

~ CURS 9 ~

II. TEORIA CÂMPULUI ELECTROMAGNETIC**II.1. Mărimi primitive și mărimi derivate**

Mărimile fizice sunt entități matematice măsurabile în raport cu o unitate de măsură care descriu anumite proprietăți ale unui sistem în cadrul unei teorii fizice. Toate mărimile au o denumire. Unitățile lor de măsură fie au o denumire, fie se exprimă ca relație între unitățile de măsură ale altor mărimi fizice.

Data fiind multitudinea de mărimi fizice utilizate în studiul fenomenelor se impune o clasificare a lor după mai multe criterii. După modul de introducere în teoria fizică respectivă, mărimile fizice se pot clasifica în:

- primitive - introduse direct prin experiment,
- derivate - introduse pe baza celor primitive prin intermediul unei relații de definiție.

În teoria câmpului electromagnetic, starea electromagnetică a corpurilor se caracterizează macroscopic cu următoarele mărimi primitive: *sarcina electrică* (q), *momentul electric* (\bar{p}), *momentul magnetic* (\bar{m}) și *intensitatea curentului electric de conducție* (i). Starea câmpului electromagnetic se caracterizează macroscopic prin următoarele mărimi primitive: *vectorul intensității câmpului electric în vid* (\bar{E}_v) și *vectorul inducției magnetice în vid* (\bar{B}_v).

II.2. Mărimi ce caracterizează stările electromagnetice în corpuri***A. Starea de electrizare (de încărcare electrică)***

O experiență cunoscută de multă vreme arată că, în urma frecării unei bare de sticlă sau rășină cu o bucată de stofă, aceste corpuri sunt aduse într-o stare calitativ nouă, caracterizată prin faptul că devin capabile să exercite acțiuni ponderomotoare, atât între ele, cât și asupra altor corpuri aflate din vecinătate.

Dacă se explorează câmpul electric în vid cu ajutorul unui corp de probă încărcat cu sarcina electrică, se determină că forța care se exercită asupra acestuia are expresia:

$$\bar{\mathbf{F}}_e = q \cdot \bar{\mathbf{E}}_v \text{ sau } \bar{\mathbf{E}}_v = \lim_{q \rightarrow 0} \frac{\bar{\mathbf{F}}_e}{q} \quad (2.1)$$

Cu ajutorul acestei relații se introduce mărimea primitivă numită sarcina electrică (q) ce caracterizează global starea de încărcare electrică a unui mic corp. În cazul unui corp mare, caracterizarea stării de încărcare electrică se face local (într-un punct), cu ajutorul unor mărimi derivate, numită densitatea de sarcină electrică.

Corpurile încărcate cu sarcini electrice își asociază un sistem fizic numit câmp electric prin care se transmit între corpuri forțe și cupluri electrice. După viteza cu care transmit starea de electrizare în urma unui contact între corpuri electrizate, corpurile se împart în următoarele trei categorii :

Corpuri electroizolante (dielectrice) transmit starea de electrizare în interval de timp de ordinul zilelor, lunilor (hârtie, ulei, aer uscat);

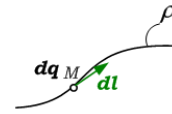
Corpuri electroconductoare transmit aceasta stare în timpi foarte mici (de ordinul a $10^{-10} \div 10^{-12}$ s); din aceasta categorie fac parte metalele și aliajele lor, cărbunele, anumite soluții

de săruri, acizi sau baze. Dintre aceste materiale deosebit de importante pentru industria electrotehnică sunt Cu și Al din care se realizează conductoarele electrice.

Corpuri semiconductoare sunt corpuri cu proprietăți intermediare, timpul de transmisie a stărilor fiind de ordinul secundelor.

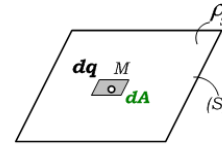
→ densitatea lineică (lineară)

$$\rho_l = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta l} = \frac{dq}{dl} \quad [\text{C/m}] \quad (2.2)$$



→ densitatea superficială (de suprafață)

$$\rho_s = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta A} = \frac{dq}{dA} \quad [\text{C/m}^2] \quad (2.3)$$



→ densitatea volumică (de volum)

$$\rho_v = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta V} = \frac{dq}{dV} \quad [\text{C/m}^3] \quad (2.4)$$

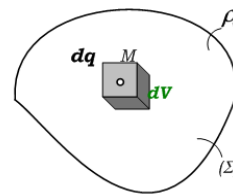


Fig. 2.1. Densități de sarcini electrice

B. Starea de polarizare

Experiența arată că există corpuri neîncărcate electric asupra cărora un câmp electric exercită acțiuni ponderomotoare și care la rândul lor, își asociază un câmp electric propriu. Această nouă stare de electrizare a corpurilor se numește starea de polarizare electrică.

Pentru investigarea stării de polarizare electrică se studiază acțiunile pe care un câmp electric invariabil în timp le exercită în vid asupra unui mic corp aflat în această stare. Experiența arată că asupra acestuia se exercită întotdeauna un cuplu și dacă este un câmp neomogen, o forță:

$$\bar{\mathbf{C}} = \bar{\mathbf{p}} \times \bar{\mathbf{E}}_v \text{ sau } \bar{\mathbf{F}} = \text{grad}(\bar{\mathbf{p}} \cdot \bar{\mathbf{E}}_v) \quad (2.5)$$

Cuplul tinde să alinieze momentul electric pe direcția vectorului câmp electric, iar forța tinde să atragă corpul polarizat în regiunile de câmp mai intense.

Starea de polarizare a unui mic corp este caracterizată global de momentul electric ($\bar{\mathbf{p}}$), o mărime primitivă vectorială. În cazul unui corp de dimensiuni mari, starea de polarizare se caracterizează local, cu ajutorul densității de volum a momentului electric, mărime derivată vectorială, numită polarizație ($\bar{\mathbf{P}}$):

$$\bar{\mathbf{P}} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta \bar{\mathbf{p}}}{\Delta V} = \frac{d\bar{\mathbf{p}}}{dV} \quad [P]_{\text{SI}} = 1\text{C/m}^2 \quad (2.6)$$

Starea de polarizare se poate obține prin:

- tratamente speciale precum: deformare electrică (piezoelectricitate), încălzire (piroelectricitate), topire și solidificare într-un câmp electric;
- simpla introducere a lor într-un câmp electric.

Materialele din prima categorie din care fac parte cristalele de cuarț, sarea Seignette și turmalina, au o stare de polarizare independentă de câmpul electric, numită polarizare

permanentă, caracterizată de momentul electric permanent, $\bar{\mathbf{p}}_p$. Din a doua categorie fac parte dielectricii a căror stare de polarizare apare numai în prezența câmpului electric și dispăre când acesta se anulează. O astfel de polarizare se numește polarizare temporară și este caracterizată de momentul electric temporar, $\bar{\mathbf{p}}_t$.

Cele două tipuri de polarizări nu se exclud, astfel încât momentul electric cât și polarizația satisfac relațiile:

$$\bar{\mathbf{p}} = \bar{\mathbf{p}}_p + \bar{\mathbf{p}}_t \quad \text{și} \quad \bar{\mathbf{P}} = \bar{\mathbf{P}}_p + \bar{\mathbf{P}}_t \quad (2.7)$$

C. Starea electrocinetică (conducție electrică)

Sub influența câmpului electric corpurile conductoare intră într-o stare specială, diferită față de starea de încărcare electrică sau de polarizare electrică, numită stare de conducție electrică sau stare electrocinetică, care poate fi pusă în evidență numai prin efectele sale. Corpurile aflate în stare de conducție electrică sunt sediul unui fenomen numit curent electric de conducție.

Starea de conducție electrică este caracterizată de mărimile:

- $\bar{\mathbf{J}} [A/m^2]$ - numită densitatea curentului electric de conducție, mărime derivată vectorială ce caracterizează local fenomenul de conducție;
- $i [A]$ - numită intensitatea curentului electric de conducție, mărime primitivă scalară orientată ce caracterizează global fenomenul de conducție.

Relația dintre cele două mărimi este:

$$i = \iint_S \bar{\mathbf{J}} \cdot \bar{\mathbf{n}} \cdot dA = \iint_S J \cdot dA \cdot \cos \alpha = \iint_S J_n \cdot dA \quad (2.8)$$

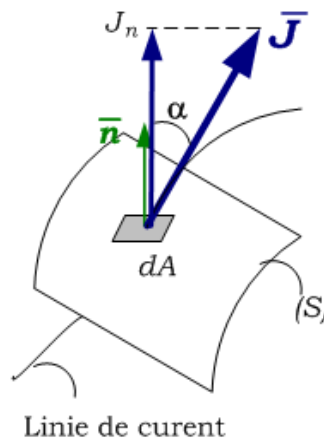


Fig. 2.2. Densitatea curentului electric

D. Starea de magnetizare

Există corpuri neîncărcate electric, nepolarizate electric și neparcuse de curent electric de conducție aflate într-o stare distinctă, între care se exercită interacțiuni calitativ diferite de cele petrecute în câmp electric. Starea fizică specifică acestor corpuri se numește stare de magnetizare. Aceste corpuri creează în jurul lor un sistem fizic asociat, care asigură transmiterea din aproape în aproape a acestui tip de interacțiuni care se numește câmp magnetic. Experimental au fost puse în evidență interacțiuni de aceeași natură în vecinătatea corpurilor conductoare în stare electrocinetică sau a corpurilor electrizate în stare de mișcare, deci aceste corpuri în aceste stări își asociază un câmp magnetic propriu. Starea de magnetizare a

corpurilor este caracterizată global de mărimea primitivă vectorială $\bar{\mathbf{m}}$ [$A \cdot m^2$] numită moment magnetic, iar local, de mărimea derivată vectorială $\bar{\mathbf{M}}$ [A/m] numită magnetizație.

Starea de magnetizare se poate obține atât dependent de existența unui câmp magnetic ce dispare după îndepărtarea acestuia (*magnetizare temporară*), dar poate exista și în absența acestuia (*magnetizare permanentă*):

$$\bar{\mathbf{m}} = \bar{\mathbf{m}}_t + \bar{\mathbf{m}}_p \quad \text{și} \quad \bar{\mathbf{M}} = \bar{\mathbf{M}}_t + \bar{\mathbf{M}}_p \quad (2.9)$$

II.3. Mărimi ce caracterizează câmpul electromagnetic

Câmpul rezultat în interiorul corpurilor va avea caracteristici distincte de câmpul existent în lipsa lor. Pentru a caracteriza complet câmpului electric în interiorul corpurilor, este nevoie de o pereche de mărimi electrice:

- intensitatea câmpului electric:

$$\bar{\mathbf{E}} = f(\bar{\mathbf{E}}_v) \quad [E]_{SI} = 1V/m \quad (2.10)$$

- inducția electrică (eng, *electric displacement field*):

$$\bar{\mathbf{D}} = f(\bar{\mathbf{E}}_v) \quad [D]_{SI} = 1 C/m^2 \quad (2.11)$$

În vid între cele două mărimi există relația:

$$\bar{\mathbf{D}} = \varepsilon_0 \cdot \bar{\mathbf{E}} \quad (2.12)$$

unde $\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} [F/m]$ este constanta universală numită *permeabilitatea dielectrică a vidului*.

Cu ajutorul intensității câmpului electric, $\bar{\mathbf{E}}$, și a inducției electrice, $\bar{\mathbf{D}}$, se caracterizează local câmpul electric. Pe baza lor se pot introduce o serie de mărimi derivate care să caracterizeze global aceste proprietăți:

- *tensiunea electrică* între două puncte A și B , de-a lungul unei curbe (C) (fig. 2.3), se definește ca:

$$u_{AB} = \int_{B(C)}^A \bar{\mathbf{E}} \cdot d\bar{\mathbf{l}} = \int_{B(C)}^A E \cdot dl \cdot \cos \alpha = \int_{B(C)}^A E_t \cdot dl \quad (2.13)$$

și are ca unitate de măsură *voltul* [V].

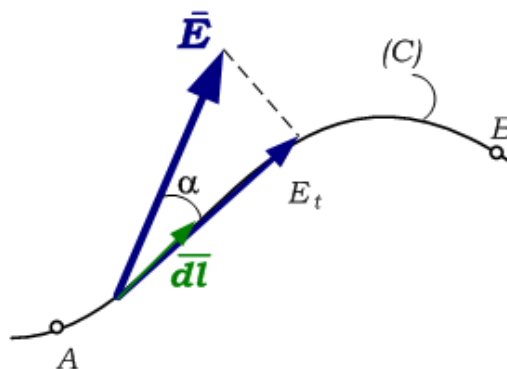


Fig. 2.3. Definirea tensiunii electrice

- tensiunea electromotoare în lungul unei curbe închise (Γ) se definește ca:

$$u_{AB} = \oint_{(\Gamma)} \bar{\mathbf{E}} \cdot d\bar{\mathbf{l}} = \oint_{(\Gamma)} E \cdot dl \cdot \cos \alpha = \oint_{(\Gamma)} E_t \cdot dl \quad (2.14)$$

- fluxul electric printr-o suprafață $S/S_\Gamma/\Sigma$ se definește ca:

$$\Psi_S = \iint_S \bar{\mathbf{D}} \cdot \bar{\mathbf{n}} \cdot dA = \iint_S D \cdot dA \cdot \cos \alpha = \iint_S D_n \cdot dA \quad (2.15)$$

și are ca unitate de măsură *coulombul* [C] (fig. 2.4).

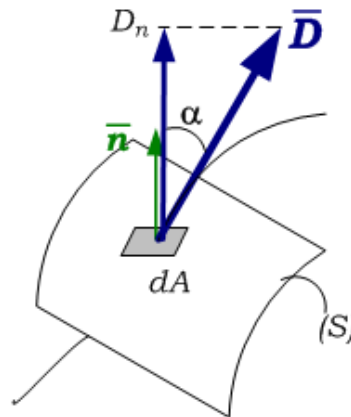


Fig. 2.4. Definirea fluxului electric

În vid, câmpul magnetic este complet caracterizat cu ajutorul unei mărimi vectoriale primitive, $\bar{\mathbf{B}}_v$ numită **intensitatea câmpului magnetic în vid**. Câmpul magnetic, sistem fizic asociat corpurilor magnetizate, corpurilor conductoare parcurse de curent de conducție și corpurilor electrizate aflate în mișcare, este caracterizat de mărimea $\bar{\mathbf{H}} = f(\bar{\mathbf{B}}_v)$ [A/m] numită **intensitatea câmpului magnetic** și de **inducția magnetică** $\bar{\mathbf{B}} = f(\bar{\mathbf{B}}_v)$ [T]. În vid, între aceste două mărimi există următoarea relație:

$$\bar{\mathbf{B}} = \mu_0 \bar{\mathbf{H}} \quad (2.16)$$

unde μ_0 este o constantă universală numită permeabilitatea magnetică a vidului, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m].

Global, câmpul magnetic poate fi caracterizat prin următoarele mărimi derivate:

- tensiunea magnetică de-a lungul unei curbe (C) între două puncte A și B :

$$u_{mAB} = \int_{B(C)}^A \bar{\mathbf{H}} \cdot d\bar{\mathbf{l}} = \int_{B(C)}^A H \cdot dl \cdot \cos \alpha = \int_{B(C)}^A H_t \cdot dl \quad (2.17)$$

și are ca unitate de măsură *amperul* [A] (fig. 2.5a)

- tensiunea magnetomotoare în lungul unei curbe închise Γ :

$$u_{mmAB} = \oint_{(\Gamma)} \bar{\mathbf{H}} \cdot d\bar{\mathbf{l}} = \oint_{(\Gamma)} H \cdot dl \cdot \cos \alpha = \oint_{(\Gamma)} H_t \cdot dl \quad (2.18)$$

- fluxul magnetic printr-o suprafață $S / S_\Gamma / \Sigma$:

$$\Phi_S = \iint_S \bar{\mathbf{B}} \cdot \bar{\mathbf{n}} \cdot dA = \iint_S B \cdot dA \cdot \cos \alpha = \iint_S B_n \cdot dA \quad (2.19)$$

și are ca unitate de măsură *webberul* [Wb] (fig. 2.5b).

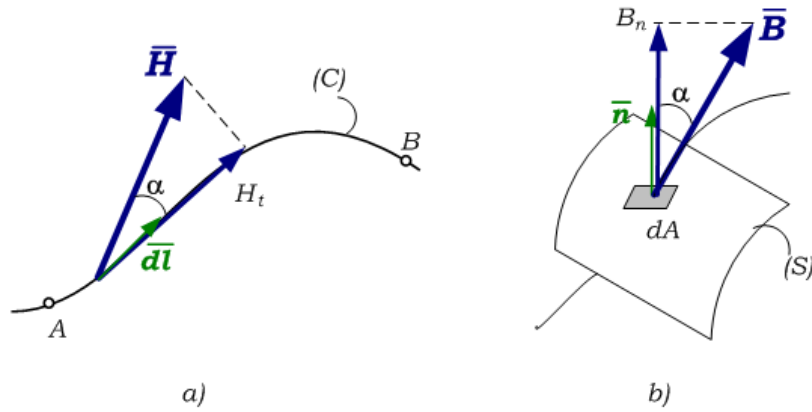


Fig. 2.5. Definierea tensiunii magnetice (a), respectiv a fluxului magnetic (b)