

Capitolul 2. Materiale magnetice

2.1. Definiții și clasificări

Materialele magnetice se caracterizează prin stări de magnetizație. Starea de magnetizație este de natură atomică și este generată de mișcarea electronilor pe orbită și în jurul axei proprii, precum și de mișcarea nucleului în jurul axei proprii, rezultând momentele magnetice orbitale și de spin, a căror sumă reprezintă momentul magnetic elementar. Notăm cu $\Delta \bar{m} = \sum \bar{m}_i$ suma geometrică a momentelor elementare din unitatea de volum ΔV . Magnetizația \bar{M} , este definită prin relația:

$$M = \lim_{\Delta V} \frac{\Delta m}{\Delta V}, \quad (2.1)$$

și este o mărime microscopică, locală sau punctuală, care împreună cu intensitatea câmpului magnetic din punctul considerat, caracterizează starea materialului magnetic în punctul respectiv. Momentul magnetic m , este o mărime macroscopică sau globală, definită prin relația:

$$m = \int_{v_m} M dv, \quad (2.2)$$

unde: v_m este volumul materialului magnetic.

Starea de magnetizație care există în absența câmpului magnetic exterior H , se numește spontană sau permanentă \bar{M}_p , iar cea care rezultă ca efect al câmpului magnetic exterior, se numește temporară și are expresia:

$$\bar{M}_t = \chi_m \bar{H}, \quad (2.3)$$

unde: χ_m este o mărime complexă caracteristică materialului și reprezintă susceptivitatea magnetică. Pentru dielectricii izotropi liniari, este constantă, iar pentru cei neliniari, este dependentă de câmpul magnetic H . Susceptivitatea magnetică a materialelor magnetice anizotrope, este un tensor, fiecare componentă a magnetizației temporare depinzând de toate componentele câmpului magnetic aplicat.

Interacțiunea dintre câmpul magnetic exterior și material este stabilită prin legea de material:

$$\begin{aligned} \bar{B} &= \mu_0 \bar{H} + \mu_0 \bar{M} = \mu_0 (\bar{H} + \bar{M}_t + \bar{M}_p) = \mu_0 (1 + \chi_m) \bar{H} + \mu_0 \bar{M}_p = \\ &= \mu_0 \mu_r \bar{H} + \mu_0 \bar{M}_p, \end{aligned} \quad (2.4)$$

unde: $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} [H/m]$, este permitivitatea vidului, \bar{B} este inducția magnetică, iar $\underline{\mu}_r = 1 + \underline{\chi}_m$ reprezintă permeabilitatea relativă a materialului și este o mărime complexă, ca și susceptivitatea magnetică χ_m , pentru materialele izotrope, fiind definită prin relația:

$$\underline{\mu}_r = \frac{\underline{B}}{\mu_0 \underline{H}}. \quad (2.5)$$

Permitivitatea absolută $\underline{\mu}$ are expresia:

$$\underline{\mu} = \mu_0 \underline{\mu}_r. \quad (2.6)$$

Unitățile de măsură pentru câmpul magnetic, magnetizație și inducție magnetică în sistemul internațional SI sunt: [A/m], respective [T].

2.2. Tipuri de magnetizări

În funcție de semnul susceptivității magnetice, materialele magnetice cu magnetizație temporară și fără magnetizație spontană se clasifică în:

a) Materiale diamagnetice, cum sunt Au, Ag, Cu. Susceptivitatea magnetică a acestor materiale este negativă, de valori foarte mici (fig. 2.1a) și independentă de temperatură și presiune. Introduse în câmp magnetic, aceste materiale au tendința de deplasare spre regiunile în care intensitatea câmpului este mai redusă, pentru că $\mu_r < 1$ [Sor]. Câmpul magnetic exterior modifică mișcarea electronilor, suprapunând peste mișcarea orbitală o mișcare de precesie, generând un moment magnetic indus, care se opune câmpului magnetic inductor, micșorându-l.

b) Materiale paramagnetice, cum sunt Al sau Cr, au susceptivitatea magnetică pozitivă, dependentă de câmpul magnetic (fig. 2.1b) și de valori relative reduse, motiv pentru care aceste materiale se numesc și nemagnetice. Dependența susceptivității de temperatură este pronunțată (fig. 2.1c), respectând, pentru un camp magnetic aplicat constant, relația:

$$\chi_m = C/T, \quad (2.7)$$

unde: C este constanta Curie caracteristică materialului.

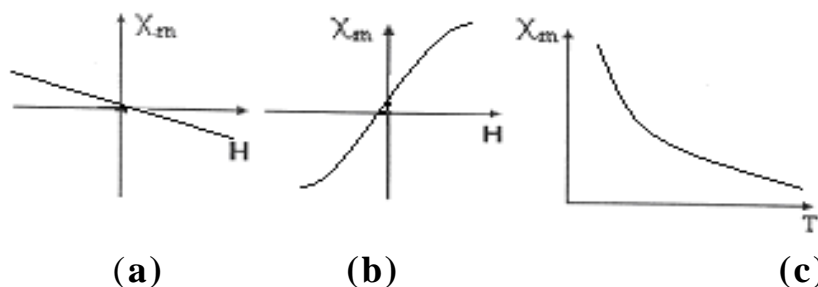


fig.2.1 Dependența susceptivității diamagnetice de intensitatea câmpului magnetic (a), dependența susceptivității paramagnetice de intensitatea câmpului magnetic (b) și de temperatură (c).[Căt]

În câmp magnetic exterior, momentele magnetice elementare se orientează în direcția câmpului, iar la intensități ridicate ale câmpului magnetic, apare un proces de saturație, când toate momentele s-au orientat în direcția câmpului. Introduse în câmp, aceste materiale sunt atrase spre regiunile cu câmp mai intens pentru ca $\mu_r > 1$ [sor].

Materialele magnetice, care posedă magnetizație spontană sunt:

a) Materialele feromagnetice, a căror moment magnetic elementar spontan este rezultat din necompensarea momentelor magnetice de spin. Pentru minimizarea energiei interacțiunilor de schimb dintre atomii învecinați, momentele magnetice de spin se orientează paralel, formând domenii de magnetizare, în care magnetizația este uniformă și egală cu magnetizația de saturație. Susceptivitatea și permeabilitatea magnetică au valori mari, care depind de câmpul magnetic aplicat, de temperatură și de solicitările mecanice.

b) Materialele antiferomagnetice și ferimagnetice se caracterizează prin existența a două subrețele magnetice, cu particule care au momente magnetice

elementare spontane orientate antiparalel, egale pentru materialele antiferomagnetice și inegale pentru cele ferimagnetice. Ferimagnetismul este antiferomagnetism necompensat.

2.3. Funcțiile materialelor magnetice [Căt]

Materialele magnetice utilizate cu precădere pentru realizarea funcțiilor prezentate în continuare, sunt feromagnetice sau ferimagnetice.

a) Funcția de miez magnetic

O bobină cu miez magnetic, are inductivitatea L de μ_r ori mai mare decât aceeași bobină fără miez: $L = \mu_r L_0$. Pentru evitarea distorsiunilor de neliniaritate datorate neliniarității dependenței magnetizației de câmpul magnetic aplicat din exterior prin apariția procesului de saturație, se impune ca magnetizația de saturație a materialului să fie ridicată. De asemenea se impune ca intensitatea câmpului coercitiv, care este prin definiție, câmpul magnetic pentru care magnetizația se anulează, să fie scăzută, pentru ca ciclul histerezis, asemănător cu cel al materialelor feroelectrice, să fie cât mai îngust.

b) Funcția de generare a câmpului magnetostatic

Pentru ca intensitatea câmpului magnetic generat de un magnet permanent, să fie cât mai ridicată, se impune ca intensitatea câmpului coercitiv să fie ridicată, pentru a împiedica procesul de demagnetizare și de asemenea, magnetizația remanentă, definită ca fiind magnetizația în absența câmpului exterior, să fie cât mai ridicată.

c) Funcția de înregistrare magnetică a informației

Se impune ca magnetizația remanentă a materialului să depindă univoc de câmpul magnetic excitator, iar intensitatea câmpului coercitiv să fie ridicată pentru a micșora posibilitatea ștergerii informației sub influența unor câmpuri magnetice perturbatoare.

d) Funcții neliniare și parametice

Aceste funcții se bazează pe caracterul neliniar al curbei de magnetizare a materialelor magnetice.

e) Funcția de ecranare

Adâncimea de pătrundere δ , a câmpului electromagnetic, care variază sinusoidal în timp cu frecvența f , într-un material magnetic cu permeabilitatea μ_r și conductivitatea σ , este:

$$\delta = 1/\sqrt{\pi f \mu_r \sigma} \quad (2.8)$$

Pentru a reduce adâncimea de pătrundere la frecvențe joase se impun valori ridicate ale permeabilității relative.

a) Funcția de traductor piezomagnetic

Efectul piezomagnetic constă în modificarea stării de magnetizație, ca urmare a modificării dimensiunilor materialului magnetic, supus solicitărilor mecanice. Efectul invers sau magnetostrictiv, este utilizat pentru realizarea traductoarelor, care convertesc variațiile de câmp magnetic, în variații dimensionale sau vibrații.

b) Funcția de traductor de temperatură

Proprietățile fero- și ferimagnetice dispar la temperaturi superioare temperaturii Curie T_C , peste care materialele devin paramagnetice, sau nemagnetice. Proprietatea este utilizată pentru realizarea de elemente termoregulatorie.

2.4. Feromagnetismul

2.4.1. Modelul teoretic al feromagnetismului

Momentul magnetic elementar al unui atom este suma dintre momentele magnetice orbitale și de spin ale electronilor și momentul magnetic de spin al nucleului. Momentele magnetice orbitale în general se compensează reciproc, iar momentul magnetic de spin al nucleului, este foarte redus. Rezultă, că momentul magnetic elementar spontan, este determinat în principal, de momentele magnetice de spin ale electronilor. Electronii din stratul de valență-*cv*siliberi, nu contribuie la apariția momentului magnetic spontan. Elementele, care au substraturi electronice complet ocupate, nu au moment magnetic spontan, pentru că electronii – în număr par pe fiecare substrat – au stări cuantice diferite și spini orientați antiparalel, momentele magnetice de spin compensându-se reciproc. Spinii electronilor se orientează conform regulii lui Hund, astfel încât energia stării să fie minimă. Numai elementele, care au substraturi electronice incomplet ocupate de electroni, prezintă moment magnetic spontan. Astfel de elemente sunt: Fe, Ni, Co, elemente din seria lantanidelor, sau a pământurilor rare și actinidelor.

2.4.2. Formarea domeniilor de magnetizare. Energii implicate

Prima teorie cantitativă a domeniilor feromagnetice a fost elaborată de L.D.Landau și E.M.Lifschitz, care au stabilit importanța energiilor de demagnetizare pentru existența structurii de domenii.[Lan]. Din motive termodinamice, starea cu energie minimă a unei plăci de grosime finită, corespunde unei structuri stratificate de domenii. Datorită interacțiunilor puternice între momentele magnetice elementare, apare tendința de orientare paralelă a momentelor magnetice; în interiorul unui domeniu, magnetizația este uniformă și egală cu magnetizația de saturație: $\overline{M} = \overline{M}_s$. Domeniile sunt separate prin pereți de domenii. Analiza proceselor de demagnetizare se poate efectua la nivel macroscopic, cu ajutorul mărimilor macroscopice: câmp și moment magnetic, la nivel de domenii, sau macroscopic detaliat, cu ajutorul mărimilor: câmp magnetic și magnetizație, pereții de domenii fiind considerați simple suprafețe de separație, la nivel microscopic, unde intervin și energiile specifice pereților de domenii, la nivel nanoscopic și la nivel molecular.

În abordarea proceselor de magnetizare la nivel de domenii, pentru a elimina contribuția energiei de demagnetizare a peretelui, s-a impus criteriul de divergență nulă, asupra magnetizației \overline{M} din interiorul peretelui: $div\overline{M} = 0$, în sensul că nu există sarcini magnetice fictive sau câmpuri de demagnetizare, asociate peretelui. Criteriul de divergență nulă este menținut în interiorul materialului, excepție făcând suprafețele de separație ale materialului, unde:

$$div\overline{M} = div\overline{M}_s = -\frac{\sigma_m}{\mu_0}, \quad (2.9)$$

unde: σ_m reprezintă densitatea superficială a sarcinilor magnetice fictive. Prezența sarcinilor magnetice fictive, este echivalentă cu prezența câmpului de demagnetizare \overline{H}_D (fig. 2.2a).

Expresia energiei de demagnetizare este:

$$E_D = -\frac{\mu_0}{2} \int_{v_m} \overline{H}_D \overline{M}_s dv \quad (2.10)$$

și are valoarea pozitivă pentru că sensul câmpului demagnetizant \overline{H}_D este opus magnetizației \overline{M} din interiorul materialului sau din interiorul unui domeniu de magnetizare. Pentru anularea energiilor de demagnetizare produse de sarcinile magnetice superficiale fictive, domeniile de închidere au forma de prismă dreptunghiulară în structură Landau – Lifschitz, cu flux închis (fig. 2.2b). Pe măsură ce grosimea g a plăcii se micșorează, structura cu flux închis devine fină (fig. 2.2c), lățimea d a domeniilor se micșorează și structura se transformă treptat în structura Kittel cu flux deschis (fig. 2.2e).

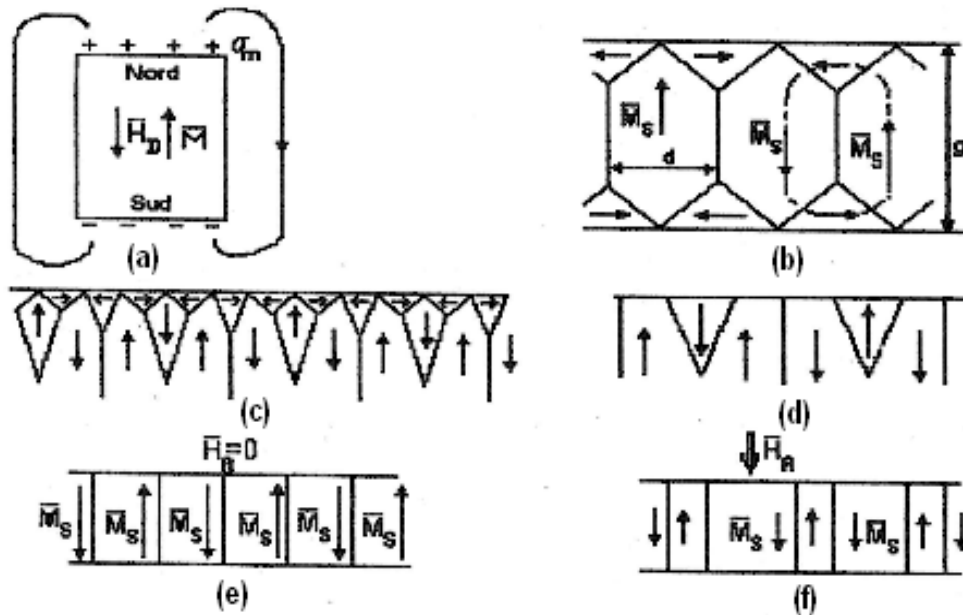


fig.2.2 Structuri de domenii cu flux deschis (a) și cu flux închis (b,c), care se transformă în structuri cu flux deschis (d,e) pe măsură ce grosimea plăcii g se micșorează.

Câmpul magnetic aplicat \overline{H}_A determină extinderea domeniilor cu magnetizație omoparalelă (f).

Energia structurii și lățimea domeniilor, sunt mărimi care variază proporțional cu \sqrt{g} [Lan]. Câmpul magnetic aplicat normal pe suprafețele de separație, determină extinderea domeniilor cu magnetizația orientată în sensul câmpului și restrângerea domeniilor cu magnetizație orientată în sens opus (fig. 2.2f).

Energia de interacțiune cu câmpul magnetic exterior are expresia:

$$E_H = -\mu_0 \int_{v_m} \overline{H}_A \overline{M}_S dv, \quad (2.11)$$

fiind pozitivă sau negativă în funcție de orientările celor doi vectori. Energia totală $E_T = E_D + E_M$, a structurii este minimă atunci când E_M are valoare negativă, sau când vectorii \overline{H}_A și \overline{M}_S au același sens. Domeniile cu magnetizația orientată în sensul câmpului aplicat se extind în detrimentul domeniilor cu magnetizația orientată în sens opus.

Pentru o structură Kittel în absența câmpului magnetic exterior energia structurii este minimă pentru lățimi egale ale domeniilor magnetice adiacente [Dan], rezultând că pentru structura monodomeniu, cu magnetizație uniformă în întreg volumul plăcii, energia este maximă.

Într-o abordare la nivel microscopic este necesar să se țină cont și de contribuțiile energiilor specifice peretelui de domenii, cât și de energia de anizotropie, a cărei expresie este de forma:

$$E_A = K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2) + K_2\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2 \quad (2.12)$$

unde: K_1, K_2 sunt constante de anizotropie caracteristice materialului, care prezintă o axă de ușoară magnetizare (normală de suprafețele de separație în cazul reprezentărilor din fig.2.2), iar $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$, sunt cosinuşii directori. Energia de anizotropie, este energia necesară orientării momentelor magnetice spontane – dispuse paralel cu axa de ușoară magnetizare – în direcția definită prin $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$.

Energia de schimb a peretelui, rezultată din interacțiunile de schimb, are expresia:

$$E_{schimb} = \frac{A}{\delta^2} \int_{l_p} [(\Delta\alpha_1)^2 + (\Delta\alpha_2)^2 + (\Delta\alpha_3)^2] dl \quad (2.13)$$

unde: A este o constantă de interacțiune, δ este lățimea peretelui – sub 1% din lățimea domeniului d , l_p este lungimea peretelui, iar $\Delta\alpha_i$ sunt diferențele dintre cosinuşii directori ai magnetizației $\overline{M} = \overline{M}_s$ în două domenii adiacente.

Energia de anizotropie a peretelui, are expresia:

$$E_K = K_\mu \int_{v_p} \cos^2 \theta dv, \quad (2.14)$$

unde: K_μ este o constanta de anizotropie, v_p este volumul peretelui, iar θ este unghiul format între magnetizație și o axă de magnetizație grea (perpendiculară pe axa de magnetizare ușoară și paralelă cu suprafețele de separație, în cazul reprezentărilor din fig.2.2).

Trecerea de la un domeniu de magnetizare la un alt domeniu, în care magnetizația are o orientare diferită, se efectuează prin rotații succesive ale momentelor magnetice elementare, pentru că energia de schimb în perete nu se modifică brusc. Dacă rotațiile vectorului magnetizație se efectuează în plane paralele cu suprafețele de separație ale peretelui, pereții sunt de tip Bloch, iar dacă rotațiile au loc în planuri perpendiculare pe suprafețele peretelui, pereții sunt de tip Neel. În fig.2.3 se reprezintă procesul de rotație al magnetizației într-o structură de tip Kittel.

Din expresia 2.10 rezultă că un domeniu magnetic extins are o energie de demagnetizare ridicată, ceea ce conduce la formarea unor domenii mai restrânse, care presupun o energie de demagnetizare mai redusă [Dan].

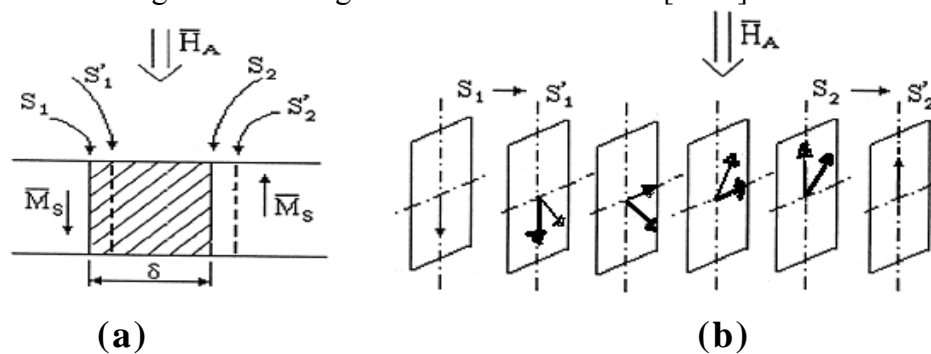


fig.2.3 Deplasarea peretelui Bloch sub influența câmpului magnetic exterior (a), prin modificarea orientării magnetizației în planuri paralele cu suprafețele peretelui (b).

Cu linie îngroșată s-au reprezentat vectorii magnetizație pentru $\overline{H}_A \neq 0$, care se rotesc treptat în direcția câmpului exterior.

Pe de altă parte, pentru a forma un nou perete despărțitor, este necesar un aport suplimentar de energie, care este rezultatul interacțiunilor de schimb, energia necesară având expresia (2.13).

Procesul de formare a unor noi domenii de magnetizare încetează și structura de domenii devine stabilă, atunci când reducerea energiei de demagnetizare-prin formarea de noi domenii, este compensată de creșterea energiei necesare pentru a forma noi pereți despărțitori.

Energia peretelui este o combinație dintre energia de schimb, care crește pronunțat conform relației (2.13), cu micșorarea lățimii peretelui și energia de anizotropie, care crește odată cu mărirea volumului peretelui.

Energia de schimb favorizează spinii paraleli, iar forțele de interacțiune de schimb vor tinde să mărească lățimea δ a peretelui. Din expresia energiei de anizotropie (2.14), rezultă că o lățime mare a peretelui presupune și o energie de anizotropie de valoare ridicată. Lățimea stabilă δ a peretelui este determinată de echilibrul forțelor de schimb și de anizotropie.

În câmp magnetic aplicat din exterior, vectorul magnetizație se rotește determinând modificarea configurației de domenii, astfel încât criteriul de divergență nulă a magnetizației, să fie menținut intern, iar energia totală a sistemului – în care intervine și energia de interacțiune cu câmpul magnetic exterior, să fie minimă.[Dan].

2.4.3. Anizotropia magnetică

Proprietățile magnetice ale unor materiale depind de anumite direcții preferențiale sau axe de ușoară magnetizare (μ), de-a lungul cărora se orientează vectorul magnetizație. În mod asemănător se definesc axele de magnetizare grea (mg), sau medie (mm).

a) Anizotropia magnetocristalină

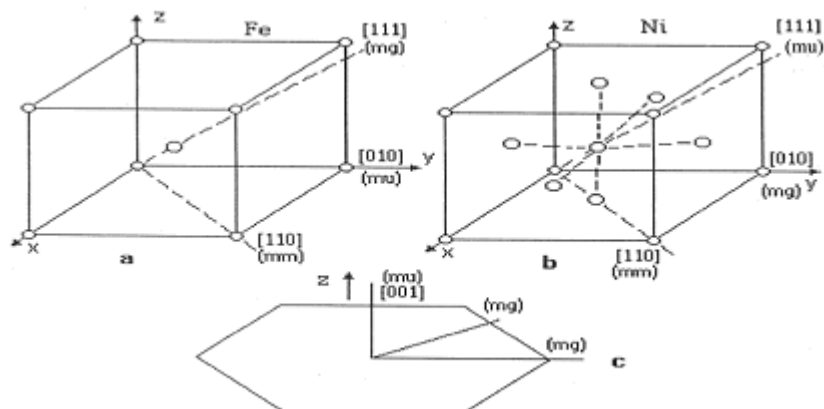


fig.2.4 Direcțiile de magnetizare ușoară (μ), grea (mg) și medie (mm) pentru fier –(a), nichel – (b) și cobalt – (c).[Căt].

Momentele magnetice de spin și orbitale se orientează după direcții preferențiale, determinate de structura cristalină, orientări pentru care – la echilibru termodinamic – energia internă a cristalului este minimă.

În fig.2.4 sunt reprezentate celulele elementare pentru Fe, Ni, Co, care cristalizează în sistem cubic cu volum centrat, cu fețe centrate, respectiv în sistem hexagonal compact (vezi anexa 1.1).

Materialele feromagnetice cu structură spinelică cum este ferită cubica prezintă o direcție de ușoară magnetizare care, ca și la Ni, coincide cu diagonala principală a cubului.

b) Anizotropia indusă

Anizotropia indusă se obține fie prin laminare la rece, fie prin tratament termic în câmp magnetic. Prin laminare la rece, muchiile cuburilor elementare, care coincid cu axa de ușoară magnetizare, sunt orientate paralel cu direcția laminării, obținându-se o structură Goss. Procedul se utilizează la fabricarea tolelor de transformator.

Prin încălzire în câmp magnetic exterior la o temperatură superioară temperaturii Curie T_C , momentele magnetice elementare se orientează după direcția liniilor de câmp. Prin răcire bruscă, momentele magnetice își păstrează starea imprimată de câmpul magnetic, rezultând anizotropie magnetică indusă. Procedul se utilizează la fabricarea magneților permanenți.

2.4.4. Magnetizarea materialelor feromagnetice. Curba de magnetizare

Magnetizarea materialelor feromagnetice sub influența câmpului magnetic exterior are loc prin rotirea magnetizației din interiorul unui domeniu și prin deplasarea pereților de domenii. Domeniile cu magnetizația orientată în direcția câmpului magnetic aplicat se extind în detrimentul celorlalte domenii, care se restrâng. Pentru intensități reduse ale câmpului magnetic, deplasările pereților de domenii sunt reduse, iar procesul de magnetizare este reversibil; astfel, la anularea câmpului, configurația de domenii revine la forma inițială.

La intensități crescute ale câmpului magnetic, procesul de magnetizare se efectuează prin salturi de energie (Barkhausen), iar procesul este ireversibil. Defectele de structură ale rețelei cristaline fixează pereții de domenii, iar energia necesară deplasării pereților variază continuu în timpul deplasării, prezentând fluctuații.

La anularea câmpului magnetic exterior, structura de domenii nu revine la configurația inițială și posedă magnetizație remanentă.

Procesul de magnetizare este ilustrat prin curba de magnetizare, reprezentată în fig.2.5. Din relația (2.4), rezultă că din dependența magnetizație – câmp se poate obține dependența inducție – câmp, dacă se adaugă primul termen al relației (2.4), care reprezintă o linie dreaptă ce trece prin originea axelor de coordonate. Astfel, curba de primă magnetizare cât și ciclurile de histerezis – limită sau minore – care sunt cuprinse în interiorul ciclului limită, sunt rotite în sens invers orar, alura lor fiind mai alungită. Segmentele CD, corespunzătoare stării de saturație a materialului, nu mai sunt paralele cu axa absciselor, ci înclinate, având panta-egală cu panta dreptei asociată primului termen al relației (2.4).

Starea materialului la un moment dat este determinată prin magnetizație și câmp magnetic, depinzând de evoluția anterioară a procesului de magnetizare. Numai punctele de stare (H,M) și (H,B) din interiorul ciclului limită pot caracteriza starea materialului.

Presupunem, că în momentul inițial, materialul este demagnetizat ($M=0$), în absența câmpului magnetic exterior, iar structura de domenii este de tip Landau – Lifschitz. Pentru intensități reduse ale câmpului magnetic aplicat materialului (segmentul OA al curbei de primă magnetizare), procesul de magnetizare este reversibil. Pentru intensități mărite (segmentul AB), procesul este ireversibil, iar în punctul B, structura se apropie de structura monodomeniu, având magnetizația

poate readuce în stare demagnetizată prin aplicarea unei componente alternative H_{\sim} suprapusă peste componenta continuă H_0 a câmpului, care se micșorează treptat până la anulare, ulterior anulându-se treptat și componenta alternativă.

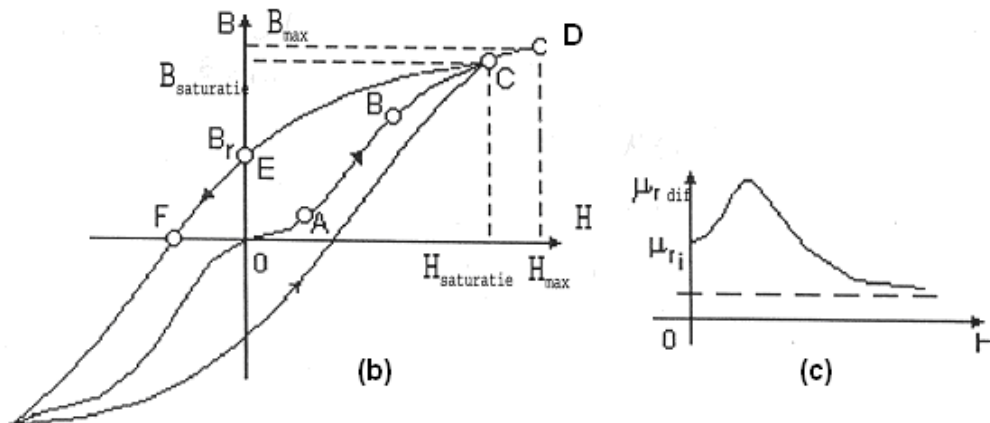


fig.2.5 Curba de magnetizare în coordonate H-B (b). Variația permitivității relative statice în funcție de intensitatea câmpului magnetic aplicat (c).

Permeabilitatea relativă statică $\mu_{r\,st}$ și diferențială $\mu_{r\,dif}$ sunt definite pentru un punct situat pe curba de magnetizare, ale cărui coordonate (H,B) sunt cunoscute:

$$\mu_{r\,st} = \frac{B}{\mu_0 H}, \tag{2.15}$$

$$\mu_{r\,dif} = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\Delta B}{\Delta H} \right) = \text{tg } \alpha. \tag{2.16}$$

Întrucât pe porțiunea OA, curba de primă magnetizare (fig.2.5a) este concavă, iar pe porțiunea AB, este convexă, permeabilitatea relativă diferențială se modifică conform cu reprezentarea din fig. 2.5c, tinzând spre o valoare minimă, pentru intensități ridicate ale câmpului magnetic aplicat.

Permitivitatea relativă reversibilă și inițială se definesc prin relațiile:

$$\mu_{r\,rev} = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\Delta B}{\Delta H} \right)_{\substack{H=H_0; B=B_0 \\ \text{ciclu reversibil}}} = \text{tg } \beta < \text{tg } \alpha \tag{2.17}$$

$$\mu_{r\,i} = \lim_{\Delta H \rightarrow 0} \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{\Delta B}{\Delta H} \right)_{\substack{H=0; B=0 \\ \text{ciclu ireversibil}}} \tag{2.18}$$

Valoarea permitivității relative reversibile este inferioară valorii permitivității relative diferențiale, pentru că axa ciclului minor, este mai puțin înclinată față de axa absciselor, în comparație cu tangenta în punctul considerat pe curba de primă magnetizare, sau pe ciclul limită (fig. 2.5a).

Variațiile rapide ale câmpului magnetic exterior sunt urmărite cu întârziere de magnetizație (și inducție), datorită “ vâscozității magnetice ”. Pentru un câmp magnetic, a cărui intensitate se modifică în timp, conform relației:

$$H(t) = H_0 \sin \omega t, \tag{2.19}$$

magnetizația materialului are expresia:

$$M(t) = \chi_m(\omega) H_0 \sin[\omega t - \varphi(\omega)]. \tag{2.20}$$

Datorită postfectului, legea de material (2.4), nu mai este valabilă cu exactitate, atunci când un material fero- sau ferimagnetic este introdus într-un câmp magnetic variabil. Câmpul magnetic nu mai este coliniar cu magnetizația,

sau inducția din interiorul materialului. Defazajul $\varphi(\omega)$ între câmpul magnetic și magnetizație se mărește cu creșterea frecvenței.

În regim nestaționar se definește permeabilitatea relativă dinamică:

$$\mu_{r_{din}} = \frac{\Delta B}{\mu_0 \Delta H}, \quad (2.21)$$

care este proporțională cu panta medie a ciclului de histerezis descris în jurul punctului caracteristic stării materialului. Datorită postefectului, valoarea permitivității dinamice este inferioară valorii permitivității statice și scade cu creșterea frecvenței. Pentru frecvențe crescătoare, înclinația axelor ciclurilor minore față de axa absciselor, se micșorează și, de asemenea, valorile permitivităților se micșorează.

Pentru magneți permanenți se definește permeabilitatea relativă permanentă corespunzătoare punctelor situate pe curba de demagnetizare:

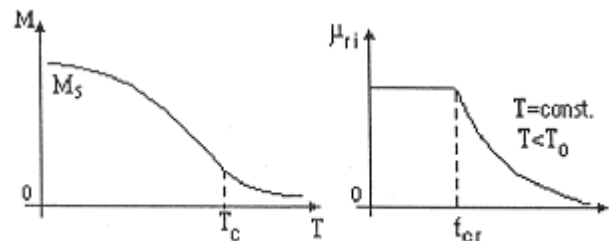
$$\mu_{r_{per}} = \left[\frac{\Delta B}{\mu_0 \Delta H} \right]_{\substack{-H_C < H < 0 \\ \text{ciclu reversibil}}}, \quad (2.22)$$

care este afectată în același mod de creșterea frecvenței câmpului magnetic exterior.

2.4.5. Influența factorilor externi asupra proprietăților feromagnetice

a) Influența temperaturii

Magnetizația unui material magnetic scade cu creșterea temperaturii datorită agitației termice. La temperaturi superioare temperaturii Curie, energia termică a rețelei depășește energia interacțiunilor de schimb, domeniile cu magnetizare spontană dispar, iar materialul devine paramagnetic sau nemagnetic (fig. 2.6a). Temperaturile Curie sunt: 770°C pentru fier, 362°C pentru nichel, 1127°C pentru cobalt.[Căt].



(a)

(b)

fig.2.6 Dependențele magnetizației în funcție de temperatura (a) și permeabilității relative

inițiale în funcție de frecvența (b) pentru materiale feromagnetice.

b) Influența frecvenței

Datorită vâscozității magnetice sau postefectului, magnetizația nu urmărește instantaneu variațiile rapide ale câmpului magnetic. Înclinația ciclurilor de histerezis în raport cu axa absciselor scade cu creșterea frecvenței, iar permeabilitățile relative scad de asemenea.

Pentru tole de transformator frecvența critică de la care apar modificări pronunțate ale permeabilității relative inițiale (fig. 2.6b), are expresia aproximativă [Căt]:

$$f_{cr} \cong \frac{4}{\pi \mu_r \sigma D^2} \quad (2.23)$$

unde: D reprezintă grosimea tolei, iar σ este conductivitatea materialului tolei. Pentru frecvențe superioare: $f > f_{cr}$, permeabilitatea relativă este în raport direct cu $\frac{1}{\sqrt{f}}$.

c) Influența impurităților

Impuritățile, cum sunt carburi metalice sau materiale neferomagnetice, se asimilează cu defecte ale rețelei cristaline, care fixează pereții de domenii împiedicând deplasarea acestora, având efectul global de creștere a magnetizației (și inducției) remanente și mai ales a câmpului coercitiv. Impuritățile sunt utilizate la fabricarea magneților permanenți. De asemenea, elemente din seria pământurilor rare (lantanide) sunt utilizate în acest scop.

Elemente cum sunt Ni, Co, Cr sau Mb determină creșterea permitivității relative și a magnetizației de saturație și scăderea câmpului coercitiv. Aceste elemente sunt utilizate la fabricarea materialelor magnetice liniare, pentru miezuri magnetice.

Materialul tolelor pentru transformator conține Si, care determină creșterea rezistivității materialului și în consecință, micșorarea pierderilor de putere prin curenți turbionari.

2.5. Ferimagnetism [Căt]

2.5.1. Modelul teoretic al ferimagnetismului

Structura materialelor ferimagnetice se caracterizează prin existența a două (sau mai multe) subrețele magnetice a căror particule au momente elementare spontane orientate antiparalel. Momentele magnetice de spin constituie componenta principală a momentului magnetic elementar. Contribuțiile celor două subrețele la magnetizație sunt diferite. Momentele magnetice elementare ale celor două rețele nu se compensează reciproc, ceea ce conduce la apariția unui moment magnetic spontan.

Între cele două subrețele interacțiunea este puternică și de natură antiferomagnetică, iar în subrețea, interacțiunea este slabă și de natură feromagnetică. Anizotropia magneto-cristalină pronunțată a monocristalelor crescute epitaxial din soluțiile lichide cu fondanți, cum sunt granații magnetici uniaxiali, rezultă din distribuția preferențială a ionilor magnetici. Feritele cubice sunt reprezentative pentru clasa materialelor ferimagnetice, prezintă anizotropie și magnetostricțiune și au dependențe pronunțate ale magnetizației de temperatură și de câmpul magnetic aplicat, asemănătoare cu cele ale materialelor feromagnetice. În fig.2.7 sunt prezentate dependențele de temperatură ale magnetizației pentru ferite și granați.

Spre deosebire de materialele feromagnetice, temperaturile Curie ale feritelor sunt mult mai scăzute, fiind cuprinse între 60°C și 450°C . Momentele magnetice ale celor 2 subrețele se compensează în cazul granaților, la temperatura T_K , iar peste temperatura Curie, granații, ca și feritele, devin paramagnetici sau nemagnetici.

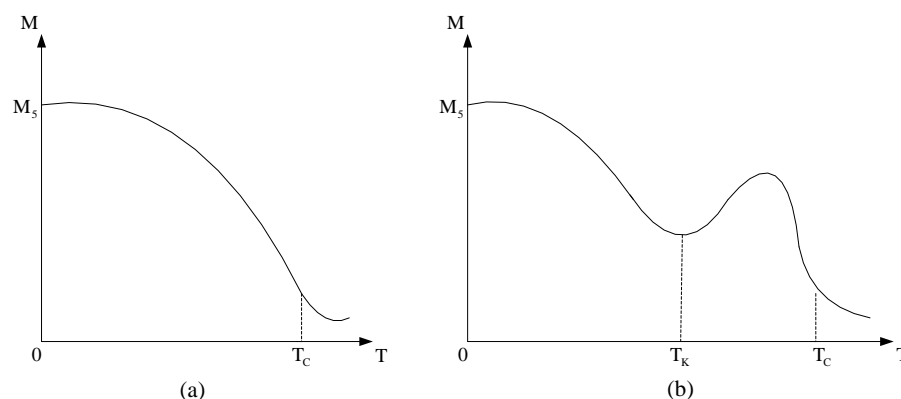


fig.2.7 Dependențele magnetizației de temperatură pentru ferite (a) și pentru granați (b)

2.5.2. Materiale ferimagnetice

Feritele monocristaline au structura spinelică sau hexagonală: MeOAl_2O_3 precum și structură de tip granat: $\text{A}_3\text{B}_5\text{O}_{12}$. Cationul Me poate fi mangan, fier, cobalt, nichel sau zinc, în feritele cu structură spinelică, și bariu, stronțiu sau plumb, în feritele cu structura hexagonală. Elementul A din structura de tip granat, aparține seriei pământurilor rare, iar elementul B este fier, galiu sau aluminiu. Feritele sinterizate, sunt realizate din pulberi și un liant. Prin încălzire în casete, amestecul se solidifică obținând forma casetei, Rezistivitatea feritelor este ridicată cu valori până la: $\rho = 10^8 \Omega\text{cm}$, dar permitivitățile relative, magnetizația și inducția de saturație și reanență au valori mai scăzute decât la materialele feromagnetice.

Feritele sinterizate, sunt utilizate pentru realizarea miezurilor magnetice ale bobinelor și transformatoarelor, care funcționează la frecvențe superioare frecvenței de 50Hz. Puterea transferată din înfășurarea primară în înfășurarea secundară a unui transformator, depinde de secțiunea miezului magnetic, deci de dimensiunile miezului. Pentru un miez feromagnetic comun, puterea transferată pe unitatea de suprafață a miezului, la frecvența de 50Hz, este în raport direct cu pătratul secțiunii miezului. Pentru un miez ferimagnetic care funcționează la frecvențe de ordinul zecilor sau sutelor de kHz, puterea transferată pe unitatea de suprafață este mult mai ridicată, pentru că numărul de perioade dintr-o secundă este mult mai mare, iar puterea este transferată pe parcursul unei perioade. Pentru o putere dată a transformatorului, dimensiunile transformatorului cu miez de ferită, scad considerabil în comparație cu dimensiunile transformatorului cu miez feromagnetic.

Întrucât transformatorul funcționează pe baza legii inducției electromagnetice, transferul de energie din primar în secundar, se efectuează prin intermediul fluxului magnetic: $\Phi = BS$, unde S este secțiunea miezului sau mai exact, prin intermediul variației în timp a fluxului magnetic: $d\Phi/dt$. Valoarea maximă a fluxului este limitată de procesul de saturație al miezului, sau de valoarea maximă a inducției în miez: $B_{\text{max}} = B_{\text{sat}}$. Dar nu valoarea fluxului magnetic este importantă în transferul de energie, ci viteza cu care se modifică fluxul magnetic în timp. Aplicând înfășurării primare o tensiune cu formă de variație sinusoidală în timp, transferul de energie se efectuează pe parcursul unei perioade. Puterea transferată, este prin definiție, energia transferată într-o secundă. Astfel, numărul de transferuri de energie din primar în secundar, este proporțional cu frecvența tensiunii aplicate înfășurării primarului. Pentru frecvențe ridicate, creșterea puterii transferate datorită creșterii frecvenței, este

mult mai pronunțată la miezurile din ferită sinterizată în comparație cu miezurile feromagnetice din tole, decât scăderea puterii transferate datorită unor valori reduse ale permeabilității relative, ale inducției magnetice și implicit ale fluxului magnetic.

Pe de altă parte, rezistivitatea feritelor sinterizate este foarte ridicată, iar pierderile prin curenți turbionari sunt reduse. Miezurile feromagnetice, deși sunt alcătuite din tole pentru micșorarea pierderilor prin curenți turbionari, la frecvențe ridicate se încălzesc excesiv datorită acestor curenți.

2.6. Piezomagnetism [Căt]

Piezomagnetismul este proprietatea materialelor magnetice de modificare a stării de magnetizare sub influența tensiunilor mecanice (fig.2.8a).

Magnetostricțiunea sau efectul piezomagnetic invers, constă în deformarea rețelei cristaline a materialului sub influența câmpului magnetic exterior, care produce modificări ale stării de magnetizație (fig.2.8b).

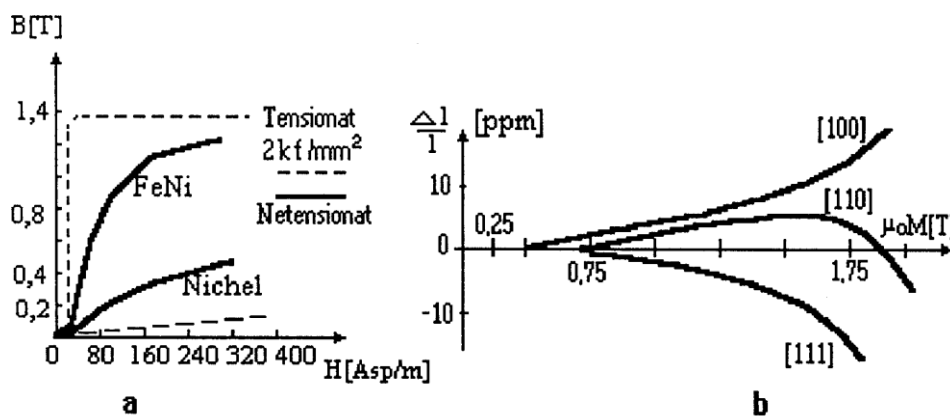


fig.2.8 Dependența inducției magnetice de câmpul magnetic aplicat și de solicitarea mecanică (a) și variația alungirii relative piezomagnetice funcție de magnetizație la un monocristal de fier netensionat (b). [Căt]

Pentru a prezenta piezomagnetism, este necesar să se aplice materialelor magnetice un câmp magnetic exterior, care determină apariția stării de magnetizare temporară.

2.7. Pierderi în materiale fero- și ferimagnetice

2.7.1. Permeabilitatea relativă complexă și tangenta unghiului de pierderi

Presupunem că expresia permeabilității relative complexe, definită prin relația (2.5), este de forma:

$$\underline{\mu}_r = \mu_r' - j\mu_r'' \quad (2.24)$$

și caracterizează materialul magnetic din punct de vedere al capacității sale de a se magnetiza cât și din punct de vedere al pierderilor de putere activă. Vom arăta în continuare că expresia (2.24), este confirmată teoretic.

Considerăm o bobină cu miez magnetic, reprezentată în fig.2.9a.

Impedanța bobinei are expresia:

$$\underline{Z} = j\omega \underline{\mu}_r L_0 = (\mu_r' - \mu_r'') L_0 = \omega \mu_r'' L_0 + j\omega \mu_r' L_0, \quad (2.25)$$

unde: L_0 este inductivitatea bobinei fără miez.

Prin urmare, o bobină cu miez este echivalentă cu o bobină fără miez și fără pierderi de putere activă în miez, având inductivitatea de μ_r ori mai mare: $L_m = \mu_r L_0$, conectată în serie cu o rezistență de pierderi de valoare: $r_m = \omega \mu_r'' L_0$. Din schema echivalentă se observă că μ_r caracterizează materialul din punct de vedere al capacității sale de a se magnetiza, iar μ_r'' - din punctul de vedere al pierderilor de putere activă din material care se transformă în căldură (fig.2.9b).

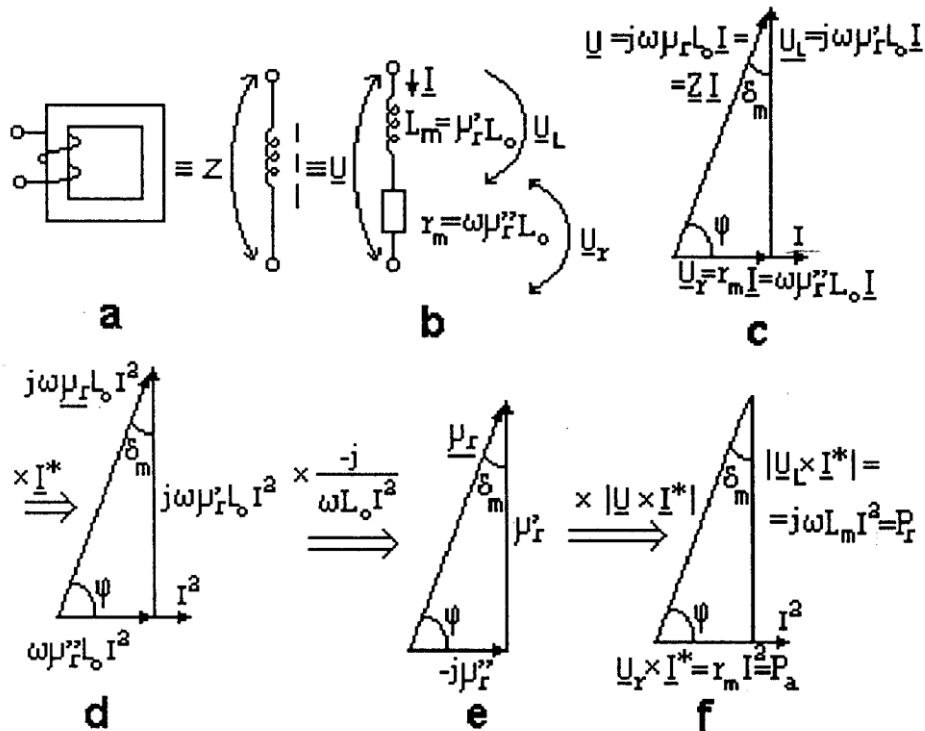


fig.2.9 Schema echivalentă a unei bobine cu miez magnetic și diagrame fazoriale asociate.

Din diagrama vectorială (fig.2.9c), asociată schemei echivalente, se obține în două etape, diagrama permeabilității relative complexe (fig.2.9e), care confirmă valabilitatea expresiei (2.24).

Pe de altă parte, din diagrama vectorială (fig.2.9c), se obține diagrama puterilor (fig.2.9f), tangenta unghiului de pierderi fiind definită prin relația:

$$\operatorname{tg} \delta_m = \frac{P_a}{P_r} = \frac{|U_r I|}{|U_L I|} = \frac{UI \sin \delta_m}{UI \cos \delta_m} = \frac{r_m}{\omega L_m} = \frac{\mu_r''}{\mu_r'} \quad (2.26)$$

Tangenta unghiului de pierderi - care e o mărime reală - este utilizată ca mărime ce caracterizează materialul magnetic din punct de vedere al pierderilor de putere activă și nu partea imaginară a permeabilității relative complexe.

Factorul de calitate, are expresia:

$$Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta_m} = \frac{\omega L_m}{r_m}, \quad (2.27)$$

crescând cu frecvența, atunci când pierderile în miezul magnetic nu se măresc semnificativ.

Cu relația (2.26), relația (2.24) obține forma:

$$\underline{\mu}_r = \mu_r' (1 - j \operatorname{tg} \delta_m) \quad (2.28)$$

2.7.2. Pierderi prin curenți turbionari

Materialele feromagnetice au conductibilitate electrică σ ridicată. Introduse în câmp magnetic variabil, conform legii inducției electromagnetice, în aceste materiale se induc tensiuni electromotoare care generează curenți turbionari. Pentru micșorarea pierderilor prin curenți turbionari, miezul feromagnetic este format din tole izolate electric între ele. Expresia tangentei unghiului de pierderi prin curenți turbionari a miezurilor feromagnetice alcătuite din tole, este [Căt]:

$$\operatorname{tg} \delta_m = \frac{\mu_r''}{\mu_r'} = \mu_{rrev} \frac{d^2 \pi \mu_0 \sigma}{6} f \quad (2.29)$$

unde: d este grosimea tolei, iar f este frecvența câmpului magnetic aplicat. Din fig.2.10a și relația (2.29), se observă că partea imaginară a permeabilității relative, ca și tangenta unghiului de pierderi, au valori acceptabile pentru frecvențe inferioare frecvenței limită: $f_{lim} = 50 \div 100 \text{Hz}$.

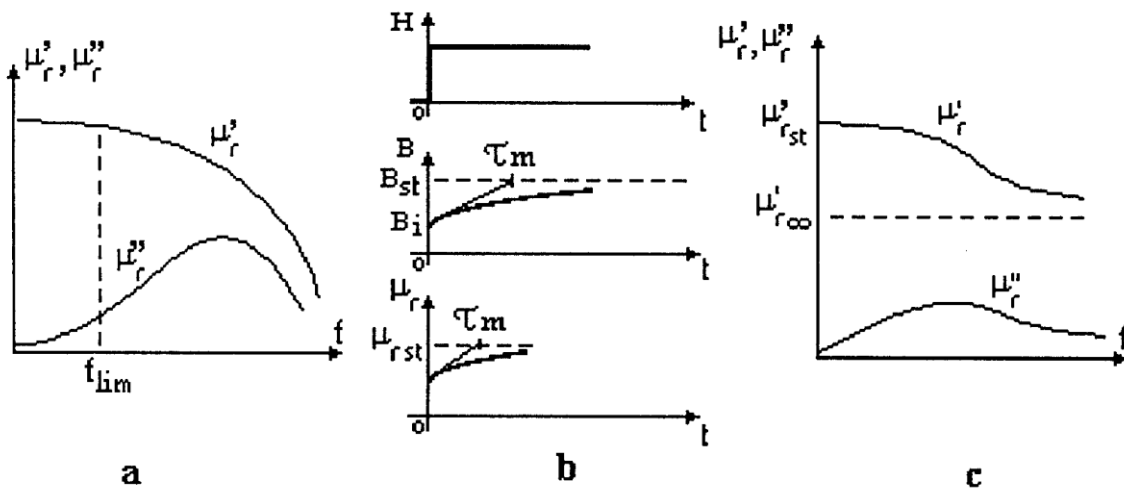


fig.2.10 Dependențele de frecvență ale permeabilității magnetice pentru materiale cu pierderi prin curenți turbionari (a) și prin magnetizare (c); variația inducției și permeabilității relative la aplicarea bruscă a câmpului magnetic (b).

Micșorarea grosimii tolelor și a conductivității materialului feromagnetic (prin aliere cu siliciu) determină micșorarea acestor pierderi. Miezurile feromagnetice au conductibilitate electrică și pierderi prin curenți turbionari extrem de scăzute, iar relația (2.29) nu mai este valabilă pentru aceste miezuri, care pot transfera la frecvențe ridicate, puteri mult mai mari decât miezurile feromagnetice.

2.7.3. Pierderi prin histeresis

Energia specifică, pe unitatea de volum, furnizată de câmpul magnetic exterior I pentru parcurgerea unui ciclu de histeresis, este proporțională cu suprafața ciclului:

$$W_H [J/m^3] = \oint_{\text{ciclu}} H [A/m] dB [T]. \quad (2.30)$$

Pierderile specifice pe unitatea de masă sunt:

$$P_H [J/kg] = \frac{W_H}{\gamma [Hz]}, \quad (2.31)$$

unde: $\gamma [Kg/m^3]$ este densitatea volumetrică.

O relație empirică a fost obținută de Steinmetz:

$$W_H = \eta B_{\max}^n \quad (2.32)$$

unde: η și n sunt constante de material, cu valori cuprinse între 1 și 2.

Determinarea analitică a pierderilor prin histeresis, este dificilă datorita neliniarității curbei de histeresis. Astfel, pentru o variație sinusoidală a câmpului magnetic, variația inducției nu este sinusoidală, iar permeabilitatea relativă complexă, este o funcție de intensitatea și frecvența câmpului magnetic aplicat.

Pierderile prin histeresis se reduc prin utilizarea unor materiale fero- și ferimagnetice cu suprafața ciclului de histeresis redusă.

2.7.4. Pierderi prin magnetizare

La aplicarea bruscă a unui câmp magnetic, a cărui intensitate poate fi relativ scăzută, inducția magnetică obține instantaneu valoarea B_i (fig. 2.10b), după care se modifică în timp după o lege exponențială, cu constanta de timp τ_m . În mod asemănător se modifică și permeabilitatea relativă a materialului.

Experimental se constată ca procesul tranzitoriu este de natura unei "vâscozități" termice, dispărând la temperatura absolută. Cu creșterea frecvenței, inducția urmărește cu întârziere variațiile rapide ale câmpului magnetic, iar μ_r se micșorează, pentru că înclinația ciclurilor de histeresis se micșorează.

De asemenea, în relația (2.20), defazajul $\phi(\omega)$ între câmpul magnetic sinusoidal și magnetizația materialului, crește cu creșterea frecvenței, rezultând un maxim al pierderilor prin magnetizare și al părții imaginare a permeabilității relative (fig.2.10c).

La frecvențe mai ridicate, magnetizația (și inducția) nu mai urmăresc variațiile câmpului și pierderile prin magnetizare scad.

2.7.5. Pierderi prin rezonanță magnetică

Prin aplicarea bruscă a unui câmp magnetic continuu $\overline{H_0}$, datorită forței Lorentz de interacțiune între câmpul magnetic și mișcarea orbitală a electronilor, apare o accelerație centripetă suplimentară, care imprimă electronilor o mișcare de precesie în jurul direcției câmpului (2.1 la)

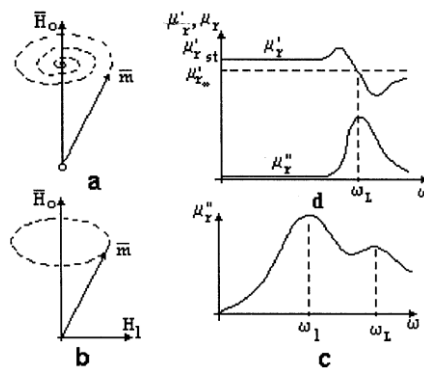


fig.2.11 Mișcarea de precesie amortizată (a) și neamortizată (b) a momentului magnetic \overline{m} și dependențele de frecvență ale permeabilităților magnetice a materialelor cu pierderi prin rezonanță magnetică (d) și a feritelor (d) [Căt]

Mișcarea de precesie Larmor, cu pulsația $\omega_L = \gamma H_0$, unde γ este coeficientul giromagnetic, este o mișcare amortizată datorită interacțiunilor cu rețeaua cristalină.

Aplicând un câmp magnetic $H_1 = H_{1\max} \sin \omega_L t$, cu orientare perpendiculară în raport cu direcția câmpului H_0 , mișcarea de precesie nu mai este amortizată, rezultând rezonanța magnetică.

Dependențele componentelor permeabilității relative de frecvență a câmpului magnetic H_1 , reprezentate în fig. 2.11d, sunt asemănătoare celor din fig. 1.6. Pierderile maxime de putere având loc la frecvențe Larmor.

Pentru ferite se constată experimental ca există două maxime ale componentei μ_r : primul maxim apare la rezonanța deplasării pereților Bloch, iar al doilea la frecvența Larmor (fig. 2.11.c).

2.8. Tipuri de materiale magnetice [Căt]

Materialele magnetice cu câmp coercitiv redus se numesc moi și sunt utilizate la fabricarea miezurilor magnetice, iar cele dure, cu câmp coercitiv ridicat, sunt utilizate la fabricarea magneților permanenți și pentru înregistrarea magnetică a informației.

a) Materiale pentru miezuri magnetice

Aliajele feroase cu conținut de siliciu sunt utilizate sub formă de tole, la realizarea miezurilor de transformator. Aliajele Fe-Ni, de tip permalloy având $\mu_r > 100000$ și $B_{\text{sat}} = 1,5\text{T}$, cu conținut de nichel în proporție de 40÷50 %, sub formă de tole cu grosimi de ordinul zecilor de μm , sunt utilizate pentru realizarea transformatoarelor care funcționează la frecvențe ridicate (zeci de kHz).

Aliajele Fe-Co, de tip permendur, având $B_{\text{sat}} = 2,5\text{T}$, sunt folosite pentru fabricarea electromagneților, iar aliajele Fe-Co-Ni, de tip perminvar, a căror permeabilitate nu se modifică semnificativ până la intensități ridicate ale câmpului magnetic aplicat, se utilizează la realizarea miezurilor liniare pentru bobine, datorită dependenței liniare a inducției (magnetizației) de câmp.

De asemenea, feritele sinterizate sunt des utilizate pentru realizarea miezurilor magnetice ale bobinelor și transformatoarelor care funcționează la frecvențe ridicate.

b) Materiale pentru magneți permanenți

Eficacitatea unui magnet permanent se apreciază prin valoarea energiei în întrefier, valoare care depinde de produsul (BH).

Se impune ca materialele utilizate la fabricarea magneților permanenți să aibă un indice de calitate (BH) de valoare ridicată.

Astfel de materiale sunt: oțelurile aliate cu conținut de cobalt, nichel, aluminiu sau cupru. Anizotropia magnetică este indusă prin tratament termic în câmp magnetic.

Feritele cu conținut de cobalt sau bariu, sunt de asemenea utilizate pentru realizarea magneților permanenți. Materialele ferimagnetice, în compoziția cărora sunt elemente din seria pământurilor rare, sunt utilizate pentru generarea unor câmpuri magnetice extrem de intense.

c) Materiale pentru înregistrarea magnetică a informației

Aceste materiale presupun o dependență univocă între inducția remanentă și câmpul magnetic exterior precum și valori ridicate ale câmpului magnetic

coercitiv, pentru evitarea ștergerii accidentale a informației în prezența unor câmpuri magnetice perturbatoare.

Materialul magnetic, sub formă de granule, cu dimensiuni cuprinse între 0,5μm și 1μm, se amestecă cu un liant dielectric și se depune pe un substrat, sub forma unui strat cu grosimea de aproximativ 20μm. Dimensiunile granulelor din oxizi de fier (Fe₂O₃) sau crom (CrO₂) și uniformitatea stratului depus influențează raportul semnal / zgomot și calitatea înregistrării. Performanțe deosebite sunt obținute cu pelicule metalice din aliaje Fe-Co-Ni.

d) Materiale termocompensatoare și piezomagnetice

Materialele termocompensatoare sunt aliaje de Ni cu Fe, Cu sau Cr și se caracterizează prin temperaturi Curie: $T_C < 100^\circ\text{C}$. Permeabilitatea acestor materiale crește pronunțat cu scăderea temperaturii, aceasta proprietate fiind utilizată pentru a menține constant într-un interval larg de temperatură, fluxul magnetic produs de un magnet permanent. Pentru compensarea variației fluxului se introduce în circuitul magnetic un material termocompensator.

Materialele piezomagnetice se caracterizează prin efect piezomagnetic pronunțat, efect utilizat la realizarea generatoarelor sonice și ultrasonice. Astfel de materiale sunt aliajele Ni-Fe, Ni-Co sau feritele cu conținut de cobalt.

2.9. Întrebări

1. Descrieți starea de magnetizație a materialelor magnetice și definiți mărimile caracteristice.

2. Să se argumenteze motivul pentru care susceptivitatea magnetică poate sau nu poate fi negativă sau nulă;

Se are în vedere relația dintre inducția magnetică și câmpul magnetic aplicat și că pentru permeabilitatea nulă inducția este nulă în prezența câmpului, iar pentru permeabilitatea negativă sensurile inducției și câmpului sunt opuse, rezultând incompatibilitatea cu teoria câmpului electromagnetic.

3. Clasificați succint materialele magnetice după tipul magnetizației și al dependenței magnetizației de câmpul magnetic aplicat.

4. Să se explice apariția magnetizației temporare la materialele diamagnetice și paramagnetice și a magnetizației spontane la materialele fero- și ferimagnetice;

5. Analizați tipurile de magnetizări pe baza proceselor care au loc în fiecare tip de material magnetic:

6. Să se arate care sunt asemănările și deosebirile dintre materialele dielectrice și cele magnetice, din punctul de vedere al definirii mărimilor caracteristice și clasificării acestor materiale:

7. Enumerați și comentați pe baza diagramelor asociate, principalele funcții ale materialelor magnetice:

Se pornește de la expresiile inducției electrice și magnetice, respectiv ale polarizației și magnetizației în funcție de câmpul electric sau magnetic aplicat și se dezvoltă diferențiat aspectele (dia- și paramagnetice etc.) legate de aceste expresii.

8. Explicați modul prin care se realizează funcția de înregistrare magnetică a informației.

Pentru informația numerică se utilizează materiale suport cu ciclul histeresis dreptunghiular, iar pentru informația analogică, corespondența biunivocă între magnetizație și câmp magnetic alternativ cu intensitate redusă, peste câmpul

magnetic variabil, astfel încât punctul curent, care caracterizează starea locală a materialului să se deplaseze pe caracteristica de primă magnetizare.

9. Explicați natura fizică a apariției feromagnetismului.

10. Exprimați și comentați principalele energii care intervin în procesul de magnetizare, în tratarea macroscopică detaliată a procesului de magnetizare, la nivel de domenii:

11. Analizați o structură magnetică cu flux deschis, de tip monodomeniu și structurile cu flux închis- de tip Landau- Lifschitz, precum și evoluția acestor structuri atunci când grosimea eșantionului magnetic se micșorează:

12. Explicați din punct de vedere energetic condiția ca structura de domenii a unui material feromagnetic să devină stabilă;

13. Explicați din punct de vedere energetic, stabilirea lățimii peretelui de domenii;

14. Motivați pe baza energiilor implicate, formarea domeniilor de magnetizare și a pereților de domenii, punând accentul pe modul prin care se realizează echilibrul energiilor și echilibrul stabil atât a lățimii domeniilor de magnetizare, cât și a lățimii pereților de domenii;

Pe baza expresiilor energiilor implicate, se va arăta că echilibrul atabil se obține atunci când creșterea unor energii este asociată cu scăderea altor energii:

15. Să se analizeze modificarea structurii de domenii pentru grosimi descrescătoare ale materialului feromagnetic, pentru grosimi mari și mici, structura de domenii fiind cu flux deschis, iar pentru grosimi intermediare structura fiind cu flux închis;

Se vor trasa schematic structuriile cu flux deschis, de tip monodomeniu (cu energie de demagnetizare ridicată), cu flux închis (fără sarcini magnetice fictive superficiale) și structura Kittel (cu lățimi ale domeniilor de magnetizare comparabile cu grosimea eșantionului astfel încât nu se mai pot forma monenii prismatice de închidere);

16. Scrieți legea de material pentru materiale magnetice, utilizând mărimi vectoriale sau complexe și arătați motivul pentru care relația între mărimile complexe este mai susceptibilă interpretării teoretice;

17. Analizați anizotropia magneto-cristalină și indusă și precizați direcțiile axelor de magnetizare ușoară, medie și grea pe baza celulelor elementare, pentru fier, nichel și cobalt;

18. Descrieți procesul de magnetizare al materialelor fero- și ferimagnetice, pe baza curbei de magnetizare, utilizând pentru exemplificare, o structură magnetică cu flux închis;

19. Analiza pe baza curbei de magnetizare, diferitele tipuri de cicluri minore, care apar atunci când peste componenta continuă a câmpului magnetic aplicat, se suprapune și o componentă alternativă, precizând modul în care se deplasează punctul de stare al materialului magnetic, pe aceste cicluri minore;

20. Considerând curba de magnetizare a materialelor feromagnetice, să se indice și să se explice porțiunile în care procesele de magnetizare sunt reversibile, sau ireversibile și să se explice apariția stărilor magnetizată și demagnetizată, la intersecțiile curbei cu axele de coordonate;

21. Comparați permeabilitățile magnetice: diferențială și reversibilă și analizați modificarea permeabilității magnetice reversibile, atunci când intensitatea câmpului magnetic aplicat se modifică;

22.Să se argumenteze motivul pentru care relația de legătură între inducția magnetică și câmpul magnetic aplicat, este o relație între mărimi complexe și are un grad de exactitate mai redus.

Se are în vedere că în câmpul magnetic staționar, dar mai ales variabil, intervin proprietățile de material, prin susceptibilitatea magnetică, vâscozitatea magnetică, pierderile prin magnetizare și postefectul.

23.Să se motiveze relația de inegalitate dintre permeabilitatea magnetică diferențială și cea reversibilă, pentru un material feromagnetic.

24.Motivați, utilizând postefectul, scăderea permeabilității magnetice relative atunci când frecvența câmpului magnetic aplicat se mărește.

25.Să se arate cum se modifică forma ciclului de histeresis minor la creșterea frecvenței câmpului magnetic aplicat din exterior.

26.Descrieți modul în care se deplasează peretele de domeniu a unei structuri de tip Kittel și motivați, pe bază energetică, extinderea domeniilor de magnetizare în care magnetizația are același sens cu câmpul magnetic aplicat;

27.Să se analizeze din punct de vedere energetic, extinderea domeniilor cu magnetizația orientată în sensul câmpului magnetic aplicat.

R: Presupunând că energia totală este suma dintre energia de demagnetizare pozitivă și energia de interacțiune cu câmpul magnetic aplicat din exterior, energia totală minimă se obține pentru semnal negativ al energiei de interacțiune cu câmpul magnetic exterior.

28.Descrieți prin relații și diagrame fazoriale, pierderile de putere activă în materialele fero- și ferimagnetice și specificați semnificațiile componentelor permeabilității magnetice relative complexe:

29.Pentru determinarea componentei reale a permeabilității relative și a tangentei unghiului de pierderi a materialelor feromagnetice, se utilizează un circuit rezonant serie și un Q-metru. Să se stabilească configurațiile circuitelor de măsurare și algoritmul măsurărilor.

30.Să se argumenteze micșorarea componentei reale a permeabilității magnetice relative, atunci când frecvența câmpului magnetic aplicat se mărește și să se explice alura dependenței de frecvență a componentei imaginare a permeabilității magnetice relative.

31.Analizați pierderile prin curenți turbionari și modalitatea de micșorare a lor.

32.Analizați pierderile prin histeresis și precizați modalitatea de micșorare a lor.

33.Analizați, pe baza curbei de magnetizare, pierderile prin magnetizare;

34.Analizați pierderile prin rezonanță magnetică.

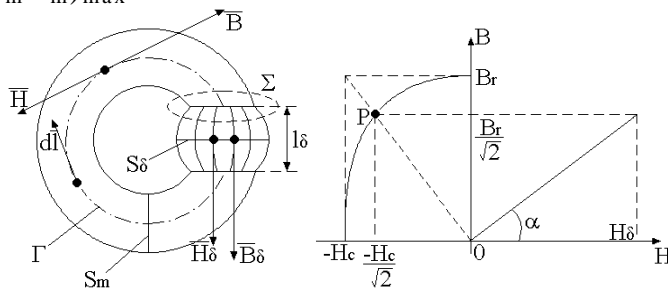
35.Având în vedere pierderile prin rezonanță magnetică, să se argumenteze similitudinea dependențelor de frecvență ale componentelor permeabilității relative a materialelor feromagnetice, cu dependențele de frecvență ale componentelor permitivității relative a materialelor dielectrice cu polarizare de deplasare și să se explice apariția pierderilor prin rezonanță magnetică.

R: Se are în vedere că în ambele situații apare un proces de rezonanță.

2.10. Probleme

1. Se considera un tor realizat dintr-un material feromagnetic, care se magnetizeaza la saturatie prin intermediul unei infasurari parcurse de un curent si care se anuleaza ulterior, iar infasurarea se îndeparteaza. Sa se determine

valoarea întrefierului astfel încât sa se obtina indicele de calitate maxim în miez : $(B_m H_m)_{max}$.



Rezolvare:

Indicele de calitate maxim în miez se obtine în punctul $P(-\frac{H_c}{\sqrt{2}}, \frac{B_r}{\sqrt{2}})$, situat pe caracteristica de demagnetizare, aproximata cu un arc de elipsa.

Din legea fluxului magnetic prin suprafata Σ rezulta ca inductia magnetica în fier si întrefier are aceeasi valoare si sens; daca se presupune sectiunea torului suficient de redusa pentru a considera câmpul magnetic uniform pe sectiune si daca se neglijeaza efectele de margine, sau $S_m = S_\delta$:

$$B_m S_m = B_\delta S_\delta$$

Din legea circuitului magnetic rezulta sensul opus al câmpului magnetic în miez \overline{H}_m , fata de câmpul magnetic în întrefier : $\overline{H}_\delta = \overline{B}_\delta / \mu_0$:

$$\oint_{\Gamma} \overline{H} dl = -H_m l_m + H_\delta l_\delta,$$

unde : l_m este lungimea mediana a miezului feromagnetic.

Rezulta:

$$B_m = B_\delta = \mu_0 H_\delta = \mu_0 H_m \frac{l_m}{l_\delta},$$

iar pentru a obtine indicele de calitate maxim, care corespunde energiei maxime în miez, lungimea optima a întrefierului, este:

$$l_{\delta opt} = \frac{\mu_0 H_c l_m}{B_r}$$

Densitatea totala de energie w este suma densitatilor de energie în miez si întrefier:

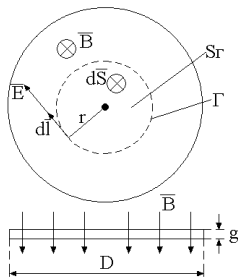
$$w = w_m + w_\delta = \frac{H_m B_m}{2} + \frac{H_\delta B_\delta}{2}.$$

Daca punctul P se deplaseaza pe curba de demagnetizare într-un sens, sau în sens opus fata de punctul de referinta $P(-\frac{H_c}{\sqrt{2}}, \frac{B_r}{\sqrt{2}})$, cresterea de energie totala datorita cresterii unui termen, este mai mica decât scaderea de energie, datorita scaderii celuilalt termen. Prin urmare densitatea maxima de energie a sistemului format din miezul magnetic si întrefier corespunde punctului $P(-\frac{H_c}{\sqrt{2}}, \frac{B_r}{\sqrt{2}})$.

Este de retinut ca atunci când se cunoaste dimensiunea întrefierului, pentru obtinerea unei energii ridicate în întrefier, materialul magnetic trebuie sa indeplineasca conditia impusa pentru $l_{\delta opt}$. Sa se studieze în acest sens problema inversa, cu aplicatie - de exemplu - la difuzoare sonore.

2. Un disc feromagnetic având $\rho = 6 \cdot 10^{-7} \Omega m$ si dimensiunile: $D = 10 \text{ cm}$, $g = 1 \text{ mm}$, este strabatut normal de un câmp magnetic omogen cu $B_{ef} = 0,5 \text{ T}$ si

frecvența $f = 50 \text{ Hz}$. Sa se calculeze pierderile prin curenti turbionari în disc.



Rezolvare:

Din legea inducției electromagnetice rezulta:

$$\oint_{\Gamma} \vec{E} d\vec{l} = - \int_{S_r} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S} = - \frac{\partial \Phi}{\partial t}.$$

Datorita simetriei cilindrice:

$$E = \frac{r}{2} \frac{\partial B}{\partial t} = \frac{r}{2} B_{\max} \omega \cos \omega t.$$

Densitatea de curent are expresia:

$$J = \sigma E = \frac{E}{\rho} = \frac{r}{2} B_{\max} \omega \cos \omega t$$

Puterea activa dezvoltata în unitatea de volum este:

$$p(t) = \vec{J} \cdot \vec{E} = \frac{E^2}{\rho} = \frac{r^2}{4\rho} B_{\max}^2 \omega^2 \cos^2 \omega t$$

Puterea activa dezvoltata în disc are expresia:

$$P(t) = \int_V p(t) dv = \omega^2 B_{\max}^2 \cos^2 \omega t D^4 \pi g / (128\rho),$$

Tinând cont de relatia:

$$\int_0^T \sin^2 x dx = \int_0^T \cos^2 x dx = \frac{T}{2},$$

puterea activa dezvoltata pe o perioada, sau putere medie, este:

$$P_{\text{med}} = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt = f^2 B_{\text{ef}}^2 D^4 \pi^3 g / (32\rho) \cong 100 \text{ W}$$

Valoarea relativ ridicata a puterii disipate prin curenti turbionari se datoreaza valorii ridicate a inducției magnetice în spatiul în care este plasat discul feromagnetic.

3. Pentru un disc ferimagnetic cu ciclu de histeresis dreptunghiular caracterizat prin: $H_c = 25 \text{ A/m}$ si $B_f = 1,2 \text{ T}$, având diametrul $D = 10 \text{ cm}$ si grosimea $g = 1 \text{ mm}$, sa se determine pierderile de putere activa prin histeresis, la o frecvența de 50 kHz .

Rezolvare:

Energia specifica, corespunzatoare unitatii de volum, furnizata de câmpul magnetic exterior, pentru parcurgerea unui ciclu de histeresis, are expresia:

$$w_H = \oint_{\text{ciclu}} H dB = 2B_f \cdot 2H_c = 120 \text{ J/m}^3$$

Energia corespunzatoare întregului volum al discului, este:

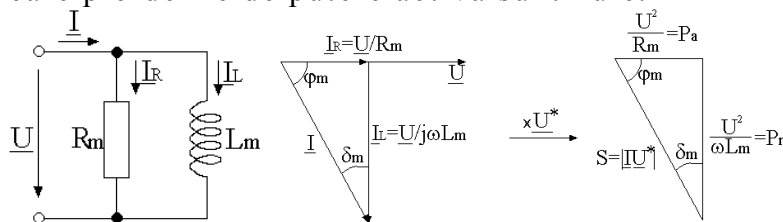
$$W_H = \frac{\pi D^2}{4} g \cdot w_H = 3 \cdot 10^{-4} \text{ J}$$

Pierderile de putere prin histeresis sunt egale cu energia furnizata de câmpul magnetic exterior, într-o secunda, sau:

$$P_H = f \cdot W_H = 50 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot 10^{-4} = 15 \text{ W.}$$

Valoarea ridicata a pierderilor de putere prin histeresis se datoreaza valorii ridicate a inductiei remanente, câmpul coercitiv având intensitate redusa, comparabila cu intensitatea câmpului magnetic al pamântului (15 A/m).

4. Pe un miez magnetic având $\text{tg } \delta_m = 5 \cdot 10^{-2}$, se bobineaza o înfasurare alimentata la o tensiune: $U=220 \text{ V}$ si frecventa: $f=50 \text{ Hz}$, curentul prin înfasurare fiind: $I=1 \text{ A}$. Sa se determine: parametri schemei echivalente paralel; raportul sectiune/lungime daca $\mu'_r=1100$ si numarul de spire este: $N=100$; modulul permeabilitatii relative complexe; expresia puterii dezvoltate instantaneu în cazul în care pierderile de putere activa sunt nule.



Rezolvare:

Expresiile tangentei unghiului de pierderi si puterii aparente sunt:

$$\text{tg } \delta_m = \frac{P_a}{P_r} = \frac{UI \cos \phi_m}{UI \sin \phi_m} = \frac{\omega L_m}{R_m},$$

$$S^2 = P_a^2 + P_r^2.$$

Din sistemul de ecuatii rezulta valorile: $P_a = 10,99 \text{ W}$; $P_r = 219 \text{ VAR}$

Parametri schemei echivalente paralel au expresiile:

$$R_m = \frac{U^2}{P_a} = 4405 \Omega,$$

$$L_m = \frac{U^2}{\omega P_r} = 0,70 \text{ IH.}$$

Din expresia inductivitatii:

$$L_m = \mu_0 \mu'_r \frac{N^2 S}{l},$$

rezulta:

$$\frac{S}{l} = \frac{L_m}{\mu_0 \mu'_r N^2} = 0,05 \text{ m.}$$

Permeabilitatea relativa complexa are expresia:

$$\underline{\mu}_r = \mu'_r - j \mu''_r = \mu'_r (1 - j \cdot \text{tg } \delta_m),$$

iar modulul permeabilitatii complexe este:

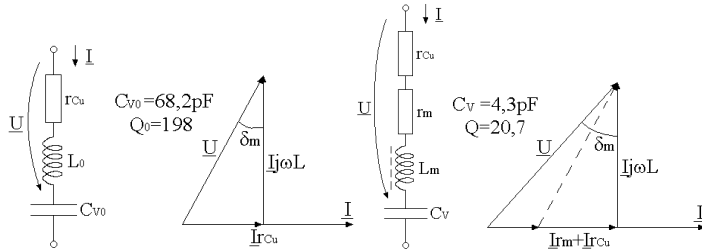
$$|\underline{\mu}_r| = \mu'_r \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta_m} = 110142.$$

Daca consideram ca pierderile de putere activa sunt nule, defazajul între tensiune si curent este: $\phi_m = \pi/2$, iar expresia puterii reactive este:

$$P_r = U_{\max} \sin \omega t \cdot I_{\max} \cos \omega t = \frac{U_{\max} \cdot I_{\max}}{2} \sin 2\omega t = U_{\text{ef}} I_{\text{ef}} \sin 2\omega t.$$

Rezulta ca puterea are o pulsatie dubla fata de pulsatia tensiunii si curentului. Se va studia aceeași problema utilizând schema echivalenta serie.

5. La aceeași frecvență de rezonanță f^* , s-au determinat cu un Q-metru, valorile capacității variabile și ale factorului de calitate pentru aceeași bobină cu și fără miez ferimagnetic. Să se determine valoarea permeabilității magnetice relative și tangenta unghiului de pierderi a bobinei cu miez pentru frecvența f^* . Factorul de calitate al condensatorului variabil este mult mai ridicat decât cel al bobinei.



Rezolvare:

Pentru bobina fără miez magnetic, se pot scrie relațiile:

$$f^* \cong \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_{v0}}}; \quad Q_0 = \frac{\omega L_0}{r_{cu}}; \quad r_{cu} = \frac{1}{Q_0} \sqrt{\frac{L_0}{C_{v0}}},$$

unde: r_{cu} este rezistența înfășurării.

Pentru bobina cu miez, relațiile sunt asemănătoare:

$$f^* \cong \frac{1}{2\pi\sqrt{L_m C_v}}; \quad Q = \frac{\omega L_m}{r_{cu} + r_m}; \quad r_{cu} + r_m = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{L_m}{C_v}},$$

unde: r_m sunt pierderile în miezul magnetic.

Rezulta:

$$L_0 C_{v0} = L_m C_v; \quad r_m = \frac{\omega L_m}{Q} - r_{cu} = \frac{\omega L_m}{Q_1} - \frac{\omega L_0}{Q_0}.$$

Știind că: $L_m C_v = \mu_r' L_0 C_v$ și $r_m = \omega \mu_r'' L_0$, rezulta:

$$\mu_r' = \frac{1}{\omega^2 L_0 C_v}.$$

Componenta reală a permeabilității magnetice se poate determina și cu relația:

$$\mu_r' = \frac{L_m}{L_0} = \frac{C_{v0}}{C_v} = 15,86$$

Se prezintă trei variante de calcul a tangentei unghiului de pierderi:

Varianta I:

$$\operatorname{tg} \delta_m = \frac{r_m}{\omega L_m} = \frac{1}{Q} - \frac{L_0}{L_m} \cdot \frac{1}{Q_0} = \frac{1}{Q} - \frac{1}{\mu_r' Q_0} = \frac{\mu_r' Q_0 - Q}{\mu_r' Q_0 Q} = 0,048$$

Varianta II:

$$\text{Pentru bobina fără miez: } \operatorname{tg} \delta_{cu} = \frac{r_{cu}}{\omega L_0} = \frac{1}{Q_0}.$$

Pentru bobina cu miez, se pot scrie următoarele relații:

$$L_m = \mu_r' L_0$$

$$\operatorname{tg} \delta_m = \frac{1}{Q} = \frac{r_{cu} + r_m}{\omega \mu_r' L_0} = \frac{1}{\mu_r'} \operatorname{tg} \delta_{cu} + \operatorname{tg} \delta_m,$$

de unde rezulta:

$$\operatorname{tg} \delta_m = \frac{1}{Q} + \frac{1}{\mu_r' Q_0}$$

Varianta III:

Pentru bobina cu miez, factorul de calitate are expresia:

$$Q = \frac{\omega L_m}{r_{cu} + r_m} = \frac{\omega \mu_r' L_0}{r_{cu} + \omega \mu_r'' L_0}$$

Stiind ca:

$$\mu_r' = \frac{1}{\omega^2 L_0 C_v} = 15,86,$$

$$\mu_r'' = \left(\frac{\omega \mu_r' L_0}{Q} - r_{cu} \right) \frac{1}{\omega L_0} = \frac{\mu_r'}{Q} - \frac{1}{Q_0} = 0,76,$$

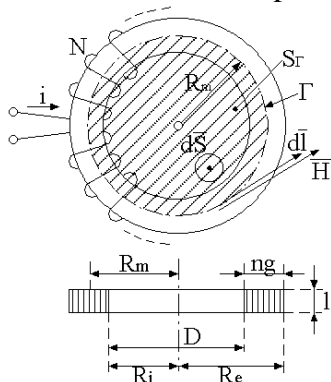
tangenta unghiului de pierderi, este:

$$\operatorname{tg} \delta_m = \frac{\mu_r''}{\mu_r'} = 0,048.$$

Permeabilitatea relativa are expresia:

$$|\mu_r| = \mu_r' \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta_m} \cong \mu_r'$$

6. Pentru un material feromagnetic se cunoaste curba de magnetizare. Dintr-o banda de latime: $l=3$ cm, grosime: $g=0,35$ mm si lungime: $L=48$ m, se confectioneaza un tor prin infasurarea benzii pe un cilindru cu diametrul: $D=10,8$ cm. Pe tor se bobineaza uniform: $N=175$ spire. Sa se determine permeabilitatea relativa statica si diferentia in punctul de functionare al miezului pentru un curent $i=0,6$ A si sa se calculeze inductivitatea. Intensitatea campului magnetic se considera uniforma pe sectiunea miezului.



$H \text{ } \frac{\text{A}}{\text{m}}$	$B \text{ } \text{T}$
150	0,3
200	0,4
245	0,5
280	0,6
310	0,7

Rezolvare:

Se determina dimensiunile sectiunii torului.

$$R_m = \frac{R_i + R_e}{2},$$

$$R_e - R_i = ng,$$

$$L = 2\pi R_m \cdot n,$$

de unde rezulta: $R_e = 9,09$ cm, iar $R_m = 7,245$ cm; $n = 105$ spirale.

Sectiunea miezului este:

$$S = (R_e - R_i)l = 11,07 \text{ cm}^2$$

Legea circuitului magnetic are forma:

$$\oint_{\Gamma} \vec{H} \cdot d\vec{l} = H \cdot 2\pi \cdot R_m = \int_{S_r} \vec{J} \cdot d\vec{s} = N \cdot i,$$

de unde rezulta: $H = 230$ A/m.

Prin interpolare liniara, rezulta: $B = 0,468$ T.

Permeabilitatile relative statica si diferentia in punctul de functionare, au valorile:

$$\mu_{r_{st}} = \frac{B}{\mu_0 H} = 1,62 \cdot 10^3$$

$$\mu_{r_{dif}} = \frac{\Delta B}{\mu_0 \Delta H} = \frac{0,5 - 0,4}{4\pi \cdot 10^{-7} (245 - 200)} = 1,77 \cdot 10^3$$

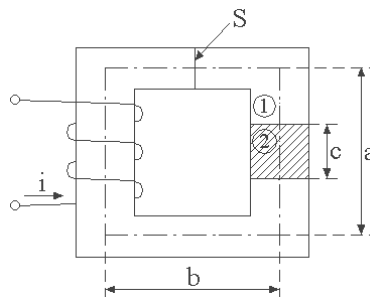
Inductivitatea torului are expresia:

$$L = \mu_0 \mu_{r_{st}} \frac{N^2 S}{2\pi R_m} = 15 \text{ mH}$$

Inductivitatea s-a calculat utilizând permeabilitatea relativă statică întrucât curentul care parcurge înfășurarea este considerat alternativ. Dacă se considera înfășurarea ca fiind parcursă de un curent continuu: $I = 0,6 \text{ A}$, peste care se suprapune un curent alternativ cu amplitudine relativ redusă, inductivitatea torului are valoarea:

$$L = \mu_0 \mu_{r_{dif}} \frac{N^2 S}{2\pi R_m} = 165 \text{ mH}$$

7. Un miez magnetic de forma dreptunghiulară, are secțiunea $S = 1 \text{ cm}^2$, lungimea $a = 4 \text{ cm}$, latimea $b = 3 \text{ cm}$. Pe o porțiune $c = 2 \text{ cm}$, materialul magnetic "2" are permeabilitate magnetică $\mu_r = 300$ diferită de restul miezului magnetic. Să se determine curentul printr-o înfășurare cu $N = 100$ spire astfel ca inducția în miez să fie: $B = 0,5 \text{ T}$. Din curba de magnetizare a materialului magnetic "1" rezultă că pentru inducția magnetică de $0,5 \text{ T}$, intensitatea câmpului magnetic corespunzător este $H_1 = 245 \text{ A/m}$.



Rezolvare:

Din legea circuitului magnetic, rezultă :

$$H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 = Ni,$$

unde : $l_1 = 2(a+b) - c = 11 \text{ cm}$

$$l_2 = c = 3 \text{ cm}$$

Intensitatea câmpului magnetic în materialul magnetic "2" este :

$$H_2 = \frac{B}{\mu_0 \mu_r} = 1327 \text{ A/m}$$

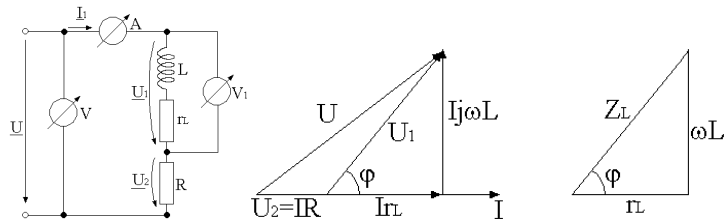
Din prima relație rezultă valoarea curentului:

$$i = 0,67 \text{ A}$$

Se va studia aceeași problemă în care materialul magnetic "2" este un magnet permanent. Se vor analiza condițiile în care energia magnetică a ansamblului este maximă.

8. Se considera o bobină cu miez magnetic conectată în serie cu un rezistor a cărui rezistență este : $R = 80 \text{ ohm}$. Circuitului i se aplică o tensiune alternativă $U = 220 \text{ V}$ cu frecvența $f = 50 \text{ Hz}$, curentul prin circuit are valoarea $I = 1 \text{ A}$, iar tensiunea pe bobină este $U_1 = 180 \text{ V}$. Să se determine parametrii schemei echivalente a bobinei și pierderile de putere activă în miezul magnetic știind că

rezistenta înfășurării măsurată în curent continuu are valoarea $r_{cu} = 20 \text{ ohm}$.



Rezolvare:

Patratul laturii opuse unui unghi obtuz este egal cu suma patratelor celorlalte doua laturi plus de doua ori produsul uneia dintre aceste laturi cu proiectia celeilalte laturi pe ea. Prin urmare :

$$\cos\varphi = \frac{U^2 - U_1^2 - U_2^2}{2U_1U_2} = 0,407.$$

Cunoscând valorile tensiunii aplicate bobinei si curentului care o parcurge, rezulta :

$$Z_L = \frac{U_1}{I} = 180 \Omega$$

Parametrii schemei echivalente sunt :

$$r_L = Z_L \cos\varphi = 73 \Omega,$$

$$\omega L = Z_L \sin\varphi = Z_L \sqrt{1 - \cos^2\varphi} = 164 \Omega$$

iar inductivitatea bobinei cu miez are valoarea :

$$L = \frac{Z_L \sin\varphi}{2\pi f} = 0,52 \text{H}.$$

Pierderile totale de putere activa cuprind pierderile de putere în înfășurarea din cupru si în miezul magnetic :

$$P_a = P_{cu} + P_m = I^2 r_{cu} + I^2 r_m = I^2 r_L = 73 \text{ W}.$$

Pierderile de putere în înfășurarea din cupru, sunt :

$$P_{cu} = I^2 r_{cu} = 20 \text{ W}$$

iar pierderile în miez magnetic si rezistenta echivalenta de pierderi au valorile :

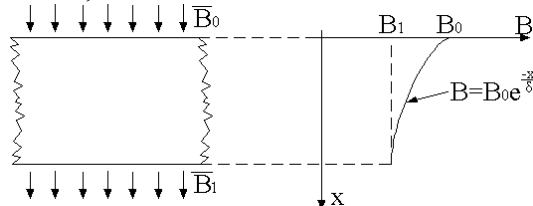
$$P_m = P - P_{cu} = 53 \text{ W}$$

$$r_m = \frac{P_m}{I^2} = 53 \Omega.$$

9. Se considera un ecran sub forma de placa cu suprafata $S=8\text{cm}$ si cu grosimea $d=0,2 \text{ mm}$, realizat dintr-un material conductor cu conductivitatea $\sigma = 6,25 \cdot 10^7 \text{ S/m}$. Ecranul este strabatut de un câmp magnetic omogen cu $B = B_0 \sqrt{2} \sin\omega t$, $B_0 = 10^{-3} \text{ T}$, $f = 1 \text{ MHz}$. Atenuarea câmpului în adâncimea "x" a ecranului se considera de tip exponential : $B = B_0 e^{-x/\delta}$, unde $\delta = \sqrt{1/(\pi f \mu_0 \sigma)}$ este adâncimea de patrundere a câmpului fata de suprafata: $x = 0$, a ecranului.

a) Sa se determine inductia magnetica dupa ecranul magnetic;

b) Sa se compare densitatile de energie magnetica ale câmpului înainte si dupa ecranare si sa se determine pierderile de energie (prin curenti turbionari), care se transforma în caldura, în ecran.



Rezolvare:

a) Adâncimea de patrundere are valoarea :

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu_0 \sigma}} = 0,0636 \text{ mm},$$

iar inductia magnetica dupa ecran, este :

$$B_1 = B_0 e^{-\frac{d}{\delta}} = 43,2 \cdot 10^{-6} \text{ T}.$$

b) Energiile magnetice specifice înainte si dupa ecranare sunt :

$$w_{m_0} = \frac{1}{2} B_0 H_0 = \frac{1}{2\mu_0} B_0^2 = 0,397 \text{ J/m}^3,$$

$$w_{m_1} = \frac{1}{2} B_1 H_1 = \frac{1}{2\mu_0} B_1^2 = 74,3 \cdot 10^{-5} \text{ J/m}^3$$

Prin urmare energia dupa ecranare este de 535 ori mai mica decât înainte de ecranare. La frecvente ridicate, adâncimea de patrundere este redusa si ecranele pot fi confectionate din materiale conductoare fara proprietati magnetice care ar presupune existenta pierderilor prin magnetizare si histeresis.

Pierderile specifice de energie prin curenti turbionari sunt :

$$\Delta w = w_{m_0} - w_{m_1} = 0,396 \text{ J/m}^3$$

Pierderile de energie în întreg volumul ecranului sunt :

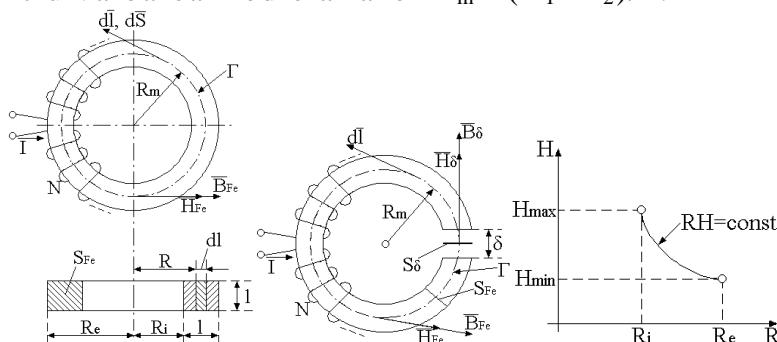
$$\Delta W = \Delta w \cdot S \cdot d = 6,33 \cdot 10^{-8} \text{ J}$$

iar puterea transformata în caldura are valoarea :

$$P = f \cdot \Delta W = 63,3 \text{ mW}.$$

Este de retinut ca în fiecare perioada energia se transforma în caldura si cu cât numarul de perioade dintr-o secunda este mai mare, cu atât si pierderea de energie prin curenti turbionari, transformata în caldura, este mai mare.

10. Se considera un tor realizat dintr-un material feromagnetic cu $\mu_r = 3000$, de sectiune patrata, cu raza interioara si exterioara: $R_i = 4 \text{ cm}$, $R_e = 7 \text{ cm}$, pe care se bobineaza: $N = 500$ spire, parcurse de un curent $I = 0,5 \text{ A}$. Sa se determine dependenta de raza a câmpului magnetic si fluxul magnetic în miez. Se practica un întrefier: $\delta = 1 \text{ mm}$ si se neglijeaza efectele de margine : $S_\delta = S_{Fe}$. Sa se determine intensitatea câmpului magnetic în întrefier si inductia magnetica pentru valoarea medie a razei $R_m = (R_1 + R_2)/2$.



Rezolvare:

Expresia intensitatii câmpului magnetic se obtine din legea circuitului magnetic :

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = 2\pi RH = IN; H = \frac{IN}{2\pi R}$$

Valorile extreme ale intensitatii campului magnetic sunt :

$$H_{\min} = 571 \text{ A/m}, H_{\max} = 1000 \text{ A/m}.$$

Fluxul magnetic în miez are expresia :

$$\oint_{S_{Fe}} \vec{B} \cdot d\vec{S} = \mu_0 \mu_r' \frac{IN}{2\pi} \ln \frac{R_e}{R_i} = 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ Wb.}$$

Pentru miezul cu întrefier, din legile circuitului și fluxului magnetic rezulta relațiile:

$$\oint_{\Gamma} \vec{H} \cdot d\vec{l} = 2\pi(R_m - \delta)H_{Fe}' + \delta H_{\delta}' = IN,$$

$$B_{Fe}' = \mu_0 \mu_r' H_{Fe}' = \mu_0 H_{\delta}' = B_{\delta}'.$$

Rezulta, pentru, raza medie a torului :

$$H_{\delta}' = \frac{IN \mu_r'}{\delta(\mu_r' - 1) + 2\pi R_m} = 22,4 \cdot 10^4 \text{ A/m}$$

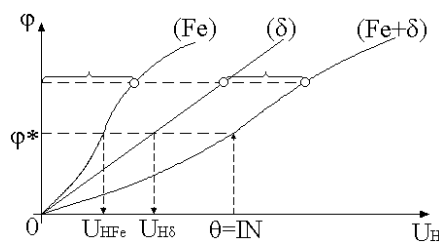
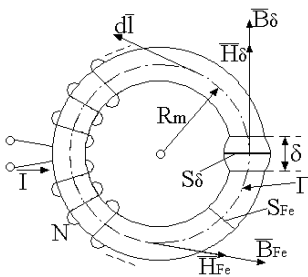
$$B_{\delta}' = \mu_0 H_{\delta}' = B_{Fe}' = 0,28 \text{ T.}$$

11. Un miez feromagnetic toroidal din tole, cu raza medie : $R = 2 \text{ cm}$ și secțiune: $S_{Fe} = 1,77 \text{ cm}^2$, bobinat uniform cu $N = 7000$ de spire, are următoarea curba de magnetizare :

$B \text{ T}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$H \text{ A/m}$	22	35	45	50	75	85	90	120	150

$B \text{ T}$	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7
$H \text{ A/m}$	188	275	400	750	1700	3200	6000	10500

- Sa se calculeze curentul maxim, știind ca $B_{\max} = 1,65 \text{ T}$;
- Pentru I_{\max} , sa se determine $\mu_{r_{st}}$, $\mu_{r_{dif}}$;
- Sa se calculeze I_{\max} , daca se practica un întrefier $\delta = 1 \text{ cm}$, cu secțiune: $S_{\delta} = 2 \text{ cm}^2$.
- Sa se calculeze $\mu_{r_{st}}$, $\mu_{r_{dif}}$ pentru miezul cu întrefier și $I = 1 \text{ A}$;



Rezolvare

a) Prin interpolare liniară, curba de magnetizare : $B \sim H$, identică cu $\Phi = B \cdot S \sim H \cdot l = U_H$, se aproximează prin segmente de dreaptă. Intensitatea maximă a câmpului magnetic în miez are valoarea : $H_{\max} = 8250 \text{ A/m}$, iar din legea circuitului magnetic, rezulta curentul corespunzător :

$$I = \frac{2\pi R H_{\max}}{N} = 1,29 \text{ A.}$$

Câmpul magnetic s-

a considerat constant pe secțiunea miezului, iar fluxul de dispersie s-a neglijat.

b) Permeabilitățile magnetice statice și diferențiale în punctul de funcționare sunt:

$$\mu_{r_{st}} = \frac{B_{\max}}{\mu_0 H_{\max}} = 159,15; \quad \mu_{r_{dif}} = \frac{\Delta B}{\mu_0 \Delta H} = 17,68.$$

c) Din legea fluxului magnetic pentru o suprafață închisă, care cuprinde

suprafata de separatie Fe-întrefier, rezulta :

$$B_{\delta}S_{\delta} = B_{Fe}S_{Fe}; \quad H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} = \frac{B_{Fe}S_{Fe}}{\mu_0 S_{\delta}} = 1162 \cdot 10^3 \text{ A/m}.$$

Din legea circuitului magnetic rezulta :

$$U_{H_{Fe}} + U_{H_{\delta}} = H_{Fe} \cdot l_{Fe} + H_{\delta} \cdot l_{\delta} = H_{Fe} (2\pi R - \delta) + H_{\delta} \cdot \delta = NI;$$

$$I = 15,7 \text{ A}.$$

d) Valoarea solenatiei este : $\theta = NI = 7000 \text{ A}$. Prin interpolare liniara se determina valorile câmpului magnetic si ale inductiei magnetice corespunzatoare valorii solenatiei. Cele doua portiuni de circuit magnetic : fier si întrefier, sunt strabatute de acelasi flux magnetic, curba rezultanta fiind obtinuta prin însumarea absciselor corespunzatoare unei ordonate. Din caracteristica rezulta valoarea fluxului magnetic Φ^* corespunzatoare solenatiei θ . Pentru aceasta valoare a fluxului, din cele doua curbe de magnetizare: pentru fier si întrefier, rezulta valorile tensiunilor magnetice $U_{H_{\delta}}$ si $U_{H_{Fe}}$. Cu valorile obtinute se determina intensitatea câmpului magnetic si inductia magnetica în fier. Procedul este ilustrat în tabel.

$B_{Fe} \text{ } \&T\&$	0,9	1	1,1
$B_{\delta} \text{ } \&T\&$	0,8	0,885	0,972
$H_{Fe} \text{ } \&A/m\&$	150	188	275
$H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \cdot 10^3 \text{ [A/m]}$	635	703	774
$U_{H_{Fe}} = H_{Fe} l_{Fe} \text{ [A]}$	14,4	21,8	31,9
$U_{H_{\delta}} = H_{\delta} \delta \text{ [A]}$	6350	7030	7740
$U_{H_{Fe}} + U_{H_{\delta}} = NI \text{ [A]}$	6367,4	7051,8	7771,9

$$NI = 7000$$

Valorile câmpului si inductiei, rezultate prin interpolare liniara sunt: $H_{Fe}^* = 185,2 \text{ A/m}$, $B_{Fe}^* \cong 1 \text{ T}$, $B_{\delta}^* \cong 0,88 \text{ T}$. Cu aceste valori, rezulta permeabilitatile magnetice relative corespunzatoare punctului de functionare precizat prin valorile câmpului si inductiei :

$$\mu_{r_{st}} = \frac{B_{Fe}^*}{\mu_0 H_{Fe}^*} = 4330 \quad \mu_{r_{dif}} = \frac{\Delta B}{\mu_0 \Delta H} = 6750$$

Este de remarcat ca valorile permeabilitatilor sunt apropiate pentru ca punctul de functionare se gaseste pe portiunea aproximativ liniara a curbei de magnetizare, spre deosebire de rezultatele de la punctul b), stabilite pentru un punct de functionare situat în regiunea de saturatie a curbei de magnetizare.

e) Sa se calculeze $\mu_{r_{st}}$ si $\mu_{r_{dif}}$, presupunând ca în întrefier se introduce un material ferimagnetic cu ciclu de histeresis dreptunghiular, având inductia remanenta : $B_r = 0,5 \text{ T}$ si câmp coercitiv: $H_c = 100 \text{ A/m}$. Curentul care parcurge înfasurarea are valoarea: $I=1 \text{ A}$.

12. Pentru determinarea tangentei unghiului de pierderi magnetice a unei ferite, sau determinat cu un Q-metru pentru diferite frecvente, urmatoarele valori ale permeabilitatii magnetice relative : $\mu_r' = 100$ pentru $f = 0 \text{ Hz}$; $\mu_r' = 92$ pentru $f = 2 \text{ MHz}$ si $\mu_r' = 83,7$ pentru $f = 3 \text{ MHz}$. Luând în considerare doar pierderile prin magnetizare, sa se determine tangenta unghiului de pierderi în materialul considerat pentru frecventele de 2 MHz si 3 MHz si frecventa pentru care aceste pierderi sunt maxime.

Rezolvare

Procesul de magnetizare al materialelor magnetice se poate considera similar procesului de polarizare al materialelor dielectrice cu polarizare de orientare. În consecință, relațiile asociate procesului de magnetizare vor fi similare celor care sunt asociate procesului de polarizare, permitivitatea electrică relativă fiind înlocuită prin permeabilitatea magnetică relativă. Astfel, componentele permeabilității magnetice relative complexe, au forma :

$$\mu_r' = \mu_{r_i} + \frac{\Delta\mu_r}{1 + (\omega\tau_m)^2},$$

$$\mu_r'' = \Delta\mu_r \frac{\omega\tau_m}{1 + (\omega\tau_m)^2},$$

unde : μ_{r_i} este permeabilitatea instantanee pentru frecvențe care tind spre infinit, $\Delta\mu_r = \mu_{r_{st}} - \mu_{r_i}$, $\mu_{r_{st}}$ este permeabilitatea pentru frecvența nulă, iar τ_m este constanta de timp de relaxare.

Pentru cele 3 frecvențe la care s-au efectuat determinările, se pot scrie relațiile :

$$f = 0 ; 100 = \mu_{r_i} + \Delta\mu_r,$$

$$f = 2 \text{ MHz} ; 92 = \mu_{r_i} + \frac{\Delta\mu_r}{1 + (\omega\tau_m)^2},$$

$$f = 3 \text{ MHz} ; 83,7 = \mu_{r_i} + \frac{\Delta\mu_r}{1 + (\omega\tau_m)^2},$$

de unde rezulta : $\mu_{r_i} = 63$, $\Delta\mu_r = 37$, $\tau_m = 4,18 \cdot 10^{-8} \text{ s}$.

Tangenta unghiului de pierdere are expresia :

$$\text{tg}\delta_m = \frac{\Delta\mu_r (\omega\tau_m)}{\mu_{r_{st}} + \mu_{r_i} (\omega\tau_m)^2},$$

și are valorile :

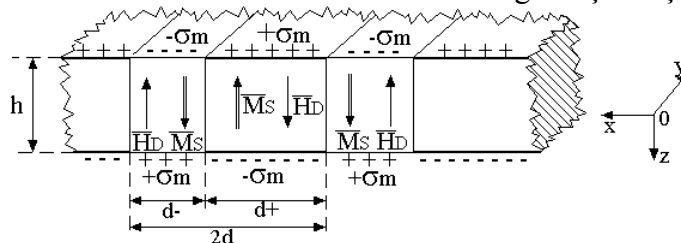
$$f = 2 \text{ MHz} ; \text{tg}\delta_m = 9,38 \cdot 10^{-2}$$

$$f = 3 \text{ MHz} ; \text{tg}\delta_m = 13,66 \cdot 10^{-2}.$$

Frecvența la care atât pierderile în materialul ferimagnetic cât și tangenta unghiului de pierdere, sunt maxime, este :

$$f^* = \frac{1}{2\pi\tau_m} \sqrt{\frac{\mu_{r_{st}}}{\mu_{r_i}}} = 4,8 \text{ MHz}.$$

13. Sa se arate ca în absența câmpului magnetic exterior, latimile domeniilor adiacente ale unei structuri Kittel sunt egale. $\text{Dan}\checkmark$.



Rezolvare:

Câmpul demagnetizant este rezultatul prezentei magnetizării $\overline{M_s}$, care este presupusă uniformă în interiorul unui domeniu magnetic, sau - echivalent, este

rezultatul prezentei sarcinilor magnetice fictive uniform distribuite pe suprafețele domeniilor, având densitatea superficială $\pm\sigma_m$. Relația de legătură între \overline{M}_s și σ_m este : $\text{div}_s \overline{M}_s = -\sigma_m / \mu_0$.

Structura de domenii fiind periodică, se definește mărimea " δ ", prin relația : $\delta = |d_+ - d_-| / 2$.

Câmpul demagnetizant elementar $d\overline{H}_D$, din interiorul unui domeniu produs de elementul de suprafață : $dA = dx \cdot dy$, încărcat cu sarcini magnetice cu densitate σ_m , într-un punct P, de raza vectorială \overline{r} , are expresia :

$$d\overline{H}_D = \frac{\sigma_m}{4\pi\mu_0} \frac{dA}{r^2} \frac{\overline{r}}{r}$$

Prin integrare, se obține expresia componentei normale a câmpului demagnetizant produs de o fâșie de lungime infinită și lățime finită, încărcată cu sarcini magnetice fictive, în punctul P, din care fâșia se vede sub unghiul $\theta_2 - \theta_1$:

$$\overline{H}_D = \frac{\sigma_m}{4\pi\mu_0} (\theta_2 - \theta_1)$$

Câmpul demagnetizant se mediază în raport cu coordonata " z ", fiind o funcție continuă în raport cu variabila " x ". Pentru ca vectorii câmpului demagnetizant și magnetizatiei într-un punct din interiorul unui domeniu, să fie orientați antiparaleli, este necesar ca expresia câmpului demagnetizant mediat să fie corectată astfel încât să se asigure semne (și sensuri) opuse în punctele din vecinătatea peretelui de domeniu, aparținând domeniilor adiacente și anularea lui în perete. S-a aplicat o corecție de tip liniar într-o regiune simetrică în raport cu peretele domeniului.

Energia de demagnetizare a unui material magnetic cu volum v_m , are forma :

$$E_D = -\frac{\mu_0}{2} \int_{v_m} \overline{H}_D \cdot \overline{M} dv$$

Cunoscând expresia câmpului demagnetizant în punctele din interiorul structurii, magnetizatia fiind presupusă constantă : $\overline{M} = \overline{M}_s$, rezulta prin integrare expresia energiei de demagnetizare, a cărei valoare este pozitivă întrucât câmpul demagnetizant și magnetizatia au orientări opuse. Energia de demagnetizare se determină pentru două domenii adiacente de lățimi inegale și lungimi egale. Întrucât structura Kittel este o succesiune de astfel de perechi de domenii, relațiile obținute sunt valabile la nivelul întregii structuri. Expresia energiei de demagnetizare pentru ansamblul format din două domenii, cu lungimi egale " l ", este :

$$E_D = \mu_0 M_s h l \int_0^{\frac{d+\delta}{2}} H_{D_z, med}^c(x; \delta) dx + \mu_0 M_s h l \int_0^{\frac{d-\delta}{2}} H_{D_z, med}^c(x; \delta) dx,$$

unde : $H_{D_z, med}^c$ reprezintă componenta normală pe suprafețele de separație ale structurii câmpului demagnetizant mediat și corectat, iar " h " reprezintă grosimea structurii.

Expresia energiei de demagnetizare este o funcție pară în raport cu " δ ", fiind pozitivă pentru valori " d " și " h " apropiate : $d > h$ și $0 \leq \delta \leq d/2$. Energia de demagnetizare pentru : $\delta \neq 0$ este superioară energiei de demagnetizare corespunzătoare valorii : $\delta = 0$, iar starea energetică stabilă a structurii Kittel corespunde lățimilor egale ale domeniilor cilindrice adiacente.

Valoarea energiei de demagnetizare nu este afectată de corectarea expresiei câmpului demagnetizant, dar aplicarea corecției facilitează calculul integralelor.

2.11. Anexe

2.11.1. Legea inducției electromagnetice

Tensiunea electromotoare produsă prin inducție electromagnetică de-a lungul unei curbe închise Γ oarecare, este egală cu viteza de scădere în timp a fluxului magnetic printr-o suprafață S_Γ , care se sprijină pe curba Γ :

$$\oint_{\Gamma} \overline{E} d\overline{S} = -\frac{d}{dt} \int_{S_\Gamma} \overline{B} d\overline{A}, \quad (\text{A.2})$$

unde: \overline{E} este intensitatea câmpului electric, $d\overline{S}$ este elementul de linie, \overline{B} este inducția magnetică, iar $d\overline{A}$ este elementul de suprafață.

Legea inducției electromagnetice se poate scrie sub forma:

$$u_{e_r} = \oint_{\Gamma} \overline{E} d\overline{S} = -\frac{d_s \Phi_{S_\Gamma}}{dt} = -\frac{\partial \Phi_{S_\Gamma}}{\partial t} + (\overline{v} \text{grad}) \Phi_{S_\Gamma}, \quad (\text{A.3})$$

unde: Φ_{S_Γ} este fluxul magnetic prin suprafața S_Γ , iar mediul se consideră un fluid, în care fiecare punct are o viteză \overline{v} de deplasare diferită, câmpul vitezelor fiind continuu.

2.11.2. Legea circuitului magnetic

Tensiunea magnetomotoare de-a lungul unei curbe închise Γ oarecare, este egală cu suma dintre curentul de conducție total ce străbate o suprafață S_Γ , care se sprijină pe curba Γ (și viteza de scădere în timp a fluxului electric prin suprafața S_Γ):

$$\oint_{\Gamma} \overline{H} d\overline{S} = \int_{S_\Gamma} \overline{J} d\overline{A} + \frac{d}{dt} \int_{S_\Gamma} \overline{D} d\overline{A}, \quad (\text{A.4})$$

unde: \overline{H} este intensitatea câmpului magnetic, iar \overline{J} este densitatea de curent.

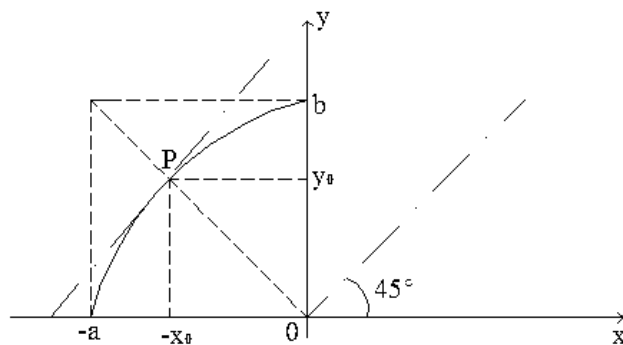
2.11.3. Legea fluxului magnetic

Fluxul magnetic printr-o suprafață Σ este nul:

$$\int_{\Sigma} \overline{B} d\overline{S} = 0$$

Această lege, comparată cu legea fluxului electric stipulează inexistența unor sarcini magnetice similare celor electrice.

2.11.4. Determinarea coordonatelor punctului situat pe un arc de elipsă, pentru care produsul coordonatelor este maxim



Coordonatele unui punct situat pe o elipsă satisfac relațiile:

$$\frac{x^2}{a^2} = 1 - \frac{y^2}{b^2},$$

sau:

$$x = \sqrt{a^2 - \frac{a^2}{b^2} y^2}.$$

Se determină coordonatele punctului pentru care produsul (xz) are valoarea maximă prin anularea primei derivate:

$$\frac{d}{dy} \left(y \sqrt{a^2 - \frac{a^2}{b^2} y^2} \right) = \sqrt{a^2 - \frac{a^2}{b^2} y^2} - \frac{a^2}{b^2} y \frac{1}{\sqrt{a^2 - \frac{a^2}{b^2} y^2}} = 0.$$

Rezultă:

$$y_0 = \pm \frac{b}{\sqrt{2}},$$

iar:

$$x_0 = \mp \frac{a}{\sqrt{2}}.$$

Prin urmare, punctul pentru care produsul coordonatelor este maxim este la intersecția arcului de elipsă cu diagonala dreptunghiului care intersectează axele de coordonate în aceleași puncte ca și arcul de elipsă. Se observă că există un singur extrem, care este un maxim, pentru că produsul coordonatelor se anulează în puncte de intersecție cu axele de coordonate.

Pentru un arc de cerc: $a=b$, tangenta în punctul $P(x_0, y_0)$ este paralelă cu prima bisectoare.

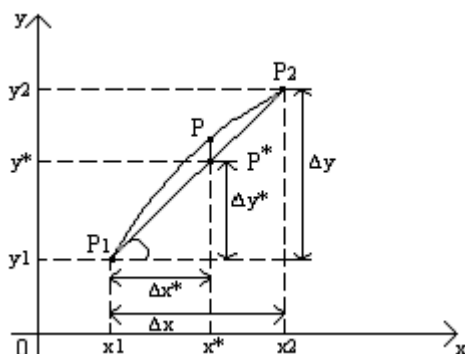
Dacă punctul P se va deplasa pe tangenta la cerc în punctul P, într-un sens sau în sens opus față de punctul de referință P, pentru care produsul xz este maxim, creșterea ordonatei/abscisei va fi egală cu descreșterea abscisei/ordonatei: $\Delta x = \Delta y = k$. În acest caz:

$$(x + \Delta x)(y + \Delta y) = (x + k)(y - k) = xy + ky - kx - k^2,$$

produsul fiind maxim în punctul P și nul la intersecțiile tangentei cu axele.

Dacă punctul P se deplasează pe un cerc, sau pe un arc de elipsă, scăderea produsului este mai pronunțată.

2.11.5. Interpolare liniară



Interpolarea liniară presupune aproximarea unui segment de linie curbă cu un segment de linie dreaptă. Se cunosc valorile funcției: $y=f(x)$ pentru două valori ale coordonatei x : $y_1 = f(x_1)$; $y_2 = f(x_2)$. Valoarea funcției pentru coordonata x^* se determină conform relațiilor:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\Delta y^*}{\Delta x^*};$$

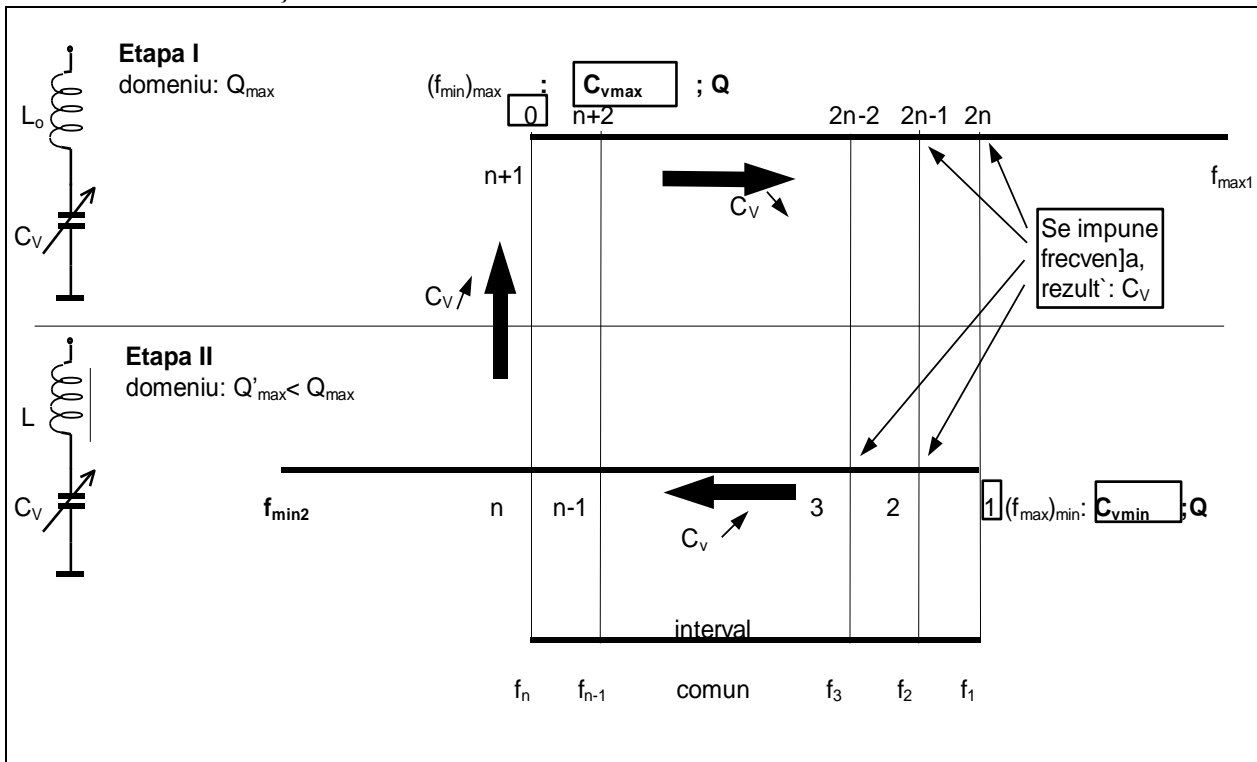
$$y^* = y_1 + \Delta y^* = y_1 + \frac{\Delta y}{\Delta x} \Delta x^* = y_1 + \frac{x^* - x_1}{x_2 - x_1} (y_2 - y_1).$$

Segmentul PP^* este cu atât mai redus și eroarea cu atât mai mică, cu cât variațiile variabilelor sunt mai reduse.

2.11.6. Determinarea permeabilității relative și tangentei unghiului de pierderi a materialelor feromagnetice în funcție de frecvență

Determinările se efectuează cu Q - metrul și se bazează pe relația (7), corespunzătoare regimului rezonant al circuitului serie format din condensatorul variabil C_v , încorporat Q - metrului - cu factor de calitate mai redus. În fig. 7 sunt reprezentate intervalele de frecvență corespunzătoare celor două tipuri de circuite și ordinea efectuării măsurătorilor. De asemenea, este indicat sensul de modificare a capacității variabile.

Din relația (7), rezultă că frecvențele limită se obțin cu valorile limită ale capacității variabile, valoarea limită inferioară a unei mărimi corespunzând valorii limită superioare a celeilalte mărimi. Prin introducerea miezului ferimagnetic în interiorul bobinei, inductivitatea bobinei se mărește, iar frecvențele limită se micșorează, pentru că produsul: LC_v , din relația (7), se mărește. Miezul ferimagnetic de formă cilindrică, se introduce în interiorul bobinei astfel încât axa miezului să coincidă cu axa bobinei. Dacă miezul a fost introdus, el nu poate fi extras și reintrodus din nou, pentru că poziția miezului față de bobină, sau geometria ansamblului nu mai este identică cu cea precedentă. Întrucât determinările presupun măsurări în regim rezonant pentru cele două tipuri de circuite - *la aceeași frecvență*, este necesar să se stabilească intervalul comun de frecvențe în care se



poate obține rezonanța pentru ambele tipuri de circuite. ținând cont de tipul Q - metrului, se dimensionează corespunzător bobina de măsurare a parametrilor miezului ferimagnetic în funcție de frecvență.

Frecvența minimă se determină cu valoarea maximă a capacității variabile, bobina fiind fără miez: se impune $C_{v \max}$, se modifică frecvența până se obține rezonanța și se citesc valorile: $(f_{\min})_{\max}$; Q_0 . În cazul în care frecvența nu este număr întreg, se mărește frecvența astfel încât să fie numărul întreg din vecinătate, iar capacitatea variabilă se micșorează pentru obținerea rezonanței și se citesc noile valori. Frecvențele din intervalul comun de frecvențe (fig. 7), sunt numere întregi. Această primă măsurare se va repeta ulterior, impunând frecvența și rezultând valorile capacității variabile și factorul de calitate, valori care nu vor diferi semnificativ de cele determinate anterior. Motivația acestei proceduri se va clarifica ulterior.

Frecvența maximă a intervalului comun de frecvență se determină cu valoarea minimă a capacității variabile, pentru circuitul format cu bobina cu miez ferimagnetic. În cazul în care frecvența nu este număr întreg, se va micșora astfel încât să devină numărul întreg din vecinătate, iar capacitatea variabilă se va măria corespunzător, pentru obținerea rezonanței circuitului. Se citesc valorile: $(c_{ax})_{\min}$; C_v ; Q . Întrucât factorul de calitate scade sensibil, este necesar ca sensibilitatea Q - metrului să fie mărită, ceea ce implică efectuarea reglajelor pe zero ale celor două voltmetre electronice. Se efectuează toate măsurătorile etapei a II-a, capacitatea variabilă crescând pentru că frecvența se micșorează. Prin extragerea miezului din interiorul bobinei, la măsurarea "n+1", inductivitatea bobinei se micșorează de la valoarea L, la valoarea L_0 , iar capacitatea variabilă se mărește pentru că frecvența : (f_n) , rămâne constantă. Trecând de la măsurarea "n" la măsurarea "n+2", pe de o parte capacitatea variabilă trebuie mărită, având în vedere cele expuse anterior, iar pe de altă parte, trebuie micșorată pentru că frecvența se mărește. Pentru a cunoaște sensul de variație a capacității variabile, se preferă reluarea primei măsurători. Se reamintește ordinea corespunzătoare unei măsurători cu Q - metrul.

Obținerea regimului rezonant prin modificarea frecvenței sau a capacității variabile, pentru o valoare oarecare a tensiunii furnizate de oscilatorul Q - metrului. La rezonanță, indicația instrumentului care măsoară factorul de calitate, este maximă.

Reglajul pe zero al celor două voltmetre electronice, pentru tensiune nulă a oscilatorului (fig. 7) se efectuează pentru fiecare măsurare, până când regimul termic al Q- metrului s-a stabilizat și la fiecare modificare a sensibilității instrumentului care indică valoarea factorului de calitate.

Modificarea tensiunii oscilatorului astfel încât indicația voltmetrului care măsoară această tensiune să fie cea corespunzătoare valorii standard - marcată pe scala instrumentului. Valoarea capacității variabile se poate ajusta în situația în care valoarea tensiunii oscilatorului s-a mărit în comparație cu valoarea la care s-a obținut rezonanța - în prima etapă a măsurării. Se citesc valorile mărimilor: (f, C_v, Q) .

Pentru o frecvență precizată, relațiile utilizate pentru determinarea permeabilității magnetice relative și tangentei unghiului de pierderile miezului ferimagnetic, sunt:

$$L_0 = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C_{v0}}; L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C_v}; \mu_r = \frac{L}{L_0} = \frac{C_{v0}}{C_v} \quad (11)$$

$$\operatorname{tg} \delta_m = \frac{\mu_r' \cdot Q_0 - Q}{\mu_r' \cdot Q \cdot Q_0} \quad (12)$$

unde: Q și Q_0 sunt factorii de calitate ai bobinei cu și fără miez ferimagnetic. Ca și la materialele dielectrice, tangenta unghiului de pierderi crește cu creșterea frecvenței.

Factorul de calitate al bobinei cu miez are expresia:

$$Q_L = \frac{\omega}{r_L} \cdot L \quad (13)$$

unde: r_L este rezistența de pierderi în miez. Pentru valori reduse ale rezistenței de pierderi și pentru valori identice ale inductivității L factorul de calitate al bobinei cu miez poate fi superior factorului de calitate al bobinei fără miez și poate crește - în anumite limite cu creșterea frecvenței - atunci când raportul ω/r_L crește. Pentru obținerea unei valori identice a inductivității, numărul de spire al bobinei fără miez este mai mare, iar efectul pelicular este mai pronunțat. Inductivitățile reglabile utilizate în electronică se pot realiza numai cu bobine având miez ferimagnetic, care se introduc mai mult sau mai puțin în interiorul bobinei. Având în vedere expresia inductivității unei bobine:

$$L = \mu_0 \mu_r' N^2 S / l \quad (14)$$

unde: S este secțiunea, iar l este lungimea bobinei, se poate aprecia modul de variație a inductivității cu temperatura. Presupunem că bobina are lungimea egală cu raza secțiunii circulare. Creșterea temperaturii determină mărirea dimensiunilor bobinei. Raportul S/l se modifică cu temperatura - conform relației:

$$\frac{S}{l} = \frac{\pi \cdot R^2}{R} = \pi \cdot R_0 \cdot (1 + \alpha_\theta \cdot \Delta\theta) \quad (15)$$

unde: R_0 este raza secțiunii circulare la temperatura ambiantă de referință, α_θ este coeficientul (pozitiv) de variație cu temperatura al conductorului de cupru cu care este realizată bobina, iar $\Delta\theta$ este variația de temperatură.

În concluzie, *inductivitatea bobinelor cu lungime redusă se mărește* cu creșterea temperaturii, iar *inductivitatea bobinelor lungi și cu secțiune redusă scade* cu creșterea temperaturii. Este de remarcat că variațiile absolute și nu cele relative ale secțiunii, respectiv lungimii, determină comportamentul inductivității la variații de temperatură. Aceste aspecte sunt deosebit de importante pentru dimensionarea bobinelor circuitelor acordate. Cu ajutorul Q - metrului se poate depista existența unei spire în scurtcircuit în primarul sau secundarul unui transformator cu miez ferimagnetic. Factorul de calitate al înfășurării primarului suferă o scădere pronunțată în cazul existenței unui scurtcircuit datorită pierderilor mari de putere activă în spira în scurtcircuit.