

Capitolul 1

Mărimi electromagnetice

1.1. Conceptul de câmp electromagnetic

Experiența a arătat că există stări ale corpurilor pentru caracterizarea cărora descrierea lor parametrică (geometrică) mecanică, termică și chimică este insuficientă. Tot experiența a arătat că, atunci când se află în asemenea stări, între coruri se exercită de la distanță unele interacțiuni (forțe, cupluri) numite electromagnetice, ireductibile la cele de natură mecanică.

Conform concepției moderne, aceste interacțiuni la distanță sunt efectul acțiunii exercitate asupra corpurilor de un sistem fizic distinct – *câmpul electromagnetic*. Aceasta este o formă de existență a materiei care poate apărea atât în afara cât și în interiorul corpurilor. Câmpul electromagnetic se propagă din aproape în aproape (prin contiguitate) cu o viteză foarte mare, dar finită. (viteza luminii în mediul respectiv)

Câmpul electric și câmpul magnetic reprezintă aspecte complementare indisolubil legate ale câmpului electromagnetic și în regim variabil se condiționează reciproc. Corpul aflat în stări electrice și magnetice specifice își asociază un câmp electric sau magnetic propriu iar acesta, va exercita asupra oricărui alt corp aflat într-o stare similară acțiuni ponderomotoare corespunzătoare. Câmpul electromagnetic este deci purtător de energie și impuls.

În cele ce urmează se prezintă teoria macroscopică (fenomenologică) a câmpului electromagnetic. Aceasta face abstracție de structura microscopică a sistemelor fizice studiate considerând corurile ca fiind medii continue. Caracterul fenomenologic este datorat faptului că această teorie studiază sistemele fizice numai din punctul de vedere al fenomenelor care se produc, făcând apel direct la experiență (observarea fenomenului) pentru stabilirea principalelor legi și introducerea mărimilor fizice cu care operează această teorie. Fenomenele electromagnetice au fost cunoscute și studiate cu mult mai târziu decât cele mecanice, termice sau optice ca urmare a inaccesibilității directe pentru simțurile umane. Ca atare studiul lor a fost realizat indirect prin efectele asociate câmpului electromagnetic.

Fundamentată prin lucrările lui J.C. Maxwell și H. Hertz în secolul al XIX -lea teoria macroscopică a câmpului electromagnetic utilizează un aparat matematic mai evoluat decât cel utilizat în studiul fenomenelor mecanice, termice și chimice.

Electrotehnica reprezintă studiul fenomenelor electrice și magnetice din punctul de vedere al aplicațiilor lor tehnice. Desemnează în același timp și acea ramură a industriei și tehnicii

care are drept obiect proiectarea, construcția și exploatarea utilajelor și aparaturii realizate pe baza utilizării fenomenului electromagnetic. Teoria fenomenologică a electromagnetismului reprezintă o bază teoretică satisfăcătoare a studiului electrotehnicii.

Regimurile câmpului electromagnetic

În teoria macroscopică a câmpului electromagnetic se cunosc patru regimuri.

1. **Regimul static:** mărimele fizice nu variază în timp și nu există fenomene termodinamice (nu există schimburi și transformări de energie) Acesta este singurul regim în care fenomenele electrice și magnetice se pot produce și studia independent sub forma *regimului electrostatic*, respectiv a *regimului magnetostatic*.
2. **Regimul stationar:** mărimele rămân invariabile în timp, dar apar schimburi și transformări energetice (exemplu, regimul de curent continuu) astfel încât se identifică *regimul electric stationar*, respectiv *regimul magnetic staționar*.
3. **Regimul cvasistationar:** mărimele variază în timp, dar cu o viteză (frecvență) care permite neglijarea producerii, transmiterea și receptia undelor electromagnetice.
4. **Regimul nestationar (general):** este regimul în care nu se fac neglijări ale mărimilor din câmpul electromagnetic.

Este necesar ca legile teoriei acestui câmp să fie formulate în sisteme de referință locale, atașate mediului în mișcare. În teoria macroscopică se adoptă conceptul propus de Herz potrivit căruia vidul este o stare limită, de extremă rarefiere, a substanței.

1.2. Mărimele primitive și principalele mărimi derive ale teoriei macroscopică a câmpului electromagnetic

Mărimea fizică este o proprietate a unui sistem fizic susceptibilă la caracterizări cantitative. Nu orice proprietate fizică este măsurabilă. (nu are culoare, formă)

a) Clasificarea mărimilor câmpului electromagnetic

A. După modul de introducere a mărimilor

- **mărimi primitive**, se introduc pe cale inductivă făcând direct apel la experiență
- **mărimi derive**, se exprimă matematic cu ajutorul mărimilor primitive pentru o mai bună caracterizare a unui fenomen fizic.

În orice teorie, doar numărul mărimilor primitive este constant. În teoria câmpului electromagnetic mărimile primitive sunt:

- q **sarcina electrică** descrie starea de încărcare a corpurilor;
- \bar{p} **momentul electric** descrie starea de polarizare electrică a corpurilor;
- i **intensitatea curentului electric de conducție** characterizează starea electrocinetică (de conducție) a corpurilor;
- \bar{m} **momentul magnetic** descrie starea de magnetizare a corpurilor;
- \bar{E}_v **vectorul câmp electric în vid** este componenta electrică a câmpului electromagnetic;
- \bar{B}_v **vectorul inducție magnetică** în vid este componenta magnetică a câmpului electromagnetic.

În orice teorie de câmp este necesar a se realiza o dublă descriere a fenomenelor: *locală* (*punctuală*), respectiv *globală* (*integrală*) în raport cu anumite curbe, suprafețe sau volume.

Introducerea mărimilor primitive se face prin imaginarea unor experiențe idealizate care să accentueze o singură proprietate a corpului sau a câmpului, diminuându-le pe celelalte până la neglijare.

B. Din punctul de vedere al sistemului de unități de măsură:

- fundamental
- secundar

- sistemul MKSA raționalizat (SI): metru, kilogram, secundă, ampere
- sistemul CGS: centimetru, gram, secundă

C. Conform principiului cauzalității sunt:

- mărimi de stare ce caracterizează starea unui sistem fizic la un moment dat
- mărimi de proces

D. Din punct de vedere matematic sunt:

- mărimi scalare
- mărimi vectoriale
- mărimi tensoriale

b) Starea de încărcare electrică și câmpul electric

Sarcina electrică și câmpul electric în vid

Experiența arată că prin frecarea unui baston de sticlă (răsină, ebonită) cu un material textil, cele două copuri sunt aduse într-o stare calitativ nouă, caracterizată prin aceea că, atât între ele cât și asupra altor corpi din vecinătate se exercită la distanță interacțiuni ireductibile la cele de natură mecanică. (În general, interacțiunile constau în apariția unor forțe și cupluri). Noile acțiuni ponderomotoare observate sunt electrice, iar sistemul fizic care asigură transmiterea la distanță a acestor interacțiuni este câmpul electric. În cazul în care interacțiunile observate sunt numai sub forma unor forțe starea de electrizare se numește stare de încărcare electrică. Frecarea nu este singurul mod de electrizare. Alte exemple: încălzirea neomogenă a unor corpi, iradiere, tensiune mecanică (electrostricțiune), reacții chimice, contactul sau simpla apropiere a unui corp încărcat.

Pentru a investiga simultan starea de încărcare și câmpul electric se imaginează o experiență care folosește un corp de probă metalic sau metalizat de mici dimensiuni (Fig. 2.01) Se constată că:

- în același punct al câmpului asupra unui corp de probă cu stări de încărcare diferite se exercită forțe având o direcție unică, dar diferind ca mărime și sens;
- raportul în care se găsesc forțele care se exercită asupra a două corpi de probă cu stări de încărcare diferite este același în orice punct al câmpului.

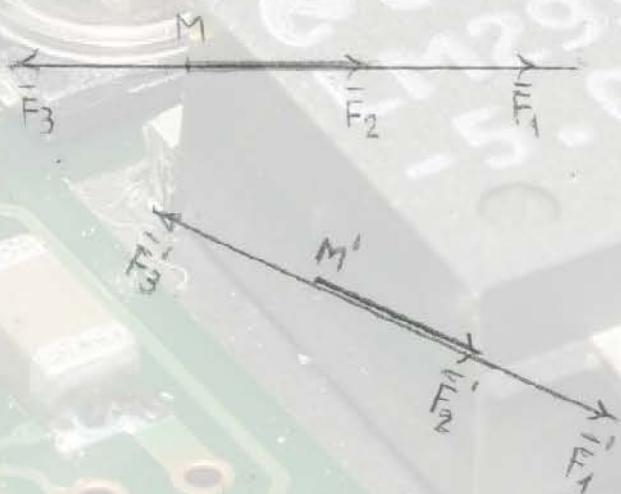


Fig. 2.01

Experiment idealizat:

$$\bar{F}_1 = 3\bar{F}_2 \quad \bar{F}'_1 = 3\bar{F}'_2$$

$$\bar{F}_3 = -\bar{F}_1 \quad \bar{F}'_3 = -\bar{F}'_1$$

Experiența arată că dacă se introduce un corp punctual încărcat electric într-un câmp electric asupra lui acționează o forță dependentă atât de încărcarea corpului cât și de câmp. Aceasta are expresia

$$\bar{F} = q \bar{E}_v \quad (1)$$

Se introduc simultan două mărimi primitive:

- **Sarcina electrică** q , este o mărime fizică scalară care caracterizează global starea de încărcare a corpului de probă. Este o mărime fizică extensivă: la alipirea / divizarea unor corpuri încărcate sarcina lor electrică se adună / divide scalar;
- **Vectorul intensitate câmp electric în vid** \bar{E}_v este o mărimea fizică vectorială ce caracterizează local câmpul electric în vid.

Prin convenție se consideră pozitivă, sarcina cu care se încarcă un baston de sticlă frecat și negativă, sarcina cu care se încarcă un baston de ebonită. Pentru a elimina influența corpului de probă asupra câmpului exterior, acesta se definește prin raportul:

$$\bar{E}_v = \lim_{q \rightarrow 0} \frac{\bar{F}}{q}$$

de unde rezultă că pentru un corp punctual încărcat cu o sarcină electrică foarte mică, forța exercitată asupra lui este cea prezentată ceva mai sus (vedeți ecuația (1)).

Forța Coulomb

Experiența arată că între două corpuri punctuale încărcate cu sarcinile q_1 și q_2 situate la distanța r se exercită forțe fie de atracție, fie de respingere, astfel încât este satisfăcută relația (Fig. 2.02):

$$\bar{F}_{12} + \bar{F}_{21} = 0$$

în care, $|\bar{F}_{12}| = |\bar{F}_{21}| = |\bar{F}| = F$

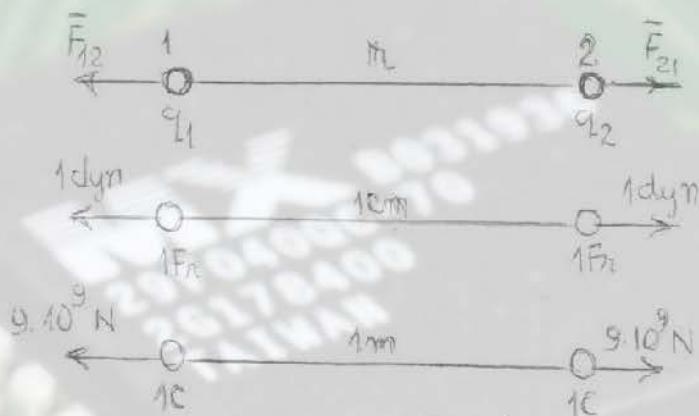


Fig. 2.02

Experiența mai arată că modulul acestei forțe este proporțional cu produsul sarcinilor și invers proporțional cu pătratul distanței dintre ele:

$$F \approx \frac{1}{r^2} |q_1 q_2|$$

sau, introducând o constantă de proporționalitate Δ_0 această forță se mai scrie

$$F = \Delta_0 \frac{1}{r^2} |q_1 q_2|,$$

iar între unitățile lor de măsură există egalitatea $\langle \Delta_0 q^2 \rangle = \langle F r^2 \rangle$.

Formula lui Coulomb este

$$\bar{F} = \Delta_0 \frac{q_1 q_2}{r^2} \bar{u}_{12}$$

în care \bar{u}_{12} este vesorul orientării forței.

În sistemul de unități CGS (centimetru-gram-secundă electrostatic) avem $\Delta_0 = 1 \frac{\text{dyn cm}^2}{\text{Fr}^2}$

Într-adevăr, deoarece în aceste condiții $\langle q \rangle = \langle \sqrt{F} r \rangle$ rezultă că unitatea de măsură a sarcinii electrice este $\sqrt{\text{dyne}} \text{ cm}$ numită 1 franklin. Deci,

$$\langle q \rangle_{CGSes} = 1 \text{ franklin (1 Fr)}$$

$$\text{În sistemul de unități internațional SI avem } \Delta_0 = 9 \cdot 10^9 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\text{N m}^2}{\text{C}^2}$$

ϵ_0 fiind permisivitatea vidului, iar C (Coulomb) unitatea de măsură a sarcinii electrice.

$$\text{Permisivitatea vidului în SI este } \epsilon_0 = \frac{1}{4\pi 9 \cdot 10^9} \frac{\text{F}}{\text{m}},$$

în care unitatea de măsură F/m (F, prescurtarea numelui Farad), se va justifica ulterior, după prezentarea unor legi și teoreme precum legea fluxului electric, relația dintre tensiunea și capacitatea electrică, dintre tensiune și câmpul electric.

Distribuții de sarcini electrice

Densitatea de volum a sarcinii electrice ρ_v se definește prin raportul:

$$\rho_v = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta v} = \frac{\delta q}{\delta v} = \frac{dq}{dv} \quad \text{în care } <\rho_v>_{SI} = 1 \frac{C}{m^3}$$

Sarcina totală din interiorul unui domeniu (D) este dată de integrala de volum (Fig. 2.03)

$$q_D = \int_{(D)} \delta q = \int_{(D)} \rho_v dv$$

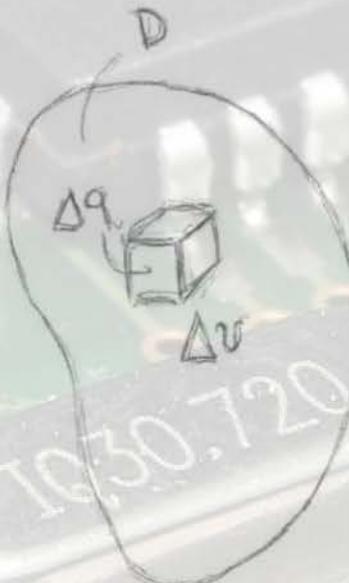


Fig. 2.03

Densitatea superficială a sarcinii electrice ρ_s se definește prin raportul:

$$\rho_s = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta A} = \frac{\delta q}{\delta A} = \frac{dq}{dA} \quad \text{în care } <\rho_s>_{SI} = 1 \frac{C}{m^2}$$

Sarcina totală de pe o suprafață (S) (Fig. 2.04) este dată de integrala de suprafață:

$$q_S = \int_{(S)} \delta q = \int_{(S)} \rho_s dA$$

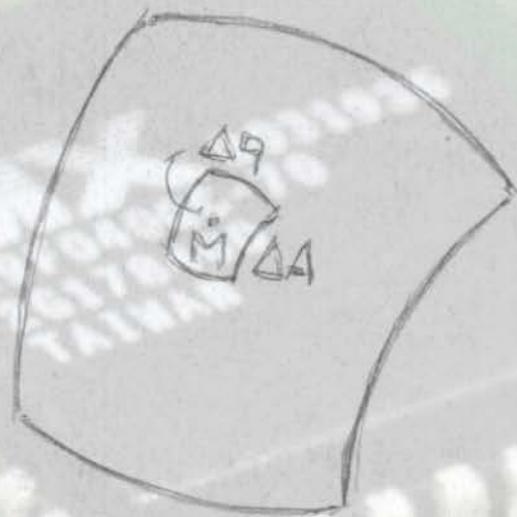


Fig. 2.04

Densitatea de linie a sarcinii electrice ρ_l se definește prin raportul:

$$\rho_l = \lim_{\Delta l \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta l} = \frac{\delta q}{\delta l} = \frac{dq}{dl} \quad \text{în care } <\rho_l>_{SI} = 1 \frac{C}{m}$$

Sarcina totală de pe o curbă (linie) (C) (Fig. 2.05) este dată de integrala de linie

$$q_C = \int_{(C)} \delta q = \int_{(C)} \rho_l dl$$

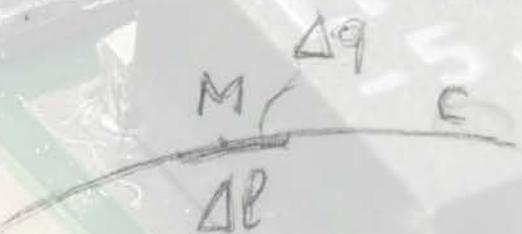


Fig. 2.05

Câmpul electric în corpuri

Se pune problema caracterizării câmpului electric în interiorul corpurilor. În interiorul unui corp masiv corpul de probă nu se poate introduce decât practicând o cavitate vidă în jurul unui punct de observație M din corp, în care dorim să definim câmpul (Fig. 2.06). Pentru o definire cât mai corectă se diminuează omotetic cavitatea din jurul punctului de observație și se măsoară de fiecare dată câmpul electric \bar{E}_v în punctul M. Limita care se obține nu este unică, ci depinde de forma și orientarea cavității. Dacă limita ar fi fost unică pentru orice formă și orice orientare a cavității aleasă ar fi fost susceptibilă la a caracteriza câmpul electric în corpuri.

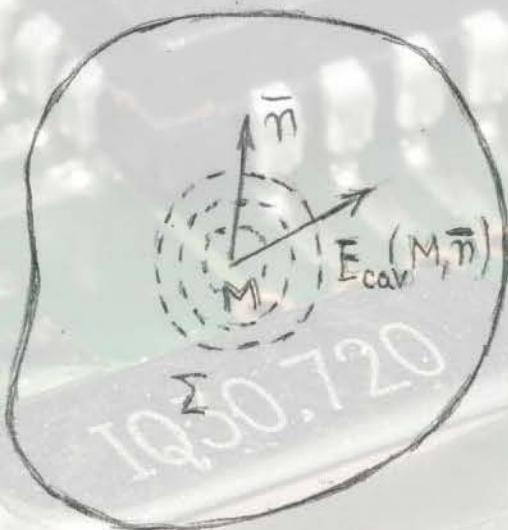


Fig. 2.06

Deci o singură mărime nu mai este suficientă pentru a caracteriza câmpul electromagnetic în corpuri. Se caută o cavitate vidă de o asemenea formă încât câmpul electromagnetic să fie cât mai puțin afectat de forma acesteia. Se adoptă un elipsoid de rotație foarte aplatizat, în interiorul căruia într-un punct M se va determina câmpul $\bar{E}_{elips}(M, \bar{n})$. Experiența arată că acești vectori (obținuți pentru diverse orientări \bar{n} ale cavității) au proiecțiile pe direcțiile vesorului \bar{n} și \bar{D} după un plan normal pe acesta, egale cu proiecțiile vectorilor $\frac{1}{\epsilon_0} \bar{D}$ și \bar{E} .

Vectorii astfel introdusi se numesc \bar{D} - *inducție electrică* și \bar{E} - *intensitatea câmpului electric* și reprezintă o pereche capabilă să caracterizeze starea locală a câmpului în punctul M (Fig. 2.07).

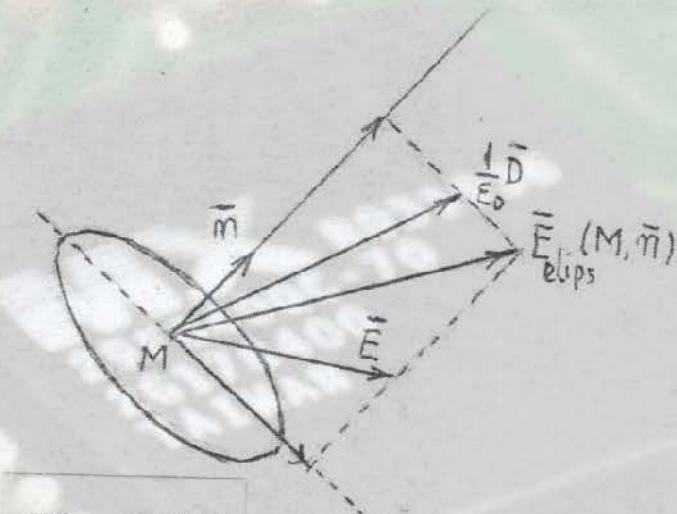


Fig. 2.07

Se observă că valorile celor doi vectori se obțin pentru acele orientări particulare ale cavitatei, cărora le corespund valorile maxime ale proiecțiilor normală și tangențială ale vectorului $\bar{E}_{\text{elips}}(M, \bar{n})$. Avem:

$$\bar{D}(M) = \varepsilon_0 \max_n \{ \bar{n} \cdot [\bar{E}_{\text{elips}}(M, \bar{n}) \cdot \bar{n}] \} \quad \langle E \rangle_{SI} = 1 \text{ V/m},$$

$$\bar{E}(M) = \max_n \{ \bar{n} \times [\bar{E}_{\text{elips}}(M, \bar{n}) \times \bar{n}] \} \quad \langle D \rangle_{SI} = 1 \text{ C/m}.$$

Mărimi de caracterizare globală (integrală) a câmpului electric

Tensiunea electrică este integrala de linie a intensității câmpului electric între două puncte A și B situate pe o curbă dată (C) (Fig. 2.08):

$$u_{AB} = \int_{A(C)}^B \overline{E} \cdot d\overline{l} = \int_{A(C)}^B E \, dl \cos \alpha = \int_{A(C)}^B E_t \, dl$$

în care $d\overline{l}$ este un vector de linie elementar, tangent la curbă.

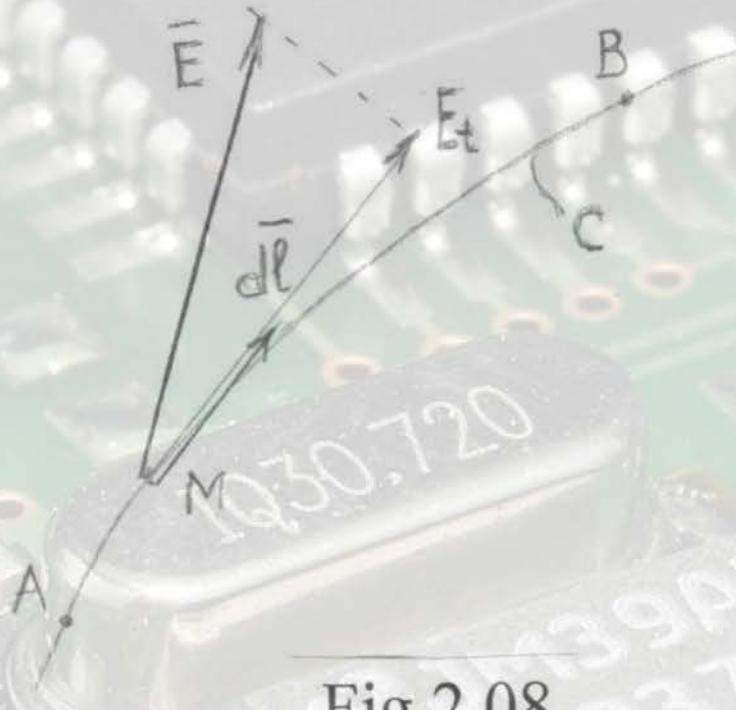


Fig.2.08

Prin definiție liniile de câmp ale vectorului \overline{E} se numesc linii de câmp electric. Acest vector este tangent la linii, în fiecare punct al lor. Se numește tensiune electromotoare integrală:

$$e_{\Gamma} = \oint_{\Gamma} \overline{E} \cdot d\overline{l}$$

Unitatea de măsură în SI a tensiunii electrice și a tensiunii electromotoare este Volt-ul.

Fluxul electric este integrala de suprafață a inducției electrice \bar{D} (Fig. 2.09) în care α este unghiul dintre inducție și normala \bar{n} .

$$\Psi_S = \int_S \bar{D} \cdot d\bar{A} = \int_S \bar{D} \cdot \bar{n} dA = \int_S D dA \cos \alpha = \int_S D_n dA$$

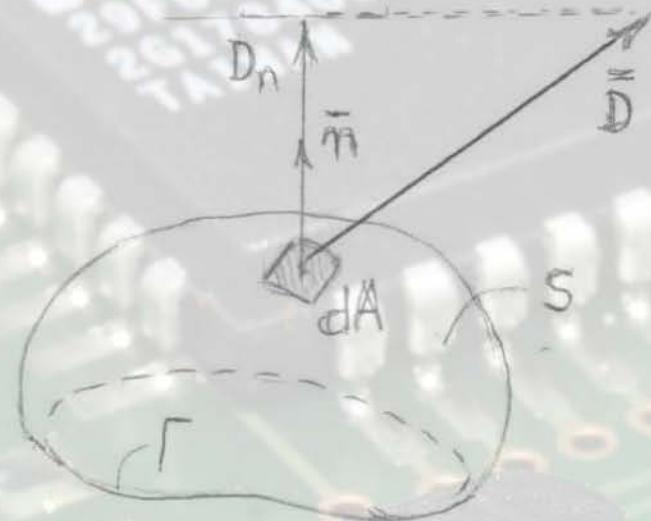


Fig.2.09

Unitatea de măsură în SI pentru fluxul electric este Coulomb-ul.

Tensiunea și fluxul electric reprezintă mărimele globale (integrale) ale caracterizării câmpului electric în raport cu curbe și suprafețe.

Observații:

- Sensul de integrare arbitrar ales se numește sens de referință. Sensul de referință care corespunde valorii pozitive a mărimii se numește sens fizic;
- În cazul suprafețelor închise, normala se consideră întotdeauna orientată către exteriorul suprafeței;
- În cazul suprafețelor deschise, după stabilirea unui sens de parcurs a curbelor închise care le mărginește, se folosește regula burghiuului drept.

c) Starea de polarizare electrică

Este a doua stare de electrizare a corpurilor, în afara celei de încărcare. Experiența arată că există coruri neîncărcate electric asupra cărora un câmp electric extern exercită acțiuni ponderomotoare și care, la rândul lor, își asociază un câmp electric propriu. Această nouă stare se numește stare de polarizare electrică și poate fi obținută în două moduri:

- la introducerea unui corp neconductor într-un câmp electric exterior. Dacă la înlăturarea câmpului electric corpul revine la starea nepolarizată, polarizarea se numește temporară, iar corurile având această proprietate se numesc dielectrii.
- ca urmare a unor cauze de natură neelectrică independente de existența unui câmp electric exterior. Acest tip de polarizare se numește polarizare permanentă și poate apărea în urma încălzirii sau deformării mecanice a unor cristale sau a solidificării în câmpuri electrice puternice a unor substanțe topite, polarizabile (electreți). Cele două tipuri de polarizare pot coexista, neexcluzându-se reciproc.

La introducerea în vid a unui mic corp polarizat într-un câmp electric exterior, asupra lui acționează un cuplu dat de expresia:

$$\bar{C} = \bar{p} \times \bar{E}_v$$

care definește relația de definiție a mărimei vectoriale \bar{p} numită **moment electric** al micului corp polarizat. Momentul electric este o mărime extensivă, întrucât se poate diviza sau însumă vectorial.

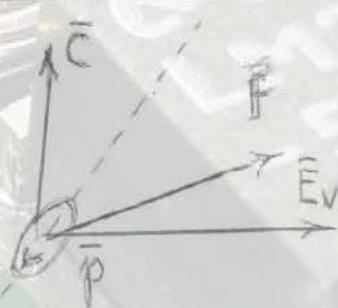


Fig.2.10

Dacă se plasează micul corp polarizat într-un punct M al unui câmp electric în două poziții particulare (Fig. 2.10) cuplul ia următoarele valori:

- pentru \bar{p} omoparalel cu $\bar{E}_v \rightarrow |\bar{C}| = 0$
- pentru \bar{p} perpendicular pe $\bar{E}_v \rightarrow |\bar{C}| = |\bar{p}| |\bar{E}_v|$

Din ultima relație se poate determina experimental modulul momentului electric, din raportul $|\bar{p}| = |\bar{C}| / |\bar{E}_v|$. Se demonstrează că unitatea de măsură a momentului electric este coulomb-metru: $\langle p \rangle_{SI} = 1 \text{ C.m}$. În cazul general, momentul electric este suma momentelor temporar și permanent $\bar{p} = \bar{p}_t + \bar{p}_p$.

Caracterizarea locală a câmpurilor scalare și vectoriale se face cu ajutorul operatorilor gradient, divergență și rotor exprimăți uneori și cu ajutorul simbolului nabla ∇ .

Gradientul operează asupra unei mărimi scalare φ , iar rezultatul este vector:

$$\nabla \varphi = \text{grad } \varphi \text{ (gradientul campului de scalari } \varphi)$$

Divergența operează asupra unei mărimi vectoriale \bar{G} , iar rezultatul este un scalar:

$$\nabla \cdot \bar{G} = \text{div } \bar{G} \text{ (divergenta campului de vectori } \bar{G})$$

Rotorul operează asupra unei mărimi vectoriale \bar{G} , iar rezultatul este un vector:

$$\nabla \times \bar{G} = \text{rot } \bar{G} \text{ (rotorul campului de vectori } \bar{G})$$

în care, operatorul *nabla* este în coordonate carteziene $\nabla = \bar{i} \frac{\partial}{\partial x} + \bar{j} \frac{\partial}{\partial y} + \bar{k} \frac{\partial}{\partial z}$.

În general, asupra micului corp polarizat, situat într-un câmp electric se exercită o forță. Aceasta se manifestă doar în cazul în care câmpul electric în vid este neuniform. În acest caz are expresia:

$$\bar{F} = (\bar{p} \nabla) \bar{E}_v = (\bar{p} \text{ grad}) \bar{E}_v \quad (1)$$

în care, $\bar{p} = p_x \bar{i} + p_y \bar{j} + p_z \bar{k}$ este în coordonate carteziene momentul electric în funcție de proiecțiile sale pe axele rectangulare.

Acste componente p_x, p_y, p_z - și deci însuși \bar{p} - se pot determina în funcție de componentele forței \bar{F} și ale câmpului electric în vid \bar{E}_v . Într-adevăr, expresia (1) se poate exprima pe componente, astfel:

$$F_x = p_x \frac{\partial E_{vx}}{\partial x} + p_y \frac{\partial E_{vx}}{\partial y} + p_z \frac{\partial E_{vx}}{\partial z}$$

$$F_y = p_x \frac{\partial E_{vy}}{\partial x} + p_y \frac{\partial E_{vy}}{\partial y} + p_z \frac{\partial E_{vy}}{\partial z}$$

$$F_z = p_x \frac{\partial E_{vz}}{\partial x} + p_y \frac{\partial E_{vz}}{\partial y} + p_z \frac{\partial E_{vz}}{\partial z}$$

Din acest sistem de ecuații se determină componentele p_x, p_y, p_z și deci însuși \bar{p} , cum arătam mai sus.

În cazul unui corp masiv polarizat, se poate introduce o mărime derivată, care poate caracteriza starea de polarizație a corpului, în fiecare punct al său. Aceasta se numește **polarizație electrică** și se definește prin raportul (Fig. 2.11):

$$\bar{P} = \lim_{\nabla v \rightarrow 0} \frac{\Delta \bar{p}}{\Delta v} = \frac{d \bar{p}}{d v}$$

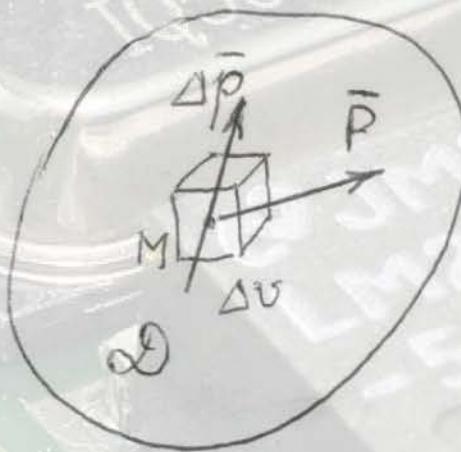


Fig.211.

De aici rezultă că se poate determina momentul electric al întregului domeniu D ocupat de corp, cu ajutorul integralei de volum:

$$\bar{p}_D = \int_D \bar{P} dv$$

Bazele Electrotehnicii II – Teoria câmpului electromagnetic

De asemenea, polarizația electrică se poate descompune într-o componentă temporară și una permanentă:

$$\bar{P} = \bar{P}_t + \bar{P}_p$$

Unitatea de măsură SI a polarizației electrice coincide cu cea a inducției electrice și cea a densității de sarcină electrică:

$$\langle P \rangle_{SI} = \langle D \rangle_{SI} = \langle \rho_s \rangle_{SI} = 1 \frac{C}{m^2}$$

d) Câmpul magnetic și starea de magnetizare a corpurilor

Experiența arată că există corperi care nu sunt conductoare electrice în stare electrocinetică, între care, atunci când sunt imobile, se exercită acțiuni ponderomotoare ireductibile la cele de natură mecanică. Starea specifică a acestor corperi se numește stare de magnetizare. Interacțiunile dintre corperi se numesc magnetice, iar sistemul fizic asociat corpurilor magnetice și prin intermediul cărora se transmit aceste interacțiuni se numește câmp magnetic. Acesta își asociază corpurile magnetizate, conductoarele în stare electrocinetică și corpurile electrizate în mișcare; câmpul magnetic se mai poate obține prin variația rapidă în timp a câmpului electric. Câmpul magnetic exercită acțiuni asupra corpurilor magnetizate, corpurilor în stare electrocinetică

Forță Lorentz

Se definește drept *inducție magnetică în vid* \bar{B}_v , mărimea primitivă care realizează caracteristica locală, completă a câmpului magnetic în vid. Dacă în acest câmp (Fig. 2.12) se deplasează cu viteza \bar{v} un corp de probă încărcat cu sarcina electrică q asupra lui, acționează o forță:

$$\bar{F} = q \bar{v} \times \bar{B}_v \quad (1)$$

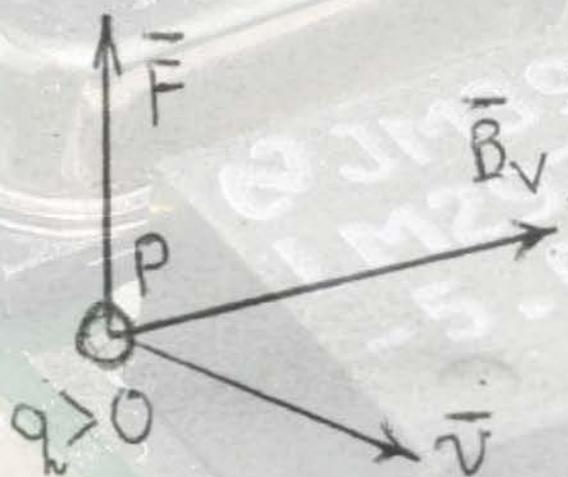


Fig.2.12

Determinarea vectorului \bar{B}_v se face:

- identificând direcția particulară a vitezei \bar{v} pentru care forța exercitată să fie nulă;
- măsurând valoarea forței care se exercită asupra corpului de probă atunci când viteza sa este perpendiculară pe direcția particulară găsită mai sus.
- precizând ca ordine a produsului vectorial ordinea din formula (1).

Unitatea de măsură în SI a inducției magnetice în vid este 1 T (Tesla): $\langle B_v \rangle_{SI} = 1 \text{ T}$.

Câmpul magnetic în interiorul corpurilor

Caracterizarea câmpului magnetic în interiorul unui corp masiv magnetizat, se face practicând o cavitate vidă în jurul unui punct P (Fig. 2.13). O singură mărime nu este suficientă pentru a caracteriza câmpul magnetic în corpuri. Se caută o cavitate vidă de o asemenea formă încât câmpul să fie cât mai puțin afectat de forma acesteia. Se adoptă un elipsoid de rotație foarte aplatizat, în jurul punctului P în care se va determina inducția magnetică $\bar{B}_{elips}(P, \bar{n})$.

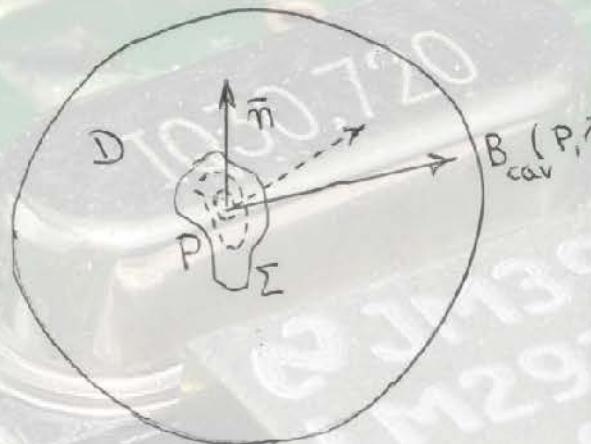


Fig.2.13

Dacă valoarea calculată a vectorului inducție magnetică în vid ar fi unică pentru orice formă și orientare a cavității, aceasta ar putea constitui mărimea susceptibilă să descrie local câmpul magnetic în corp. Experimental se arată însă că limita depinde atât de forma cavității cât și de orientarea ei. Pentru a înlătura acest neajuns, se vor defini în interiorul elipsoidului două mărimi pentru caracterizarea câmpului magnetic în corpuri:

\bar{B} - *inducția magnetică*

\bar{H} - *intensitatea câmpului magnetic*

Vectorii \bar{B} și \bar{H} reprezintă perechea de mărimi necesare și suficiente pentru descrierea locală a câmpului magnetic într-un punct al corpului (Fig. 2.14).

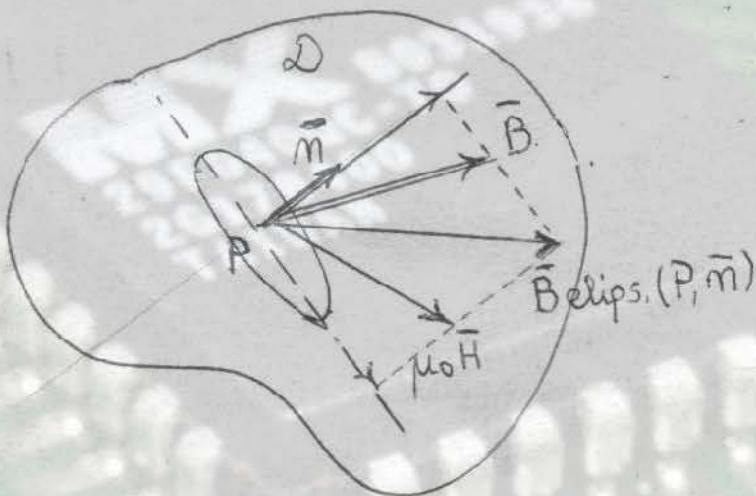


Fig. 2.14

Ea se definește astfel:

$$\bar{B}(P) = \max_n \{n \cdot [\bar{B}_{\text{elips}}(P, \bar{n}) \cdot \bar{n}]\}$$

$$\bar{H}(P) = \frac{1}{\mu_0} \max_n \{n \cdot [\bar{B}_{\text{elips}}(P, \bar{n}) \times \bar{n}]\}$$

în care μ_0 este permeabilitatea magnetică a vidului având valoarea $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ [H/m], H fiind simbolul numelui Henry și reprezintă unitatea de măsură a mărimii numite **inductivitate** care se va prezenta ulterior. Avem deci,

$$\langle B \rangle_{SI} = 1 \text{ T} \quad ; \quad \langle B_v \rangle_{CGS} = 1 \text{ Gs (gauss)} = 10^{-4} \text{ T}$$

$$\langle H \rangle_{SI} = 1 \text{ A/m} \quad ; \quad \langle H \rangle_{CGS} = 1 \text{ Oe (Oersted)} = \frac{10^3}{4\pi} \text{ A/m}$$

Liniile de câmp ale vectorului \bar{H} sunt linii ale câmpului magnetic, iar liniile de câmp ale vectorului \bar{B} sunt linii ale fluxului magnetic definit mai jos.

Mărimi de caracterizare globală (integrală) a câmpului magnetic

Fluxul magnetic ϕ se definește drept integrala de suprafață a inducției magnetice (Fig. 2.15)

$$\phi_S = \int_S \overline{B} \cdot d\overline{A} = \int_S \overline{B} \cdot \overline{n} dA = \int_S B dA \cos \alpha = \int_S B_n dA$$

Unitatea de măsură: $\langle \phi \rangle_{SI} = 1 \text{ Wb}$ (Weber) $\langle \phi \rangle_{CGS} = 10^8 \text{ Mx}$ (max well)

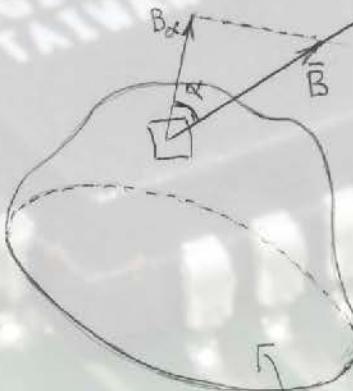


Fig.2.15

Tensiunea magnetică u_m este integrala de linie pe o curba C a câmpului magnetic (Fig. 2.16)

$$u_{AB} = \int_A^B \overline{H} dl = \int_A^B H dl \cos \alpha = \int_A^B H_t dA$$

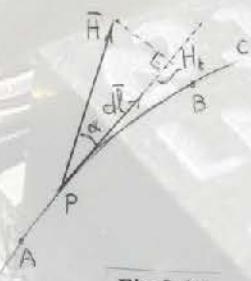


Fig.2.16

Dacă curba este închisă Γ integrala de-a lungul ei se numește tensiune magnetomotoare:

$$u_{mm\Gamma} = \oint_{\Gamma} \overline{H} dl$$

Unitatea de măsură pentru tensiunea magnetică este amperul: $\langle u_m, u_{mm\Gamma} \rangle_{SI} = 1A$

Fluxul magnetic și tensiunea magnetică sunt mărimele de caracterizare globală (integrală) a câmpului magnetic în raport cu suprafețe și curbe.

Starea de magnetizare

Pentru caracterizarea stării de magnetizare a corpurilor se studiază experimental cuprul mecanic \bar{C} pe care îl produce în vid un câmp magnetic invariabil în timp, asupra unui mic corp magnetizat. Cu ajutorul lui, se definește mărimea de tip extensiv numită **moment magnetic** \bar{m} al micului corp magnetizat:

$$\bar{C} = \bar{m} \times \bar{B}_v \quad (2)$$

Fie P punctul din câmp în care se află micul corp (Fig. 2.17). Acesta se rotește în jurul acestui punct până se obțin următoarele situații particulare:

- când momentul \bar{m} este omoparalel cu inducția \bar{B} ; se obține cuprul $\bar{C} = 0$;
- când \bar{m} și \bar{B} sunt perpendiculari; se obține în acest caz cuprul $|\bar{C}| = |\bar{m}| |\bar{B}_v| \cdot 1$.

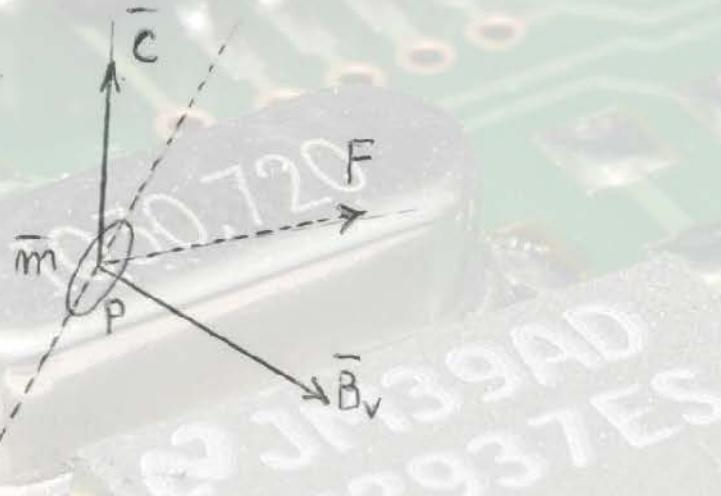


Fig.2.17

Sensul cuplului este dat de ordinea scrierii produsului vectorial (2). Unitatea de măsură SI a momentului magnetic este amper-metru-pătrat: $\langle m \rangle_{SI} = 1 \text{ A m}^2$.

Starea de magnetizare este de două tipuri:

- *stare de magnetizare temporară* care apare la introducerea unui corp (magnetizabil) într-un câmp magnetic exterior și dispare la îndepărtarea corpului de câmp;
- *starea de magnetizare permanentă* ca urmare a unei structuri microscopice a corpului sau a existenței unor cauze nemagnetice (precum tensiunea mecanică).

În general aceste stări se pot suprapune:

$$\bar{m} = \bar{m}_t + \bar{m}_p$$

Forța care se exercită în vid asupra unui mic corp magnetizat de moment magnetic \bar{m} plasat într-un câmp magnetic exterior \bar{B}_v este:

$$\bar{F} = (\bar{m} \nabla) \bar{B}_v = (\bar{m} \text{ grad}) \bar{B}_v = (m_x \frac{\partial}{\partial x} + m_y \frac{\partial}{\partial y} + m_z \frac{\partial}{\partial z}) \bar{B}_v$$

sau, pe componente:

$$F_x = m_x \frac{\partial B_{vx}}{\partial x} + m_y \frac{\partial B_{vx}}{\partial y} + m_z \frac{\partial B_{vx}}{\partial z}$$

$$F_y = m_x \frac{\partial B_{vy}}{\partial x} + m_y \frac{\partial B_{vy}}{\partial y} + m_z \frac{\partial B_{vy}}{\partial z}$$

$$F_z = m_x \frac{\partial B_{vz}}{\partial x} + m_y \frac{\partial B_{vz}}{\partial y} + m_z \frac{\partial B_{vz}}{\partial z}$$

Din acest sistem de ecuații, măsurând componentele forței și ale inducției magnetice, se pot determina componentele m_x, m_y, m_z și deci, momentului magnetic \bar{m} .

În cazul unui corp masiv magnetizat, se poate introduce o mărime derivată, care poate caracteriza starea de magnetizare a corpului, în fiecare punct al său. Aceasta se numește **magnetizație** și se definește prin raportul (Fig. 2.18):

$$\bar{M} = \lim_{\Delta v \rightarrow 0} \frac{\Delta \bar{m}}{\Delta v} = \frac{d \bar{m}}{d v}$$

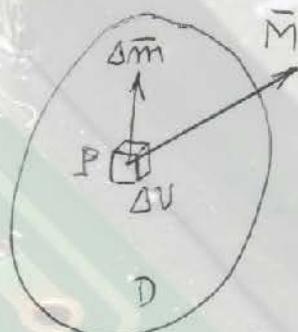


Fig.2.18

De aici rezultă că se poate determina momentul magnetic al întregului domeniu D ocupat de corp, cu ajutorul integralei de volum

$$\overline{m}_D = \int_D \overline{M} dv.$$

De asemenea, magnetizația se poate descompune într-o componentă temporară și una permanentă:

$$\overline{M} = \overline{M}_t + \overline{M}_p.$$

Unitatea de măsură SI a magnetizației coincide cu cea a câmpului magnetic: $\langle M \rangle_{SI} = 1 \frac{A}{m}$.

e) Starea electrocinetică

Experiența arată că există o stare specifică numai corpurilor conductoare în care acestea suferă acțiuni din partea câmpului electromagnetic, stare numită *electrocinetică*. Aceasta este determinată de prezența unui câmp electric în conductoare și se identifică prin efectele care o însoțesc. Aceste efecte sunt:

- *magnetice*: conductoarele aflate în această stare își asociază un câmp magnetic;
- *optice*: apar descărcări în gaze rarefiate, sau indirect ca urmare a încălzirii până la incandescență;
- *electrodinamice*: se exercită forțe din partea câmpului electromagnetic asupra conductoarelor aflate în stare electrocinetică, forțe diferite de cele electrice și magnetice;
- *termice*: starea electrocinetică este însoțită de degajare de căldură;
- *magnetoelectrice*: când sarcina electrică a unor conductoare încărcate variază;
- *chimice*: la unele conductoare starea electrocinetică este însoțită de reacții chimice; sub acest aspect deosebim:
 1. *conductoare de spătă I* în care nu există efecte chimice, iar conducția este electronică
 2. *conductoare de spătă II* (electroliți) care asigură o conducție ionică.

Introducem un conductor filiform aflat în stare electrocinetică, într-un câmp magnetic caracterizat de vectorul inducției magnetice în vid \bar{B}_v (Fig. 2.19). Experiența arată că:

- asupra segmentului $\overline{\Delta l}$ orientat în lungul firului, acionează o forță $\Delta \bar{F}$,
- $\Delta \bar{F}$ este perpendicular pe planul determinat de vectorii $\overline{\Delta l}$ și \bar{B}_v ,
- $|\Delta \bar{F}|$ este proporțional cu produsul $\Delta l \cdot B_v \cdot \sin \alpha$ și, foarte important,
- constanta de proporționalitate nu depinde de poziția în câmp a segmentului, ci numai de starea electrocinetică a firului, numită *intensitatea curentului de conducție i*.

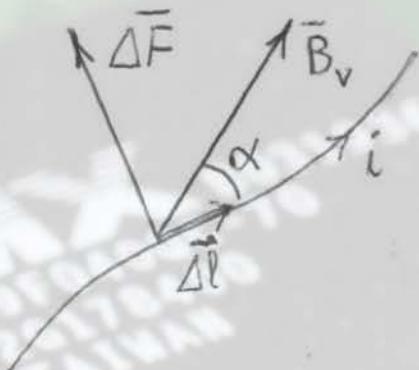


Fig.2.19

Relația de definiție a acestei mărimi primitive scalare i este dată de expresia (forță) Laplace:

$$\Delta \bar{F} = i \Delta \bar{l} \times \bar{B}_v \quad (3)$$

Unitatea de măsură SI pentru curentul de conducție este 1 A (amper). Se mai poate scrie și astfel:

$$.\langle i \rangle_{SI} = 1 \text{ A} \quad .\langle i \rangle_{CGS} = 1 \text{ Bi (biot)} = 10 \text{ A}$$

Observație: Pentru ca mărimea curentului de conducție i să fie univoc definită este necesar să se indice un criteriu fizic pentru alegerea sensului vectorului $\Delta \bar{l}$ căruia se convine să i se asociază $i > 0$. Analogia cu relația $\bar{F} = q \bar{v} \times \bar{B}_v$ face să numim sens real al curentului de conducție, sensul de deplasare a unei particule încărcate pozitiv, care ar da o forță magnetică de același sens cu forța exercitată de același câmp magnetic asupra elementului de circuit de lungime Δl .

În cazul unei repartiții de volum a sarcinii electrice, pentru caracterizarea locală a stării electrocinetice se folosește o mărime vectorială derivată \bar{J} numită **densitate de curent**, definită astfel încât fluxul său printr-o suprafață oarecare să fie egal cu intensitatea curentului de conducție prin acea suprafață (Fig. 2.20):

$$i_S = \int_S \bar{J} \cdot d\bar{A} = \int_S \bar{J} \cdot \bar{n} dA = \int_S J dA \cos \alpha = \int_S J_n dA.$$

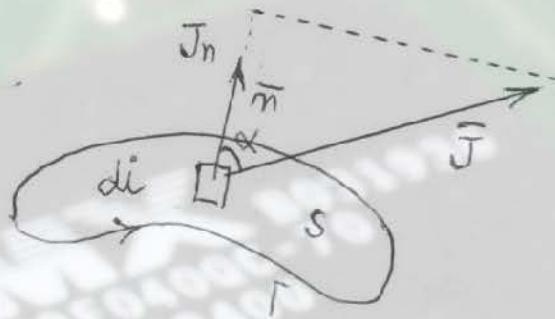


Fig.2.20

Unitatea de măsură a densității de curent este amper/metrul-pătrat: $\langle J \rangle_{SI} = 1 \frac{A}{m^2}$.

Liniile de câmp ale vectorului \bar{J} se numesc linii de curent.

Conductoarele sunt considerate filiforme, când dimensiunea lor transversală este atât de redusă încât, densitatea curentului prin secțiune poate fi considerată uniformă. Curba C (Fig. 2.21) este denumită linia medie a conductorului.

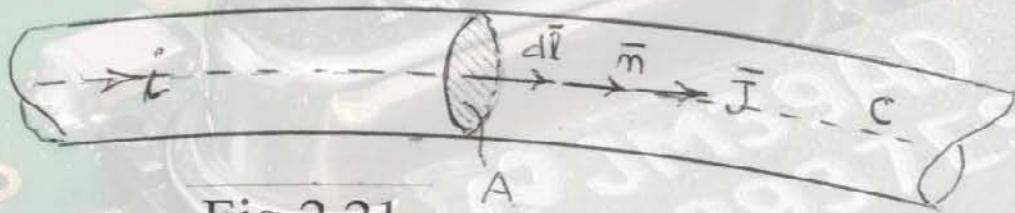


Fig.2.21

Curentul electric este:

$$i = \int_S \bar{J} \cdot \bar{n} dA = \int_S J dA = JA$$

f) Câmpul electric imprimat

În conductoare există uneori fenomene de natură neelectrică care produc efecte similare celor pe care le-ar produce un câmp electric. Câmpul electric fictiv care produce efecte identice cu cele natură neelectrică se numește **câmp electric imprimat** \tilde{E}_i . Se prezintă mai jos trei astfel de câmpuri.

Câmpul imprimat de acceleratie

Dacă se rotește un disc metalic în jurul axului său (Fig. 2.22) electronii sunt atrași de periferia discului, iar centrul acestuia rămâne încărcat pozitiv. Apare astfel un câmp electric imprimat \tilde{E}_i dirijat dinspre periferie spre centrul discului.

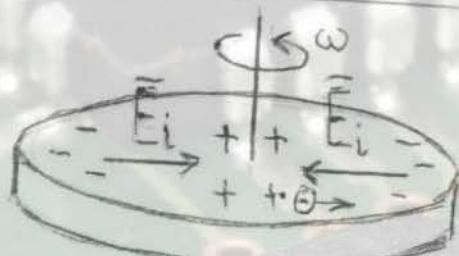


Fig.2.22

Câmpul imprimat de concentrație

Dacă într-un vas un perete poros desparte o zonă 1 cu o soluție de acid clorhidric concentrat, de altă zonă 2 cu acid clorhidric diluat, ionii compoziți ai acidului din prima zonă tend să treacă prin perete în cea de a doua zonă. Experiența arată că ionii pozitivi de hidrogen H^+ având o mobilitate mai mare decât cei negativi de clor Cl^- , încarcă pozitiv acidul din cea de a doua zonă și negativ pe cel din a doua. Se formează astfel un câmp electric imprimat \vec{E}_i dirijat din-spre zona 1 spre zona 2 (Fig. 2.23).

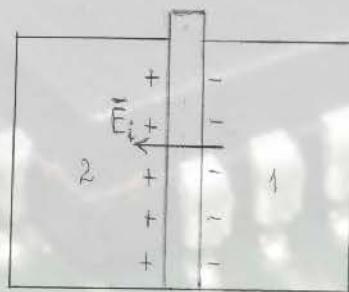


Fig.2.23

Câmpul imprimat termoelectric

Dacă se încălzește o bară conductoare în mod diferit la cele două capete ale sale ($T_1 > T_2$) (Fig. 2.24) electronii se deplasează din zona cu agitație termică mai mare de temperatură T_1 , spre extremitatea opusă de temperatură T_2 . Câmpul electric imprimat \bar{E}_i este dirijat în sensul opus deplasării electronilor.

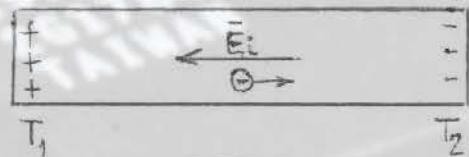


Fig.2.24