Laboratori Nazionali di Frascati

LNF - 53/29
8.7.1953.

G. Sacerdoti: CONSIDERAZIONI SULL'EFFETTO DELLE CORRENTI PARASSITE DELLA DONUT PER QUEL CHE RIGUARDA LA DEFORMAZIONE DEL CAMPO MAGNETICO.-

CONSIDERAZIONI SULL'EFFETTO DELLE CORRENTI PARASSITE DELLA DONUT PER QUEL CHE RIGUARDA LA DEFORMAZIONE DEL CAMPO MAGNETICO $(n = n(rt))$. ==================

1a) Facciamo l'ipotesi che l'effetto della metallizzazione della donut sia equivalente, agli effetti della deformazione del campo magnetico, a quello di una lastra metallica di spessore 2δ ove δ è lo spessore della metallizzazione della donut, di resistività $\rho = \rho$ del materiale metallizzante la donut e di larghezza = Δr (larghezza radiale della donut) posta nella mezzaria dell'interferro.

Si cerca la deformazione del campo magnetico quando l'eccitazione del magnete ha andamento sinusoidale. Si trascurano i fenomeni di isteresi e la piccola deformazione del profilo dei poli necessaria a produrre la variazione teorica radiare di $B(r)$.

Precisiamo che a noi interessa soprattutto stabilire lo sfasamento del campo magnetico nei vari punti di un raggio e non stabilire la variazione nel modulo del campo stesso; una variazione del modulo $B(r)$ dovuta alle correnti di Faucault oltre che richiedere vincoli meno gravi di quelli necessari a limitare lo sfasamento tollerabile, può essere compensato in modo abbastanza semplice diminuendo l'intraferro (cioè la riluttanza) dove le amperspire di eccitazione siano diminuite di quelle di reazione di Faucault. Lo sfasamento con una opportuna sagomatura di poli non può essere modificato sensibilmente. Per vedere come lo sfasamento abbia importanza chiamiamo B_1 e B_2 i vettori B sul raggio medio R_m della donut e sul raggio,periferico interno. Ammettiamo che sagomando opportunamente i poli sia

$$\frac{|B_1|}{|B_2|} = \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^{n}$$

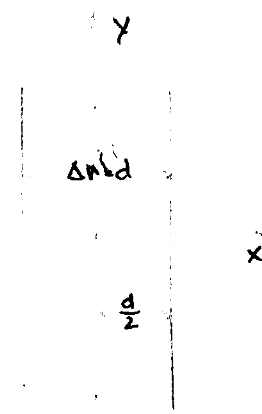
e che variino sinusoidalmente sfasati di φ.

$$B_1 \operatorname{sen} \omega t = B_1$$

$$B_2 \operatorname{sen}(\omega t + \varphi) = B_2$$

Esaminiamo ~~vedere~~ il rapporto tra i valori effettivi al tempo $t = 0$ o in prossimità di esso. Vediamo che affinchè B_1/B_2 acquisti un valore che rientri nella tolleranza consentita $\left[n(tr)^{-media}\right.$ raggiunga un valore prossimo a $\left.2/3\right]$ bisogna che passi un tempo abbastanza notevole $(\omega t = 6 \div 10\varphi)$, e cioè possiamo introdurre elettroni solo quando B_2 ha raggiunto valori abbstanza grossi e cioè dovremmo introdurre elettroni a molto forte energia.

Nei calcoli si è ottenuto lo sfasamento tra B periferico e B nel raggio medio e quindi il massimo sfasamento $\varphi_{21} = \widehat{B(r_1)\,B(r_2)}$ essendo ω bassa = 120 e r=0,15m: ci siamo poste nelle condizioni peggiori:



Per la soluzione prodediamo come segue: chiamiamo

$u(x)$	= densità di corrente
δ	= spessore della lamina; ρ = resistività del metallo
A	= amperspire di eccitazione
$B(x)$	= campo magnetico
$u(x)\,\delta\,dx$	= corrente nella lamina del tratto dx
h	= spessore dell'intraferro
$d = \Delta r$	= larghezza della donut
l	= lunghezza azimutale del tratto di donut metallizzato (l e R sufficientemente grandi da poter considerare le cotrenti dirette secondo l).

Sarà allora

$$\rho\, u(x) = \frac{d}{dt}\int_0^x B(x,t)\,dx \qquad\qquad \frac{h}{\mu_0}B(x) = A - \int_x^{\frac{d}{2}} u(x)\,\delta\,dx$$

Da cui derivando e sostituendo

$$\frac{\rho h}{\mu_0 \delta} B''_x(x) = B'_t(x\,t)$$

Col calcolo simbolico si ha

$$B(x)\,\frac{j\omega\mu_0\delta}{\rho h} = B''(x) \qquad\qquad \sqrt{\frac{j\omega\mu_0\delta}{\rho h}} = \frac{1+j}{\sqrt{2}}\sqrt{\frac{\omega\mu_0\delta}{\rho h}}$$

da cui

$$B(x) = A_1\, e^{(1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu_0\delta}{2\rho h}}\,x} + A_2\, e^{-(1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu_0\delta}{2\rho h}}\,x}$$

Per ragioni di simmetria $A_1 = A_2$

$$B(x) = A_1\left[e^{(1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu_0\delta}{2\rho h}}\,x} + e^{-(1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu_0\delta}{2\rho h}}\,x}\right]$$

Potrei determinare A tenendo presente che per $x = \frac{d}{2}$ $B = \frac{NI}{h}\mu_0$ e $\varphi = \widehat{B(2)\,B(0)}$

Non ne ho però bisogno per trovare $\frac{|B(2)|}{|B(0)|}$.

1b) Sostituendo i valori numerici si ha

$\omega = 2\pi f = 126$ $\qquad \mu_0 = 1{,}256\cdot 10^{-6}$ $\qquad h = 0{,}07$ $\qquad \rho = 2\times 10^{-7}$

$\delta = 3\,10^{-5}$ m. (che certamente è un limite inferiore alla spessore della ciambella di acciaio).

$\frac{d}{2} = 0{,}075$ $\qquad \frac{B(\frac{d}{2})}{A_1} = e^{\frac{1}{2{,}38}0{,}075}\, e^{j\frac{1}{2{,}38}0{,}075} + e^{-\frac{1}{2{,}38}0{,}075}\, e^{-j\frac{1}{2{,}38}0{,}075}$

$$e^{0{,}0315}\, e^{j0{,}0315} + e^{-0{,}0315}\, e^{-j0{,}0315} = 1{,}99994 + j\,0{,}0020$$

$e^{0{,}0315} = 1 + 0{,}0315 + \frac{(0{,}0315)^2}{2} + \frac{(0{,}0315)^3}{6}$

$e^{0{,}0315} = 1{,}0319901$ $\qquad e^{-0{,}0315} = 0{,}969$

$e^{j\,0{,}0315} = 0{,}999\,515 + j\,0{,}031495$

$\frac{B(o)}{A_1} = 2 + j0$

$tg\,(\vec{B}(\frac{d}{2}) - \vec{B}(o)) \simeq 10^{-3}$ radianti $= \varepsilon$

Ammettiamo che per $\omega t \geq 10\varepsilon$ la perturbazione di fase del campo magnetico diventi tollerabile. Noi vediamo che per soddisfare questa disuguaglianza dobbiamo iniettare a un valore del campo relativamente alto. Infatti dovrà essere $B_i \geq B_{max}\frac{10}{1000} = 100$ gauss se $B_{max} = 10.000$ gauss. In buona approssimazione, dato che nel nostro caso $\omega t << \frac{\pi}{2}$, si può ritenere che $\frac{\varepsilon}{\omega t}$ indica direttamente la perturbazione provocata dal campo magnetico dovuta allo sfasamento.

Facciamo ora qualche considerazione sugli spessori di metallizzazione con i quali una ciambella di isolante può venir ricoperta. Si abbia una ciambella ricoperta da uno strato di 4μ fatto con materiale di resistività $\rho = 0{,}6\cdot10^{-4}\,\Omega m$. Si ha $\frac{\rho}{\delta} = 15$ e quindi svolgendo i calcoli come svolti precedentemente $tg\,\varepsilon = 4{,}25\cdot10^{-7}$ Il che significa che un campo di iniezione di 40 gauss viene deformato per meno del $\frac{10'000}{40}\cdot 4{,}25\times10^{-7} \cong 10^{-2}\%$ cioè di 4×10^{-3} gauss.

Riassumendo i risultati dei due calcoli si ha:

$tg\,(\vec{B}(\frac{d}{2}) - \vec{B}(o)) = 10^{-3}$ per δ (spessore metallizzazione della donut) $= 3\times10^{-5}$ mm
e per ρ (resistività metallizzazione) $= 2\times10^{-7}\,\Omega m$

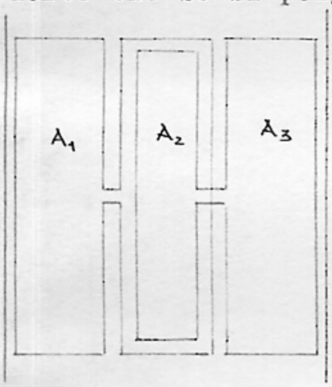
$tg\,(\vec{B}(\frac{d}{2}) - \vec{B}(o)) = 4{,}25\times10^{-7}$ per $\delta = 4\mu$ e per $\rho = 0{,}6\times10^{-4}\,\Omega m$.

Tenendo presente che $\varphi = \vec{B}(\frac{d}{2}) - \vec{B}(o)$ è funzione crescente di $\frac{\delta}{\rho}$ il primo calcolo ci dice che è impossibile costruire donut d'acciaio, che per ragioni di resistenza meccanica richiederebbero certo spessori maggiori di 1 mm, essendo che già spessori di 3/100 di mm provocano sfasamenti che deformano il campo all'inieizione (20-60 gauss) in modo intollerabile.

Il secondo calcolo ci dice che metallizzazioni di spessori $\frac{1}{2}\delta = 2\mu$ producono sfasamenti di nessun peso agli effetti della deformazione del campo.

Eventualmente per costruire donut in acciaio bisogna correggere con bobine eccitate esternamente la deformazione del campo dovuta allo sfasamento provocato dalle correnti di Faucault.

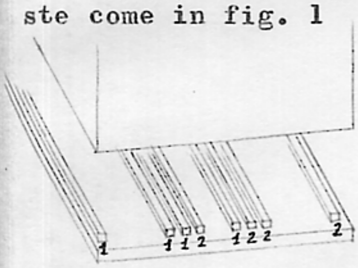
2a) Possiamo provare a vedere se con bobine compensatrici di dimensioni tollerabili con le dimensioni della gap si può autocompensare la distorsione. E' evidente che se si pongono (siamo sempre nelle condizioni di interferro costante e

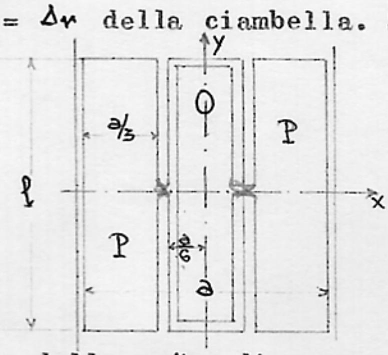


mutata mutandis ciò che si dice può essere applicato ad intraferro leggermente variabile) due spire di R=0 come in fig. 2 e siano $A_1 = A_2 = A_3$ (aree abbracciate dalle spire) allora necessariamente la B media di A_1, A_2, A_3 sarà uguale; si ha cioè una compensazione.

Ora ci proponiamo di vedere l'effetto regolatore di spire di resistenza non nulla. La sezione delle spire verrà fatta più grande possibile. Non ci preoccupiamo assolutamente per ora della precisione con cui si possono fissare questi avvolgimenti, essendo un problema della cui soluzione ci preoccuperemo in un secondo tempo.

Chiamiamo a la larghezza = Δr della ciambella. Siano le due spire disposte come in fig. 1





Sia $l \gg a$. Sia il conduttore delle spire di rame e di sezione 10x1 millimetri quadri. L'intraferro si assuma costante e la superficie metallica sia di spessore

$\frac{\delta}{2}$. Essendo due le superficie della donut normali all'induzione B agli effetti delle correnti, ne possiamo sostituire una equivalente di dimensioni $\delta \times a \times \ell$. Alle due coppie di spire affacciate alla due superficie metalliche possiamo sostituire un'unica coppia posta sulla superficie equivalente con conduttore di sezione 10x2 millimetri.

Per ragioni di simmetria dovrà essere $I_1 = I_2$, cioè le correnti che scorrono nelle due spire devono essere istante per istante uguali. Il campo magnetico, per quel che abbiamo visto precedentemente, dovrà avare la espressione nella zona indicata con O per ragioni di simmetria:

$$B_o = B_1 \left[e^{(1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu_o\delta}{2\rho h}}x} + e^{-(1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu_o\delta}{2\rho h}}x} \right]$$

Nella zona indicata con P invece:

$$B_p(x) = B_2\, e^{(1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu_o\delta}{2\rho h}}x} + B_3\, e^{-(1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu_o\delta}{2\rho h}}x}$$

Per determinare le costanti B_1, B_2, B_3 possiamo scrivere:

I°) $B_p\left(\frac{a}{6}\right) - B_o\left(\frac{a}{6}\right) = \frac{-3 I_A}{h}\mu_o$

II°) $B_p\left(\frac{a}{2}\right)\frac{h}{\mu_o} = N I_e - I_s$ $\quad$ I_e = corrente di eccitazione esterna

III°) $\left(\frac{d B_p\left(\frac{a}{6}\right)}{dx}\right)_- = \left(\frac{d B_o\left(\frac{a}{6}\right)}{dx}\right)_+$ $\quad$ (ciò che è determinato dal fatto che la densità di corrente nella lamina è una funzione continua anche in $\frac{a}{6} = x$)

IV°) $I_s R = j\omega \ell \left[\int_{\frac{a}{6}}^{\frac{a}{2}} B_p\, dx - 2\int_0^{\frac{a}{6}} B_o\, dx \right]$

Per scrivere queste relazioni abbiamo bisogno di conoscere le espressioni di:

$$\frac{dB_p}{dx} = (1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu_o\delta}{2\rho h}}\left[B_2\, e^{(1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu_o\delta}{2\rho h}}x} - B_3\, e^{-(1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu_o\delta}{2\rho h}}x}\right]$$

$$\frac{dB_o}{dx} = B_1(1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu_o\delta}{2\rho h}}\left[e^{(1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu_o\delta}{2\rho h}}x} - e^{-(1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu_o\delta}{2\rho h}}x}\right]$$

$$\int B_p\, dx = \frac{B_2}{1+j}\sqrt{\frac{2\rho h}{\omega\mu_o\delta}}\, e^{(1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu_o\delta}{2\rho h}}x} - \frac{B_3}{1+j}\sqrt{\frac{2\rho h}{\omega\mu_o\delta}}\, e^{-(1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu_o\delta}{2\rho h}}x}$$

$$\int B_o\, dx = B_1\left[e^{(1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu_o\delta}{2\rho h}}x} - e^{-(1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu_o\delta}{2\rho h}}x}\right]\frac{1}{1+j}\sqrt{\frac{2\rho h}{\omega\mu_o\delta}}$$

$$R = \frac{\rho\ell}{S} = \frac{10^{-2}\, 1{,}75\; 4\ell}{20} = 3{,}5\times10^{-3}\ell\ \Omega$$

R = resistenza dell'avvolgimento

2b) Calcolo numerico:

$\omega = 126 \qquad \mu_0 = 1{,}256 \cdot 10^{-6} \qquad \delta = 1\,mm = 10^{-3}\,m \qquad \rho = 2\,10^{-7}$

$h = 0{,}07 \qquad \frac{a}{2} = 0{,}075$

Da cui:

$$\sqrt{\frac{\omega\mu_0\delta}{2\rho h}} = 2{,}34$$

$$e^{(1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu_0\delta}{2\rho h}}\frac{a}{2}} = 1 + (1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu_0\delta}{2\rho h}}\frac{a}{2} + \frac{1}{2}(1+j)^2\frac{\omega\mu_0\delta}{2\rho h}\frac{a^2}{4} + \frac{1}{6}(1+j)^3\left(\sqrt{\frac{\omega\mu_0\delta}{2\rho h}}\right)^3\frac{a^3}{8} =$$

$$= 1 + (1+j)\,0{,}1755 + 2j\,10^{-4}\frac{310}{2} + 2(j-1)\,10^{-6}\frac{5421}{6} =$$

$$= 1{,}1753193 + j\,0{,}2066807\,.$$

Analogamente calcolati si trovano i valori delle seguenti espressioni:

$$e^{-(1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu_0\delta}{2\rho h}}\frac{a}{2}} = 0{,}8248607 - j\,0{,}1446807$$

$$e^{(1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu_0\delta}{2\rho h}}\frac{a}{6}} = 1{,}0\cancel{58}433 + j\,0{,}0619969$$

$$e^{-(1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu_0\delta}{2\rho h}}\frac{a}{6}} = 0{,}9415669 - j\,0{,}0551369$$

Si ottiene perciò

$$B_p\left(\frac{a}{6}\right) = B_2\left(1{,}0584331 + j\,\overset{0{,}0619969}{\cancel{\phantom{0{,}0000000}}}\right) + B_3\left(0{,}9415669 - j\,0{,}0551369\right)$$

$$B_0\left(\frac{a}{6}\right) = B_1\left(2 + j\,0{,}00686\right)$$

$$\frac{\mu_0}{h} = 1{,}795\cdot 10^{-5}$$

La relazione I°) in cifre diventa:

$$B_2(2 + j\,0{,}00686) = B_2(1{,}0584331 + j\,0{,}0619969) + B_3(0{,}9415669 - j\,0{,}551369) + 3I_s\,1{,}795\cdot 10^{-5}$$

La relazione II°) in cifre diventa:

$$B_2(1{,}1753193 + j\,0{,}2066807) + B_3(0{,}8246807 - j\,0{,}1446807) =$$

$$= N I_e\,10^{-5}\,1{,}795 - I_s\,10^{-5}\,1{,}795\,.$$

$$\sqrt{\frac{2\rho h}{\omega\mu_0\delta}} = 0{,}4274$$

~~Da cui~~: Sarà pure;

$$\int_0^{\frac{a}{6}} B_0\,dx = \frac{B_1}{1+j}\,0{,}4274\left[1{,}0584331 + j\,0{,}0619969 - 0{,}9415669 + j\,0{,}0551369\right] =$$

$$= B_1\,0{,}2137(1-j)\left[0{,}1168662 + j\,0{,}1171338\right] = B_1\,0{,}2137\left[0{,}234 + j\,0{,}0002676\right]$$

$$\int_{\frac{a}{6}}^{\frac{a}{2}} B_p\,dx = \frac{B_2}{1+j}\,0{,}4274\,[1{,}1753193 + j\,0{,}2066807 - 1{,}0584331 - j\,0{,}0619969] -$$

$$-\frac{B_3}{1+j}[0{,}8246807 - j\,\overset{0{,}1446807}{\cancel{0{,}9415669}} - 0{,}9415669 + j\,0{,}0551369]\,0{,}4274 =$$

$$= \frac{B_2}{2}(1+j)\,0{,}4274\,[0{,}1168862 + j\,0{,}1446838] + B_3\,\frac{0{,}4274}{2}(1-j)[0{,}1168862 + j\,0{,}0895438] =$$

$$= B_2\,\frac{0{,}4274}{2}[0{,}261572 + j\,0{,}0277996] + B_3\,\frac{0{,}4274}{2}[0{,}20643 - j\,0{,}0273424]$$

La relazione III°) diventa:

$$3{,}5\times10^{-3}\,I_s = j\omega B_s\,\frac{0{,}4274}{2}[0{,}261572 + j\,0{,}0277996] + j\omega B_3\,\frac{0{,}4274}{2}[0{,}20643 - j\,0{,}0273424] -$$

$$- j\omega B_1\,0{,}4274\,[0{,}234 + j\,0{,}0002676]$$

$$\frac{3{,}5\times10^{-3}\,I_s}{126\times0{,}4274} = B_2[-0{,}0138998 + j\,0{,}130786] + B_3[0{,}0136712 + j\,0{,}103214] - B_1[j\,0{,}234 - 0{,}0002676] =$$

$$= 6{,}5\times10^{-5}\,I_s$$

La relazione IV°) diventa:

$$\frac{dB_0}{dx}\left(\frac{a}{6}\right) = B_1(1+j)\,2{,}34\,[0{,}1168662 + j\,0{,}1171376] = B_1\,2{,}34\,[-0{,}0002676 + j\,0{,}234] =$$

$$= \frac{dB_p}{dx}\left(\frac{a}{6}\right) = B_2(1+j)\,2{,}34\,[1{,}0584331 + j\,0{,}0619969] - B_3(1+j)\,2{,}34\,[0{,}9415669 - j\,0{,}0551369] =$$

$$= B_2(0{,}9974362 + j\,1{,}12043)\,2{,}34 - B_3\,2{,}34\,(0{,}997038 + j\,0{,}88643)$$

$$B_1(-0{,}0002676 + j\,0{,}234) = B_2(0{,}9964362 + j\,1{,}12043) - B_3(0{,}9967038 + j\,0{,}88643)$$

Dalla terza otteniamo:

$$3\,I_s\,1{,}795\times10^{-5} = \frac{3\cdot1{,}795}{6{,}5}\,10^{-5}\,6{,}5\,I_s = 0{,}827\,B_2(-0{,}138998 + j\,0{,}130786) +$$

$$+ B_3(0{,}0136712 + j\,0{,}103217]\,0{,}827 - B_1(j\,0{,}234 - 0{,}0002676)\,0{,}827$$

Sostituendo nella I°):

$$B_1(2 + j\,0{,}00686) = B_2(1{,}0584331 + j\,0{,}0619969) + B_3(0{,}9415669 - j\,0{,}0551369) +$$

$$+ \frac{0{,}827}{R/R_0}\,B_2(-0{,}0138998 + j\,0{,}130786) + \frac{B_3\,0{,}827}{R/R_0}(0{,}0136712 + j\,0{,}103217) -$$

$$- \frac{0{,}827}{R/R_0}\,B_1(j\,0{,}234 - 0{,}0002676)$$

$$\frac{R}{R_0} = \frac{\text{resistenza delle spira}}{\text{resistenza della spira presa in principio dei calcoli}}$$

Riportiamo la IV°):

$$B_1(-0{,}0002676 + j\,0{,}234) = B_2(0{,}9964362 + j\,1{,}12043) - B_3(0{,}9967038 + j\,0{,}88643)$$

Non ci interessano i valori $B_1 B_2 e B_3$ ma solo $\frac{B_2}{B_1}$ e $\frac{B_3}{B_1}$ per stabilire lo sfasamento e il rapporto tra i moduli di B alla periferia ed al centro. Da cui possiamo far uso all'uopo solo della I°) e della IV°) relazione stabilita. Diamo a B_1 il valore 1 quindi $B(o) = 2 + j0$. L'influenza della spira è data dai termini della I°) moltiplicati per 0,827.

Se R = ∞ quei termini scompaiono e la spira è come se non ci fosse.

Se R = 0 la regolazione è completa.

Noi vediamo che la Ia equazione viene modificata di poco dalla presenza della spira che noi abbiamo posto e possiamo pensare che la $\frac{B(\frac{a}{2})}{B(o)}$ siano poco diversi da quelli che si avessero senza spira.

Per evitare la moltiplicazione per il fattore 0,827 poniamo di modificare la sezione del rame di quel tanto da far sì che detto fattore raggiunga l'unità, e cerchiamo la soluzione in tali condizioni.

La I°) diventa:

$$B_1[1{,}99973 + j0{,}21086] = B_2(1{,}0447333 + j0{,}1927829) + B_3(0{,}9552381 + j0{,}0480801)$$

$$B_1(-0{,}0002676 + j0{,}234) = B_2(0{,}9964362 + j1{,}12043) - B_3(0{,}9967038 + j0{,}88643)$$

Se $B_1 = 1$ $$\frac{-0{,}0002676 + j0{,}234 + B_3(0{,}9967038 + j0{,}88643)}{0{,}9964362 + j1{,}12043} = B_2$$

$$1{,}9997324 + j0{,}24086 = \frac{-0{,}0002676 + j0{,}234}{0{,}9964362 + j1{,}12043}(1{,}0447333 + j0{,}1927829) +$$

$$+ B_3\left[\frac{0{,}9967038 + j0{,}88643}{0{,}9964362 + j1{,}12043}(1{,}0447333 + j0{,}1927829)\right] + 0{,}9352381 + j0{,}0480801$$

$$\frac{(-0{,}0002676 + j0{,}234)(0{,}9964362 - j1{,}12043)}{2{,}2482489} = 0{,}116496 + j0{,}103843$$

$$\frac{(0{,}9967038 + j0{,}88643)(0{,}9964362 - j1{,}12043)}{2{,}2482489} = 0{,}8835 - j0{,}103843$$

$$B_3 = \frac{1{,}8981426 + j0{,}10905}{1{,}898413 + j0{,}10394} = 0{,}9976 + j0{,}003153$$

$$B_2 = \frac{-0{,}0002676 + j0{,}234 + (0{,}9976 + j0{,}00315)(0{,}9967038 + j0{,}88643)}{0{,}9964362 + j1{,}12043} = 0{,}999 - j0{,}0012$$

$$B\left(\tfrac{a}{2}\right) = (0{,}9976 + j0{,}003153)(0{,}8246807 - j0{,}1446807) + (0{,}999 - j0{,}0012)(1{,}1753193 +$$

$$+ j0{,}2066807) = 1{,}99670 + j0{,}06322.$$

Se non ci fosse la spira lo sfasamento sarebbe leggermente minore:

$B\left(\frac{a}{2}\right) = 1{,}999 + j\,0{,}0620$. La spira modifica pochissimo la situazione.

Dal calcolo eseguito si può vedere come quattro spire ad otto, a sezione di dimensioni ragionevoli (2×10 mm^2) non correggono pressochè niente lo sfasamento dei campi magnetici provocato dalle correnti di Faucault. In fatti è in presenza delle spire (donut di spessore 1 mm) $B\left(\frac{a}{2}\right) = 1{,}9967 + j\,0{,}06322$ $\quad B(0) = 2$

senza la spira $B\left(\frac{a}{2}\right) = 1{,}999 + j\,0{,}0620$ $\quad B(0) = 2$

Quindi con spire autocompensatrici non si riesce a correggere in alcun modo l'inconveniente dello sfasamento.

3a) Riguardo alla possibilità di realizzare una armatura della donut in acciaio smaltato possiamo rispondere affermativamente. Però in tal caso bisogna avere l'avvertenza di evitare contatti tra fili trasversali e longitudinali, poichè tali contatti provocherebbero la formazione di circuiti chiusi su flusso variabile non nullo, la presenza dei quali sarebbe causa di perturbazioni del campo nell'intraferro la cui tollerabilità andrebbe studiata caso per caso.

— o —

Sommario.-

1a) Si analizzano le deformazioni apportate dalle correnti di Faucault che si hanno nella parte metallica della donut di un sincrotrone. Si risolve il problema analiticamente.

1b) Con esempi numerici si dimostra che donut in acciaio non sono possibili poichè richiedono spessori molto sotto il millimetro e quindi troppo sottili; viceversa le ordinarie metallizzazioni di platino ($\rho = 0{,}6 \cdot 10^{-4}$) con spessori di alcuni μ producono sfasamenti tollerabilissimi anche all'iniezione.

2a) Si cerca se è possibile compensare gli sfasamenti dovuti alle correnti di Faucault di una lastra di 1 mm di spessore mediante spire autocompensatrici disposte ad otto di sezione avente dimensioni ragionevoli. Si impostano e si risolvono le equazioni.

2b) Si svolge il calcolo numerico e si conclude che poca influenza hanno le spire già menzionate in 2a), e quindi le difficoltà dovute allo sfasamento rimangono le stesse.

3a) Si esaminarapidamente la possibilità di una armatura con fili di acciaio di una donut di altro materiale non conduttore. A parte le possibilità tec niche, dal punto di vista della deformazione del campo per correnti di Fau cault se ne conclude che è possibile questa soluzione, purchè si evitino contatti tra fili trasversali e longitudinali.

Giancarlo Sacerdoti

--------- + ---------