ces systèmes sont d'une utilisation extrêmement pratique, mais attention au matériau employé pour les torres ou les pots. Toujours se référer à la notice du fabricant pour juger des aptitudes du noyau aux fréquences élevées.

Avec l'amplification HF de puissance à transistor (voir notre référence) est apparu le transformateur HF de puissance constitué d'un noyau de ferrite capable de transmettre sans trop de pertes de fortes puissances HF (à l'échelle amateur bien sûr!). Ces noyaux sont le plus souvent constitués de deux tubes collés l'un à l'autre selon leur génératrice. On passe les enroulements primaires et secondaires dans les alésages des tubes. Le rapport de transformation obtenu est généralement assez bas par exemple 4 ce qui autorise une adaptation d'impédance de 1 à 16. Dans ce cas, aussi le matériau utilisé est de la plus haute importance pour l'estimation des pertes. Voir notre article Old man no 10/1987. Le fabricant fournit en général les formules nécessaires pour les calculs des bobinages, nombre des spires, coefficients etc.

4.3 Bobinages à circuit magnétique constitué par l'air

Même s'il n'existe que des spires enroulées sur un mandrin non magnétique, ou simplement comme on dit «enroulées sur air», le circuit magnétique est présent et constitué dans ce cas tout simplement par l'air. Après tout, notre bonne vieille terre avec son pôle nord et son pôle sud a elle aussi, un champ magnétique établi dans un vrai circuit magnétique. C'est Gilbert qui émit cette hypothèse en 1600.

Formule de Nagaoka

C'est une formule très pratique utilisable pour les solénoïdes cylindriques à une seule couche. Nous la reproduisons ci-dessous, étant persuadé qu'elle rendra service à de nombreux réalisateurs.

Le coefficient K de Nagaoka se déduit du tableau ci-dessous:

$\frac{2a}{b}$	K	$\frac{2a}{b}$	K	$\frac{2a}{b}$	K
0	1	0,70	0,761	3,50	0,394
0,05	0,979	0,80	0,735	4,00	0,365
0,10	0,959	0,90	0,711	5,00	0,320
0,15	0,939	1,00	0,688	6,00	0,285
0,20	0,920	1,25	0,638	7,00	0,258
0,25	0,902	1,50	0,595	8,00	0,237
0,30	0,884	1,75	0,558	9,00	0,219
0,40	0,850	2,00	0,526	10,00	0,203
0,50	0,818	2,50	0,472	25,00	0,105
0,60	0,789	3,00	0,429	100,00	0,0305

avec a: rayon en cm

b: longueur en cm

n: nombre de spires

$$L = \frac{3,95 \cdot 10^{-2} \cdot a^2 \cdot n^2 \cdot K}{b}$$

L: coefficient de self induction en μH

Nous reconnaitrons dans cette catégorie les bobinages à une seule ou multi couches qui équipent les organes des émetteurs et récepteurs ainsi que les bobinages en nid d'abeilles. Ces derniers permettaient, jadis, alors que les matériaux magnétiques n'étaient pas ce qu'ils sont aujourd'hui, d'obtenir des coefficients de self induction relativement importants, ceci en minimisant les pertes avec la disposition en nid d'abeilles et l'utilisation de fil de Litz. Actuellement, il existe des bobineuses spéciales qui permettent d'obtenir les mêmes avantages, alors que les premiers radio-amateurs bobinaient leur nid d'abeilles à la main. Pour ceux qui veulent admirer ces belles réalisations ils peuvent se rendre au musée de la radio à la Salaz, dans les bâtiments de la SST à Lausanne. Ce musée mérite une visite de tous les passionnés de la radio.

4.3.1 Mesures

Pour les bobinages basse fréquence à fer, nous l'avons vu, la mesure est relativement facile à faire, alors que les difficultés commencent pour les bobinages HF. Pour ces derniers, en effet, un principe de mesure souvent retenu, est la mise en résonance du bobinage associé à une capacité connue. En passant par l'expression de Thomson

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \Rightarrow L = \frac{1}{\omega^2 C} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f^2 \cdot C}$$

on arrive à déterminer L.

Tel est le principe du remarquable Q mètre Ferisol type M 803.

Nous le savons, tout le monde n'a pas la chance de posséder un tel instrument alors que faire, car la plus mauvaise méthode, celle que nous déconseillons vivement, est d'ajouter puis d'enlever des spires jusqu'à l'obtention d'une résonance hypothétique. Non, pas cela et ceci pour plusieurs raisons. La première est qu'en soudant et dessoudant, on finit par abîmer le circuit imprimé. Ensuite, on peut résoudre le problème de la façon suivante:

Pour un solénoïde à une seule couche, nous donnons la formule de Nagaoka qui permet de dégrossir dans un premier temps les caractéristiques du bobinage. Pour l'ajustage final, si vous n'avez pas de Q-mètre, vous avez certainement un grid dip mètre. Alors soudez une capacité connue aux bornes du bobinage et cherchez la résonance. Connaissant f lue sur le cadran, en appliquant Thomson vous déterminez L. Avec un fréquencesmètre, vous pouvez déterminer f avec plus de précision d'où un L plus précis. Bien sûr, cette valeur de L ainsi déterminée sera un peu modifiée lors de l'installation de la bobine dans le montage, cela dépendra de son environnement.

Pour les bobinages type pot en ferroxcube Philips ou Siemens nous l'avons dit, ils sont complètement blindés ce qui présente l'avantage certain de ne pas avoir de champ HF indésirable.

L'inconvénient vient du fait qu'on ne pourra pas approcher un grid dip pour tenter une mesure. Le fabricant fournit des formules suffisamment précises pour éviter justement le tatonnement. De plus, grâce au noyau, on dispose d'une certaine marge de réglage, alors que désirer de plus. De même, pour les noyaux torroïdaux.

Citons encore les bobines agglomérées qui ont l'aspect des résistances et ne doivent pas être confondues avec elles. Elles possèdent un code des couleurs qui permet de déterminer rapidement leur valeur.

5. Fonctions d'une bobine

Nous l'avons dit, la fonction du bobinage sera déterminante pour savoir quelles sont les caractéristiques intéressantes pour l'emploi désiré.

On distingue trois fonctions principales:

5.1 Fonction d'arrêt ou blocage ou filtrage

Dans ce cas, c'est la réactance inductive ou inductance ωL qui sera intéressante pour la fréquence considérée, le coefficient de surtension Q étant une valeur de moindre importance. Dans ce cas, il faudra aussi, s'il y a un circuit magnétique, tenir compte de la composante continue, s'il y en a une, du courant traversant le bobinage. En effet, cette composante produit déjà un déplacement sur la courbe $B = \mu H$ du matériau considéré et le noyau sera plus rapidement saturé. En d'autres termes, une bobine à fer présentant un coefficient de self induction de 20 Henrys pour un composante continue du courant de 100 mA par exemple, ne présentera plus que, par exemple, 16 Henrys avec une composante continue de 200 mA traversant le bobinage.

Ce phénomène ne se présentera absolument pas avec une classique self d'arrêt HF, type National R100 ou autres de 2,5 mH avec nid d'abeilles pour les raisons évoquées plus haut à savoir que le circuit magnétique est constitué par l'air entourant le bobinage.

5.2 Fonction de sélection ou production d'oscillation

C'est la fonction la plus importante pour le passionné de HF et nous aurions dû commencer par elle. Sans vouloir, refaire la théorie complète des circuits oscillants pour laquelle nous renvoyons le lecteur à des ouvrages de radio-électricité générale, nous dirons simplement que dans ce cas, la valeur très importante est le coefficient de self induction L qui permettra, grâce à la formule de Thomson, de connaître la fréquence de résonance que cela soit pour la production d'oscillations ou pour la sélection d'oscillations. Le facteur Q est lui aussi très important, spécialement en ce qui concerne les circuits HF d'étage final de puissance (voir l'exemple de la détermination de ce circuit, voir références).

5.3 Fonction de production d'un champ magnétique

Nous avons là tout le domaine d'application des bobinages des machines tournantes, que cela soit des dynamos, alternateurs, magnétos, moteurs divers, sans oublier les électroaimants de toutes sortes, transformateurs etc. Une application qu'on oublie parfois, tant elle est discrète est celle de la bobine mobile du haut parleur qui permettra de faire mouvoir le cône d'un haut-parleur électro-dynamique.

Dans ce dernier cas, le champ magnétique variable produit par la bobine, qui est parcourue par le courant basse fréquence audio, se manifestera par l'action sur le champ magnétique fixe permanent. Il en résultera les déplacements du cône du haut-parleur.

6. Réalisations pratiques

Nous entrons là dans le domaine le plus fascinant et mystérieux puisque cette fois nous aurons bel et bien mis en pratique ces belles théories. Des selfs, on en a vues de toutes sortes et de toutes formes. Les dernières vues à Friedrichshafen étaient remarquables. L'une d'entre elles disposée à la base, était destinée à permettre de trouver l'accord d'une tige verticale d'environ deux mètres pour la bande 80 mètres. Elle était constituée d'une vingtaine de spires espacées d'env. 1 cm et parfaitement maintenues à l'aide de barrettes en plexiglas; le diamètre du fil était de 2 mm et celui de la spire d'au moins 20 cm. Son réalisateur nous assurait en riant, qu'il pouvait encore diminuer la longueur de la tige verticale, mais qu'au bout d'un moment, il se produisait des effluves à l'extrémité si bien qu'il fallait augmenter la surface en plaçant par exemple une sphère en bout d'antenne.

Revenons à nos réalisations:

Le solénoïde à une seule couche est facile à réali-

ser. On lui donnera un rapport $\frac{\Phi}{I}$ compris entre 1

et 2 ce qui permettra d'appliquer Nagaoka dans de bonnes conditions. L'espacement entre spires sera égal au diamètre du fil.

Le choix du mandrin dépend de plusieurs facteurs. Si le bobinage est réalisé en fil de cuivre plein, suffisamment rigide, disons d'un diamètre d'au moins 2,5 mm, on pourra se passer de mandrin et simplement fixer le bobinage sur des colonnettes en stéatite ou polystyrène. On évitera ainsi les pertes diverses dans le circuit magnétique. Il sera comme disent les amateurs, «bobiné sur air». Avec du fil plus fin, on pourra tourner un mandrin en plexiglas et lui faire un filetage au pas désiré, exactement comme pour la confection d'une vis. On aura ainsi un bobinage avec des pertes un peu plus grandes, mais néanmoins tout à fait acceptables. Les mandrins en stéatite, à section étoilée ou autres, sont parfaits, mais difficiles à trouver. On trouvera, avec ce type de bobinage, des valeurs de L mesurées au «Q-mètre» très proches de celle trouvées par calculs par Nagaoka. Ce qui permet de se passer de Q-mètre, instrument rare et coûteux.

6.1 Bobinages avec noyaux torroïdaux

C'est un type très recommandé pour le constructeur car il permet d'atteindre des valeurs de L élevées tout en gardant une bonne qualité. De plus avec ce type de noyaux, on peut réaliser de véritables transformateurs HF avec tous les avantages résultant de l'adaptation des impédances. En particulier, toutes les liaisons HF entre modules différents se feront grâce à ces noyaux à basse impédance ce qui évite énormément de complications et de problèmes.

On peut transférer de grosses puissances HF avec de tels noyaux.

6.2 Bobinages à pot en ferroxcube

Ils constituent, nous l'avons vu, la solution professionnelle par excellence, mais tout à fait appropriée pour l'amateur qui aurait tort de se priver de tous les bienfaits de cette solution. Le montage est un peu long et s'il faut modifier quelque chose après coup, c'est naturellement moins rapide qu'avec des torres. Mais cela donne une bonne méthode de travail à l'amateur en lui faisant prendre en horreur le «touillage» et autres retouches qui abîment les circuits et font faire du mauvais travail.

6.3 Bobinages en nid d'abeilles

Malgré leur aspect rétro, ils ne le sont pas. La physique n'est pas soumise à la mode, et elle étend ses lois implacables au genre humain qui doit les découvrir. D'autres lois découvertes permettront peut-être un jour de se passer d'enrouler du fil sur lui-même pour obtenir l'effet voulu, mais il faudra d'autres Faraday, d'autres Lenz etc.

Le bobinage en nid d'abeilles permet d'obtenir, grâce à sa confection particulière, un coefficient de self induction élevé avec moins de longueur de fil. Employé conjointement avec des noyaux magnétiques performants, il permet d'obtenir des bobines de bonne qualité. C'est le cas des nombreux bobinages confectionnés sur bâton de ferrite qui équipe la quasi totalité des récepteurs portatifs et qui forment l'antenne incorporée pour ondes moyennes et grandes ondes.

L'auteur n'a malheureusement aucune expérience pratique pour ce type très beau de bobinages qui faisaient la fierté des premiers OM's lors qu'ils équipaient les variomètres des appareils à réaction. Nous savons qu'il existe plusieurs façons amateurs de les réaliser et nous serions heureux que les amateurs de la première heure nous fasse part de leurs connaissances à ce sujet.

6.4 Bobinages à noyaux cylindriques accolés

Ces bobinages très particuliers s'utilisent généralement dans les organes de puissance et particulièrement à l'entrée comme à la sortie des amplificateurs HF où ils réalisent l'adaptation des impédances et le transfert de la puissance HF. Ils constituent donc de véritables transformateurs HF.

A titre d'exemple, nous citerons l'étage amplificateurs HF, paru dans l'Old man No 10 qui utilise 2 de ses bobinages. Ils permettent de réaliser une adaptation d'impédance de 1 à 16 en ayant une dispersion de flux très réduite. Les circuits magnétiques sont généralement constitués de deux pièces cylindriques accolées selon leur génératrice et alésées pour permettre l'introduction des enroulements primaires et secondaires. Le choix du matériau constituant le circuit magnétique est naturellement de la plus haute importance. L'en-

roulement primaire est généralement constitué d'une seule spire formée à l'aide d'un tube de cuivre en U alors que le secondaire sera réalisé en bobinant des spires dans l'alésage du tube de cuivre.

6.5 Bobinages divers

Sous ce titre nous laisserons toutes les autres applications industrielles, transformateurs, inductances de filtrage, moteurs, alternateurs, dynamos pour lesquels nous renvoyons le lecteur à des ouvrages cités plus loin.

Mentionnons les bobinages imprimés, bien adaptés aux VHF et UHF, pour des valeurs de 30 nH à quelques μ H.

6.6 Le choix du fil à employer

C'est une question importante et elle peut faire hésiter beaucoup de constructeurs débutants.

Quelles sont les qualités demandées?

Faible résistance ohmique en HF

Qualité de l'isolation électrique

Rigidité mécanique ou au contraire souplesse

De plus, la section du fil devra être dimensionnée pour pouvoir supporter le courant HF ou BF.

Là encore, c'est la fonction de la bobine qui fera opter pour tel ou tel fil:

6.6.1 Fonction d'arrêt et bobines d'accord de réception

Comme c'est ωL qui est intéressant pour la fréquence considérée, il faudra obtenir un coefficient de self induction L le plus grand possible qu'on obtiendra pour bloquer de la HF avec du fil divisé (voir théorie plus loin) isolé soie enroulé en nid d'abeilles, on obtient alors les fameuses selfs d'arrêt, type National R 100 2,5m Henrys qui conviennent bien pour la gamme HF. Le fil divisé appelé aussi fil de Litz est principalement utilisé pour réduire les pertes dues à l'effet pelliculaire que nous examinerons plus loin. Il se compose d'un grand nombre de fils de cuivre émaillés de très faible diamètre et torsadés d'une façon particulière qui vise à empêcher qu'un brin ne reste constamment dans le voisinage de l'axe du conducteur, ce qui augmenterait les pertes. Les avantages du fil divisé par rapport à un fil unique sont appréciables tant que la fréquence est inférieure à

$$f_s = \frac{25,5}{B d^2 \sqrt{N}} \text{ et } B = \frac{d \sqrt{N}}{Y}$$

d: diamètre d'un brin en mm

f_s : fréquence limite en kHz

N: nombre de brins

Y: pas de la torsade en mm

Pratiquement ce genre de fil n'est plus utilisé pour des fréquences supérieures à 15 MHz.

Pour nous amateurs, disons qu'il convient très bien pour confectionner des bobinages d'accord et d'oscillation pour les bandes 3,5 - 7 - 10 - 14

que cela soit sous forme de nid d'abeilles ou de bobinages, type cylindrique à spires jointives multicouches. On obtient ainsi des bobinages peu encombrants avec les coefficients de self induction requis. Ce fil convient aussi parfaitement pour des bobinages multicouches sur mandrins torroïdaux.

Dans tous ces cas, on aurait eu plus de pertes en employant du fil émaillé en spires jointives ou multicouches.

Où peut-on le trouver?

Démontez n'importe quel récepteur si possible assez ancien, vous trouverez toujours ce fameux fil. Dans les récepteurs modernes, on le trouve sur l'antenne ferrite incorporée.

Il reste naturellement les fournisseurs professionnels Huber Suhner. Par exemple à Pfäffikon qui a quelques types de fil de Litz dans son programme.

6.6.2 Bobines d'accord de puissance HF

Nous allons tout d'abord examiner l'effet pelliculaire. Un courant de haute fréquence ne circule pas avec la même densité de courant sur tout le section du conducteur, cette densité sera plus élevée à la périphérie de la section qui forme une pellicule d'épaisseur. Dès lors, l'échauffement du fil est plus grand lorsqu'il est parcouru par un courant de haute fréquence que s'il l'est par un courant continu. In en est de même de sa résistance. Ce phénomène est appelé effet pelliculaire ou Kelvin.

Il en résulte qu'il vaut mieux utiliser un fil d'un diamètre suffisant disons au moins 1,5mm, compte tenu des courants HF qui peuvent prendre de fortes valeurs.

Le fil de cuivre émaillé utilisé pour les bobinages de transformateur convient très bien. Il est disponible dans tous les diamètres (on peut utiliser du fil d'installation \varnothing 3 mm que l'on argentera).

Conclusions

Après ce long tour d'horizon non exhaustif, nous espérons avoir répondu à quelques questions que se posent les réalisateurs.

Bibliographie

Calculs et réalisations des transformateurs de Ch. Guibert F3LG, Société des éditions radio

Transformateurs et selfs de filtrage de L. L'Hopital, Editions Techniques et Scientifiques Françaises

L'émission et réception d'amateur de R. Raffin, F3AV, son chapitre 7 consacré aux bobinages, Editions Techniques et Scientifiques Françaises