

Self à air à circuit magnétique ouvert

1) Définition

Il s'agit des selfs que l'on peut obtenir en bobinant un fil gainé d'isolant sur un mandrin lui aussi isolant.

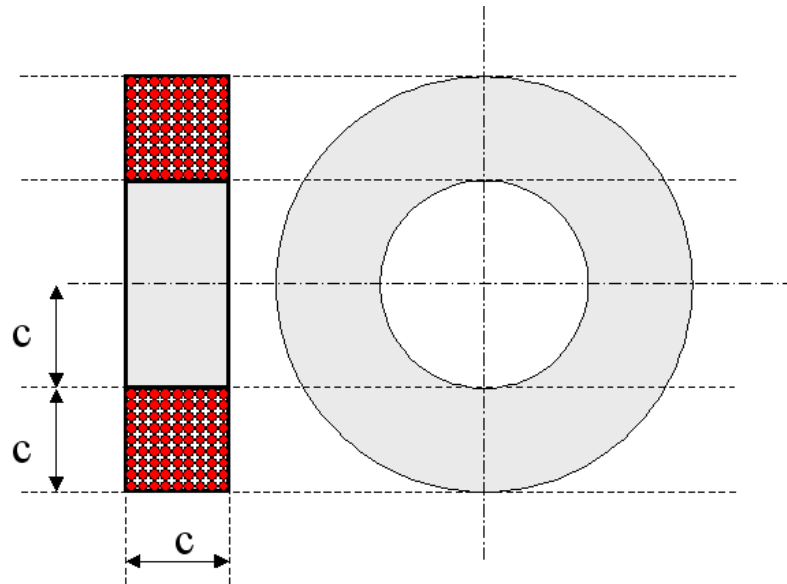
Il existe de nombreuses formes, bobines longues type solénoïde, bobines courtes, type cadre qui ont bien sûr chacune leur formule plus ou moins complexe.

La question qui est posée est de savoir quelle est la forme la plus favorable, c'est à dire celle qui pour la valeur de self dont nous avons besoin utilise le moins de cuivre, donc qui a la résistance la plus faible possible. (et devrait être la moins chère possible)

Le calcul de cet optimum a été réalisé par un américain nommé Brooks en ... 1931. La self en question porte son nom et c'est à elle que nous allons nous intéresser .

Une telle self est un bobinage dont la section est carrée et dont le diamètre extérieur est égal au double du diamètre intérieur.

Un petit dessin:



2) Données physiques:

Pour éviter les erreurs, on ne travaillera qu'en unités SI, c'est à dire que les longueurs sont en mètres, les selfs en henrys, les masses en kg et les inductions en teslas.

Nous avons besoin de connaître la puissance admissible en régime permanent du HP associé, son impédance nominale et sa puissance crête.

Nous devons aussi choisir un fil :

Pour un cuivre à 99,9 %, la nuance ISO CU_ETP convient. La présence ou non d'oxygène n'a aucune importance.

Sa résistivité à 20°C est:

$$\rho_{cu} := 1.7241 \cdot 10^{-8} \text{ (}\Omega\text{m)} \quad \text{Son coefficient de température est :} \quad k_{tcu} := 3.9 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Densité} \quad D_{cu} := 8890 \quad \text{kg/m}^3$$

Exemple choisi:

Self filtre de 5 mH alimentant un HP défini à 80 W 8 Ω en régime permanent

Le régime crête est estimé à 400 W , mais il n'intervient pas dans ce calcul

Pour avoir des températures raisonnables on prendra une densité de courant de 5 A/mm² . Si on arrive à une résistance trop forte on pourra la réduire. En SI, ça donne:

$$\delta_{cu} := 5 \cdot 10^6 \quad (\text{A/m}^2)$$

On a : $P_{hp} := 80$ (W) $P_{hp_crete} := 400$ (W) $Z_{hp} := 8$ (Ω) Température max : 150°C, soit $\Delta t := 130$

Soit la valeur de self que nous voulons obtenir, en henrys:

$$L_s := 5 \cdot 10^{-3}$$

Dans cet exemple, 5 mH

Courant thermique : $I_{th} := \sqrt{\frac{P_{hp}}{Z_{hp}}}$ $I_{th} = 3.162$

Section fil : $S_{fil} := \frac{I_{th}}{\delta_{cu}}$ $S_{fil} = 6.325 \times 10^{-7}$ $\text{Diamètre} := 2 \cdot \sqrt{\frac{S_{fil}}{\pi}}$ $\text{Diamètre} = 8.974 \times 10^{-4}$

Dimensions :

D'abord le côté, nommé c sur le dessin:
(on utilisera la formule de Brooks)

$$cs := 13.14 \cdot L_s^{0.2} \cdot \text{Diamètre}^{0.8}$$

$$cs = 1.663 \times 10^{-2}$$

Nombre de spires: $N_s := \left(\frac{cs}{\text{Diamètre}} \right)^2$

$$N_s = 343$$

Longueur de fil :

$$\text{Long} := 3 \cdot cs \cdot N_s \cdot \pi$$

$$\text{Long} = 53.8$$

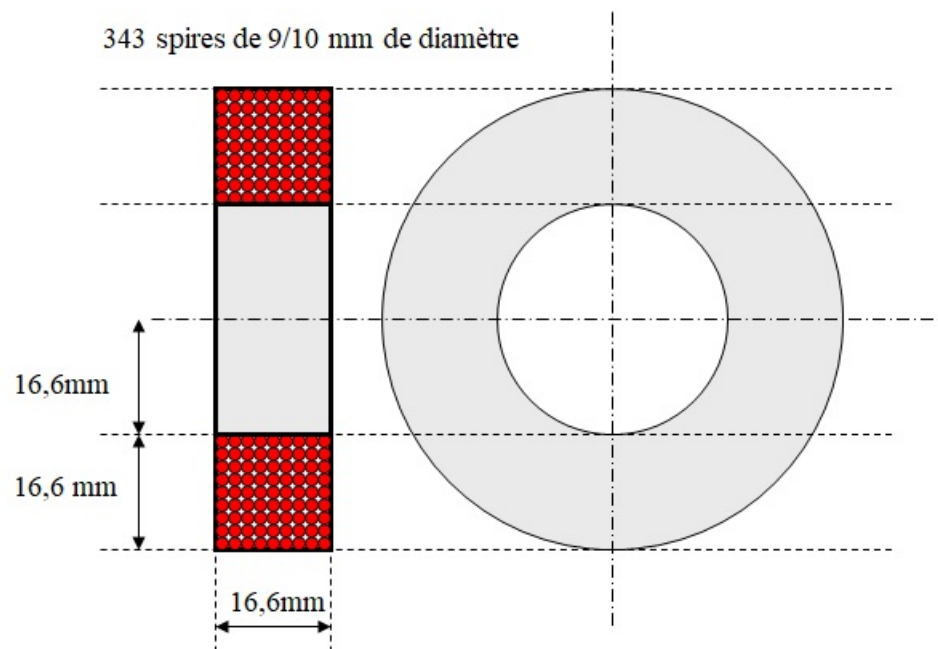
(m)

Poids: $P_s := \pi \cdot \frac{\text{Diamètre}^2}{4} \cdot \text{Long} \cdot \text{Dcu}$ Ps = 0.302 (kg)

Résistance : $R_s := \rho_{cu} \cdot \frac{4 \cdot \text{Long}}{\pi \cdot \text{Diamètre}^2}$ Rs = 1.466 (Ω) Afroid

$R_{sc} := \rho_{cu} \cdot (1 + k_{tcu} \cdot \Delta t) \cdot \frac{4 \cdot \text{Long}}{\pi \cdot \text{Diamètre}^2}$ Rsc = 2.209 Ω A chaud

Fig 2



4) Discussion

4_1) Avantages:

Ce type de self présente l'avantage de la simplicité, aussi bien au niveau du calcul que de la réalisation.

En effet, c'est un des rares cas où on dispose d'une formule qui permet de calculer la géométrie directement à partir du cahier des charges. En règle générale, on a plutôt des formules qui permettent de calculer la valeur de la self à partir de la géométrie et il faut opérer par itérations.

Pour fabriquer, il suffit de réaliser une carcasse (carton ou PVC) collée et de bobiner en respectant une certaine traction du fil. C'est facile pour les chanceux qui ont un tour à disposition, sinon on peut facilement bricoler ça avec une perceuse et quelques serre-joints.

On peut si on veut immobiliser les spires avec une imprégnation type époxy (Araldite par ex.) L'imprégnation vide et pression parfois proposée ne présente ici aucun intérêt.

Le coût n'est pratiquement que celui du fil émaillé qu'il faut savoir trouver. Il y en a chez certains revendeurs (Conrad et d'autres), mais à des prix stratosphériques. Le mieux est de trouver un atelier de rebobinage moteurs et de le convaincre d'accepter de vous en revendre une bobine. Si le gars est sympa, ça marche. Sinon, voir chez un grossiste.

S'agissant d'une self à air, l'induction peut être aussi élevée que l'on veut sans risquer de saturation et tous les effets non linéaires, donc les distorsions qui vont avec.

4_2) Inconvénients:

Justement parcequ'il s'agit de selfs à air, milieu de faible perméabilité magnétique, il faut beaucoup de spires, donc beaucoup de cuivre pour obtenir une valeur donnée. Ce qui fait qu'il est difficile et cher dans cette techno de faire des résistances basses pour peu que la self soit un peu élevée.

L'inconvénient le plus grave est que ces selfs ayant un circuit magnétique ouvert rayonnent un champ dont l'amplitude peut être encore élevé, même assez loin.

Ceci est gênant s'il y a des parties métalliques dans le voisinage dont la résistance et/ou la perméabilité vont modifier, voire partiellement court-circuiter la self, de plus si c'est un matériau ferreux réintroduire les non linéarités qu'on avait justement voulu éviter.

Encore plus embêtante est la présence des conducteurs ou d'autres selfs de même nature qui vont se trouver couplées (chaque ensemble self/conducteur ou self/self constitue un transformateur). Dans le cas d'un filtre multi voies, on risque ainsi de modifier les coupures et les pentes voulues. On recommande dans ce cas de disposer les axes des selfs selon des directions orthogonales, ce qui ne règle pas entièrement le problème, les lignes de champ n'étant pas parallèles et il y a toujours un couplage résiduel.

Essayons d'évaluer le couplage de deux bobines. En général, ce calcul de couplage est intordable à la main. Je vais donc tricher de la manière suivante:

On va supposer qu'on dispose à une certaine distance, disons 10 cm, deux selfs identiques telle que celle calculée plus haut et qu'elles ont des axes parallèles ce qui est le pire. En pratique dans un filtre, les selfs sont différentes et on les met perpendiculaires. Mais ce cas général n'est pas calculable à la main et demande une approche en éléments finis en 3 D. Donc mon calcul correspond à un "worst case".

$$\text{Dist} := 0.1 \quad (10 \text{ cm}) \quad \alpha := \frac{\text{Dist}}{cs} \quad \alpha = 6.015 \quad k := 0.025 \quad (\text{selon tableau calculé par Brooks})$$

La mutuelle de couplage est donc: $M := k \cdot L_s \quad M = 1.25 \times 10^{-4} \quad (97,5 \mu\text{H})$

Ce qui revient à dire que, à fréquence égale, 2,5% de la tension de chaque self se trouve ajoutée à l'autre (et réciproquement)

Nota :Le calcul d'une self à partir de sa géométrie suppose l'intégration des lignes de champ magnétique dans tout le volume alentour en principe jusqu'à l'infini. Ce qui suppose au minimum une belle intégrale triple que le père Brooks s'est offerte à la mimine!
C'est pour ça que pour une fois on ne s'amusera pas à recalculer ses formules

5) Bibliographie et liens:

Les formules utilisées ici ont été extraites de :
"Inductance calculations" par Frederick W. GROVER
Dover publications Inc. N.Y. 1946

Infos en ligne :
http://info.ee.surrey.ac.uk/Workshop/advice/coils/air_coils.html

Calculateurs en ligne:
<http://www.nessengr.com/techdata/brooks/brooks.html>
http://www.circuits.dk/calculator_multi_layer_aircore.htm

Programme de calcul:
http://www.kxcad.net/ansys/ANSYS/ansyshelp/Hlp_G_LOF_MMFdis.html