

Capitolul 4

Bobine electrice. Circuite magnetice

4.1. Materiale magnetice

După modul în care se comportă la introducerea într-un câmp magnetic exterior există materiale: *liniare* și *nelinieră*, cele liniare pot fi: *diamagnetice* și *paramagnetice*.

Susceptivitatea magnetică $\chi_m = \text{constant}$, a fost prezentată împreună cu legea magnetizației temporare $\overline{M}_t = \chi_m \overline{H}$ și cu permeabilitățile magnetice relative $\mu_r = 1 + \chi_m$ și absolute $\mu = \mu_0 \mu_r$, la paragraful cu legea magnetizației temporare și legea legăturii în câmp magnetic.

Materialele diamagnetice au susceptibilitatea $\chi_m < 0$ foarte redusă, cuprinsă între -10^{-5} și -10^{-6} . În câmpul magnetic exterior materialul se magnetizează în sens opus acestuia și are $\mu_r \approx 1$ ($0.999\dots$), fiind respins din zonele în care câmpul magnetic este mai intens.

Materialele paramagnetice au susceptibilitatea $\chi_m > 0$ este de asemenea foarte redusă, cuprinsă între 10^{-4} și 10^{-3} , cu $\mu_r \approx 1$. Într-un câmp magnetic exterior, materialul se magnetizează în sensul câmpului, fiind atras de acesta.

La materialele diamagnetice momentul magnetic resultant al unui atom/moleculă este nul, iar la materialele paramagnetice este nenul. Astfel, materialele diamagnetice se magnetizează temporar prin deformarea orbitelor electronice, iar cele paramagnetice prezintă preponderent o magnetizare de orientare. Timpul de stabilire este de $10^{-13}\dots10^{-12}$ s, la materialele diamagnetice (nu depinde de temperatură), iar la materialele paramagnetice este de 10^{-6} s (acestea depinzând de temperatură $\chi_m = \frac{C}{T}$, C fiind constanta Curie).

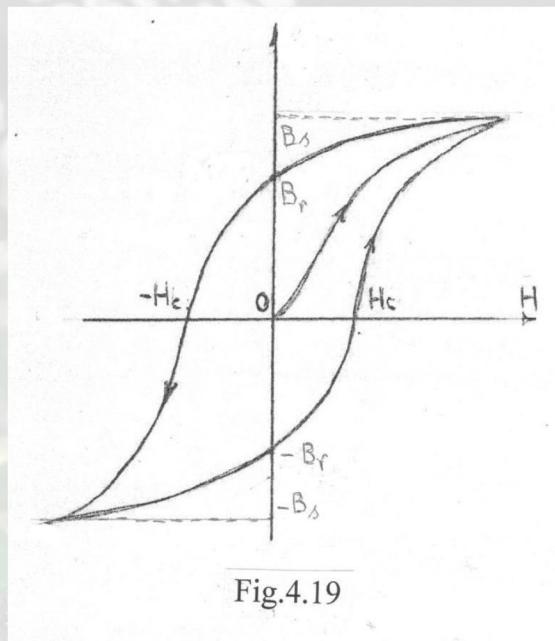
În practică, cele mai importante sunt **materialele feromagnetice** ($\mu_r = 10^4\dots10^5$), care de cele mai multe ori au o caracteristică de material nelinieră, fiind completate de **materiale ferimagnetice** și **antiferomagnetice**.

Materialele feromagnetice au susceptivitatea magnetică și permeabilitatea magnetică cu valori foarte mari și depind de intensitatea câmpului magnetic aplicat, dar și de următorii factori:

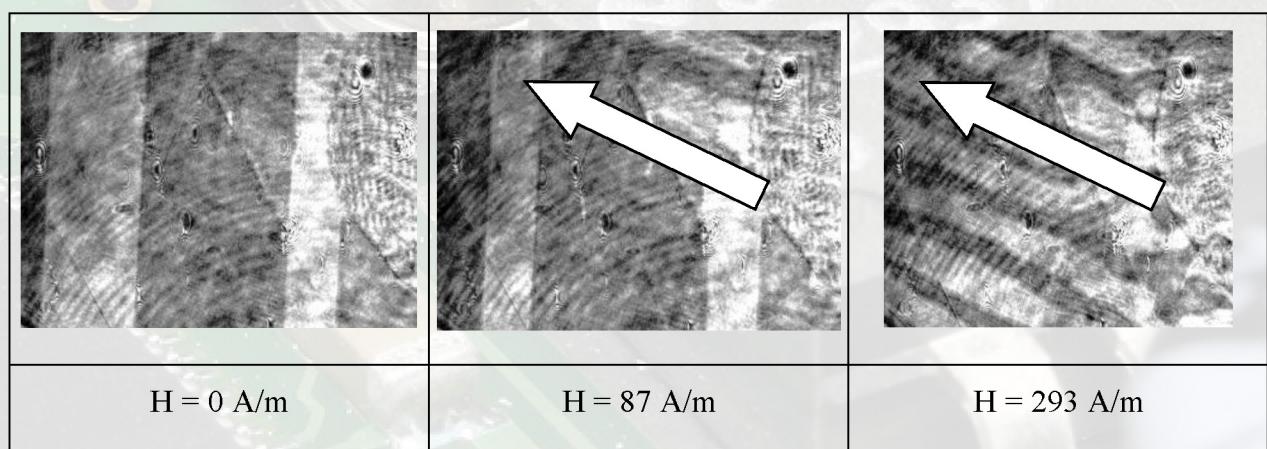
- structura chimică a materialului,
- textura cristalografică,

- geometria eșantionului,
- proceful tehnologic de fabricare a materialului,
- istoria stării de magnetizare a materialului.

Acest din urmă fapt este reflectat de curba de primă magnetizare și de ciclul de histerezis al materialului (Fig. 4.19), în care B_s este inducția de saturatie, B_r inducția remanentă, H_c câmpul coercitiv.



Aria ciclului de histerezis este proporțională cu pierderile prin histerezis magnetic (teorema lui Warburg).



O explicație a fost dată de Weiss în 1907, care a considerat că un material feromagnetic este împărțit în regiuni volumice numite **domenii de structură magnetică**, în interiorul cărora materialul este magnetizat spontan la saturatie. Orientarea acestor domenii este aleatoare determinând magnetizația resultantă să fie nulă. La aplicarea unui câmp magnetic exterior, la în-

ceput se modifică volumele domeniilor magnetizate spontan în sensul câmpului aplicat prin deplasarea pereților domeniu lui. La volume mari ale câmpului magnetic orientarea în sensul câmpului se realizează prin rotirea bruscă a domeniilor.

La creșterea temperaturii peste o valoare numită temperatura (punctul) Curie, materialele inițial feromagnetice se transformă în materiale paramagnetice.

Există trei tipuri de materiale feromagnetice:

- *moi* (Fe – Si, Fe – Ni , permalloy), cu un ciclu de histerezis îngust și pierderi mici, folosite în construcția mașinilor electrice

Fe-Si oțel electrotehnic



Fe-Ni Permalloy (foi subțiri), Somaloy (nano-pulberi magnetice)

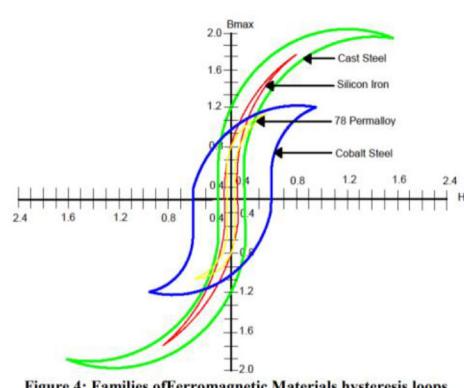
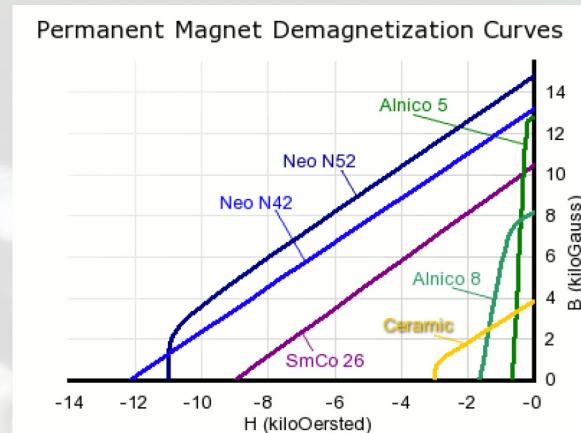
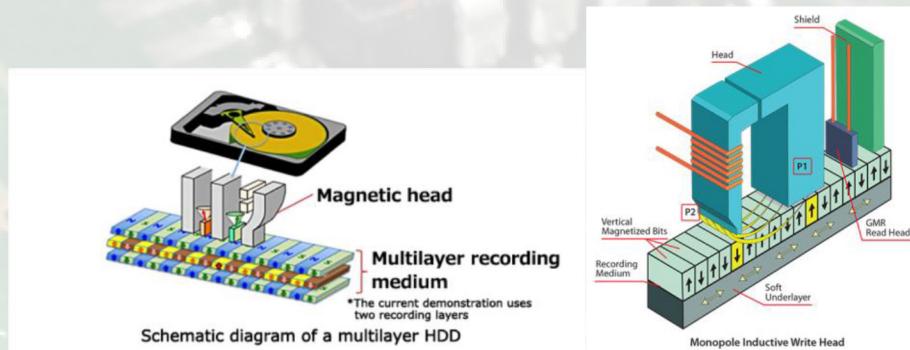


Figure 4: Families of Ferromagnetic Materials hysteresis loops

- *dure*, cu un ciclu de histerezis lat (AlNiCo, AlNiCu, Ni-Fe-B) pentru magneti permanenti



- *semi-dure*, utilizate cu precadere in inregistrari magnetice



Materiale ferimagnetice (feritele, Mn-Zn, Ni-Zn) au proprietati asemănătoare cu cele ale materialelor feromagnetice. Au un pronunțat caracter semiconductor $10^4 \dots 10^8 \Omega m$ și pot fi moi, respectiv dure. Microscopic există două subrețele de atomi distinți, care au momente magnetice orientate antiparalel. Aceste momente fiind diferite, magnetizațiile se compensează parțial rezultând o magnetizare locală nenulă mai slabă decât la materialele feromagnetice.



Materiale antiferomagnetice au o structură și un comportament asemănătoare materialelor ferimagnetice, numai că efectele magnetice ale celor două subrețele se anulează practic reciproc. La creșterea temperaturii peste o valoare numită temperatura (punctul) Curie materialele inițial ferimagnetice se transformă în materiale paramagnetice.

4.2. Bobine electrice

Bobina electrică este un dispozitiv realizat dintr-un conductor filiform izolat și dispus astfel încât să formeze un număr de spire inseriate care să înlățuiască același suport (circuit magnetic), fapt care presupune existența unei dispersii neglijabile (Fig. 4.29).

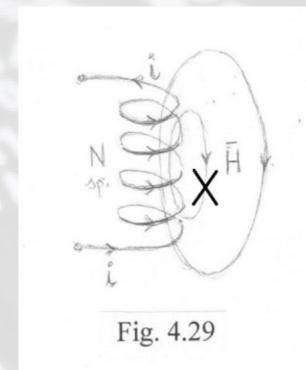


Fig. 4.29

În ipoteza dispersiei, toate spirele sunt înlățuite de toate liniile de flux magnetic. Dacă notăm cu φ_f *fluxul magnetic fascicular* printr-o secțiune a bobinei și deci prin secțiunea unei singure spire, fluxul total al bobinei este $\Phi = N\varphi_f$, în care N este numărul de spire al bobinei.

În Fig. 4.30 două bobine i și k sunt cuplate magnetic, parte din fluxul uneia străbate secțiunea celei de a doua; acea parte care nu o străbate se numește *flux magnetic de dispersie*. Bobina de ordinul j are N_j spire, iar cea de ordinul k are N_k spire.

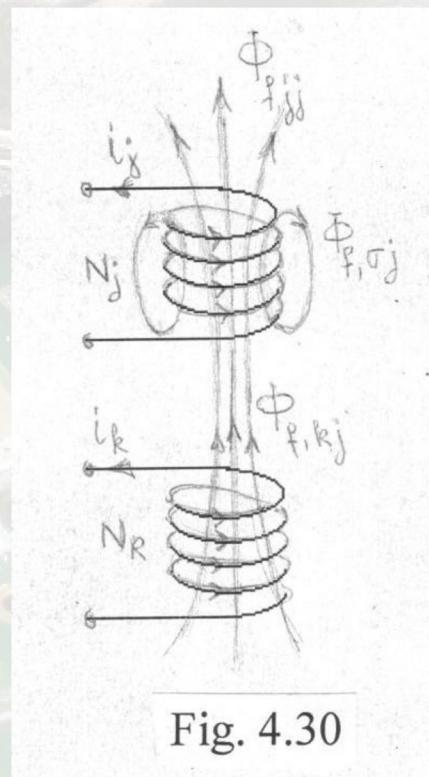


Fig. 4.30

a) Inductivitatea bobinei

Prin definiție inductivitatea unei bobine reprezintă raportul dintre fluxul magnetic total, care trece prin aria delimitată de spire și curentul electric care parcurge o spiră a bobinei:

$$L = \frac{\Phi}{i} = N \frac{\Phi_f}{i}.$$

Unitatea de măsură a inductivității este Henry (H).

Presupunând că *doar* bobina de ordinul j este străbătută de curent ($i_j \neq 0$), se definesc următoarele fluxuri fasciculare:

- $\Phi_{f,jj}$ - fluxul fascicular printr-o spiră a bobinei j produs de curentul i_j
- $\Phi_{f,kj}$ - fluxul fascicular printr-o spiră a bobinei k produs de curentul i_j
- Φ_{f,σ_j} - fluxul fascicular de dispersie care nu străbate bobina k și este produs de curentul i_j , în care σ_j este indicele de dispersie al bobinei j

Relația dintre acest fluxuri este următoarea:

$$\Phi_{f,jj} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n \Phi_{f,kj} + \Phi_{f,\sigma_j} \quad (6)$$

Dacă $\Phi_{f,kj} \neq 0$, cele două bobine sunt cuplate magnetic.

b) Inductivități proprii, mutuale și de dispersie

Inductivitatea proprie a bobinei j , dată de raportul

$$L_{jj} = \frac{\Phi_{jj}}{i_j} = \frac{N_j \Phi_{f,jj}}{i_j} > 0, \quad (7)$$

este pozitivă ca urmare a asocierii sensului de referință al fluxului magnetic cu sensul curentului după regula burghiului drept. Aceasta se poate nota și cu un singur indice j : $L_{jj} \equiv L_j$

Inductivitatea mutuală a bobinei k față de bobina j este dată de raportul

$$L_{kj} = \frac{\Phi_{kj}}{i_j} = \frac{N_k \Phi_{f,kj}}{i_j} < 0 \quad (8)$$

în care sensul de referință ales pentru parcurgerea bobinei k nu este corelat cu sensul fluxului $\Phi_{f,kj}$.

Inductivitatea de dispersie a bobinei j în raport cu toate celelalte bobine ale sistemului de n bobine este dată de raportul

$$L_{\sigma j} = \frac{\Phi_{\sigma j}}{i_j} = \frac{N_j \Phi_{f,\sigma j}}{i_j} > 0 \quad (9)$$

Dacă înmulțim relația (6) cu raportul $\frac{N_j}{i_j}$, și înlocuim fluxul $\Phi_{f,kj}$ cu cel rezultat din

relația (8) obținem

$$\frac{\Phi_{f,jj} N_j}{i_j} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}} \frac{L_{kj} i_j}{N_k} \frac{N_j}{i_j} + \Phi_{f,\sigma j} \frac{N_j}{i_j}.$$

Observăm însă că primul membru al relației este, conform definiției (7) inductivitatea L_{jj} , că termenul curent al sumei din membrul al doilea (după simplificarea cu i_j) este inductivitatea mutuală L_{kj} multiplicată cu raportul $\frac{N_j}{N_k}$ și că ultimul termen este conform definiției (9)

inductivitatea de dispersie $L_{\sigma j}$.

Inductivitatea utilă.

Notăm:

$$L_{jj} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n \frac{N_j}{N_k} |L_{kj}| + L_{\sigma j} \quad \text{sau} \quad L_{jj} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n L_{u,kj} + L_{\sigma j}. \quad (10)$$

unde $|L_{kj}|$ s-a luat în valoare absolută, deoarece mărimea $L_{jj} > 0$ este pozitivă prin definiție, iar

$L_{\sigma j} \ll L_{u,kj}$. Inductivitatea $L_{u,kj} = \frac{N_j}{N_k} |L_{kj}|$ se numește *inductivitatea utilă* a cuplajului dintre bobinele k și j . Unitatea SI de măsură pentru inductivitate este *henry* $\langle L \rangle_{SI} = 1 \text{ H}$.