

INTRODUCERE

Pentru a studia natura și a utiliza fenomenele naturii în interesul lor, oamenii creează modele care reflectă (mai bine sau mai puțin bine) domeniile din natură. Deci, oamenii crează teorii privitoare la anumite domenii din natură.

Din nevoia de a facilita raționamentele din cadrul teoriilor, gândirea omenească a creat matematica, o știință abstractă, care operează cu concepte abstracte, nelegate de un anumit domeniu din natură. Dovedindu-și utilitatea, matematica s-a dezvoltat în sine ca știință, unele din rezultatele matematicii negăsind încă aplicabilitate în teoriile ce se referă la fenomenele din natură. Dacă conceptele unei teorii pot fi reflectate în concepte matematice, atunci se poate utiliza raționamentul matematic în cadrul teoriei. Uneori, se afirmă că o teorie este cu atât mai evoluată, cu cât este mai matematizată. În acest sens, este util ca proprietăților din natură să le asociem, reproductibil, elemente ale unor mulțimi matematice, adică să le măsurăm. Spunem că, în acest fel, proprietății din natură îi asociem o mărime fizică. De exemplu, o lungime poate fi măsurată stabilind de câte ori intră metrul etalon în acea lungime (măsurarea făcută de un vânzător de stofe). Astfel, asociem lungimilor (proprietate a corpurilor) mărimea fizică numită spațiu. Duratale ar putea fi măsurate prin unghiul făcut de o stea pe bolta cerească și definim astfel mărimea fizică numită timp. Dacă asociem un număr (notă) cunostințelor unui student, prin examinare, nu realizăm o procedură de măsurare, rezultatul nefiind, în general, reproductibil. În organizarea unei teorii, o parte din mărimile fizice, definite prin procedeul de măsurare, se numesc mărimi primitive, iar celelalte, care se pot defini cu ajutorul mărimilor primitive se numesc mărimi

derivate. Spațiul și timpul definite prin procedeul de măsurare propus mai sus sunt mărimi primitive. Viteza se poate defini prin relația $v = \frac{ds}{dt}$, fiind mărime derivată.

Între proprietățile din natură există legături. O parte dintre aceste legături, stabilite inductiv, în urma experimentelor, acceptate ca fiind valabile, sunt numite legi, axiome. Restul de legături pot fi deduse din legi, pe bază de raționamente, și sunt numite teoreme.

Legile și mărimile primitive dintr-o teorie depind de felul în care este organizată teoria. De exemplu, dacă viteza se introduce ca mărime primitivă, printr-un oarecare procedeu de măsurare, atunci relația $v = \frac{ds}{dt}$ devine lege. O teorie este cu atât mai bine organizată, cu cât are mai puține mărimi primitive și legi.

Pentru un anumit domeniu din natură, pot fi create mai multe teorii. De exemplu, pentru studiul fenomenelor mecanice, se poate utiliza mecanica clasică sau mecanica relativistă. Pentru aprecierea unei teorii, putem admite câteva criterii. Un criteriu important este dat de limitele de aplicare a teoriei. De exemplu, după acest criteriu, mecanica relativistă este mai bună decât mecanica clasică, deoarece unele afirmații din mecanica clasică nu sunt valabile în domeniul vitezelor apropiate de viteza luminii în vid. Alt criteriu este dat de efortul și de timpul necesar pentru obținerea rezultatelor utile în activitatea practică din domeniul din natură vizat. De exemplu, după acest al doilea criteriu, mecanica clasică este mai bună decât mecanica relativistă pentru studierea și proiectarea majorității instalațiilor mecanice din practică. Am mai putea spune că o teorie este mai bine organizată dacă numărul de mărimi primitive și de legi este mai mic. Totuși, pentru a învăța mai ușor o teorie, este util ca legile să fie mai apropiate de înțelegerea cititorului, fapt care poate influența organizarea teoriei.

Elaborarea unei teorii privind fenomenele electromagnetice a fost foarte dificilă, în special datorită faptului că acestea nu sunt direct accesibile simțurilor

omului (nu pot fi văzute, auzite, pipăite, mirosite sau gustate). Putem evalua doar efectele de natură mecanică, termică sau chimică ale câmpului electromagnetic. Aceste efecte, reproductibile, arată existența fenomenelor electromagnetice și, cu ajutorul lor, explorăm această nouă formă de existență a materiei și definim mărimile de natură electromagnetică.

Prima teorie coerentă privind fenomenele electromagnetice a fost dezvoltată de Maxwell în renumitul său tratat de electromagnetism. Ea nu este infirmată de experiment, dar, din păcate, teoria poate fi aplicată doar la medii imobile. Luarea în considerare a mediilor aflate în mișcare a pus problema sistemelor de referință necesare definirii mărimilor fizice din cadrul teoriei. Prima soluție, remarcabilă prin simplitate și pragmatism, este oferită de teoria Maxwell-Hertz, unde sistemele de referință sunt locale, atașate micii vecinătăți a punctului unde este definită mărimea fizică. Experimentele nu verifică această teorie în unele situații în care medii puternic polarizate electric se deplasează cu viteze mari. În dorința de a elimina acest inconvenient, teoria microscopică a lui Lorentz propune un sistem de referință universal, fixat pe un mediu ideal, fără vâscozitate, numit eter, prin care corpurile, formate din particule, se mișcă fără frecări. Eterul este suportul undelor electromagnetice. Mărimile macroscopice, accesibile măsurărilor, sunt definite prin mediarea mărimilor microscopice. Încercările de a determina viteza Pământului prin acest mediu au dat greș, sugerând independența vitezei luminii față de sistemul de referință. Electrodinamica relativistă revine oarecum la teoria Maxwell-Hertz, definind mărimile fizice în sistemele de referință atașate corpurilor în mișcare și postulând invarianța legilor fizicii în toate sistemele inerțiale. Precizând conceptul de simultaneitate, sunt deduse relațiile de transformare a mărimilor de la un sistem de referință inerțial la altul. Deși electrodinamica relativistă nu este încă infirmată de experiment, aplicarea ei la studiul mișcărilor neinerțiale este practic imposibilă. Definirea sistemelor local inerțiale presupune determinarea metricii spațiului. Analiza simplei rotații uniforme a unui cilindru în jurul axei este o problemă deosebit de dificilă. Evident, dacă vitezele corpurilor sunt comparabile cu viteza

luminii în vid, atunci doar electrodinamica relativistă oferă explicații coerente. Din fericire, aplicațiile din tehnică sunt însoțite de viteze mici în raport cu viteza luminii.

Acest curs are la bază teoria macroscopică Maxwell-Hertz, acceptată unanim ca fiind cea mai potrivită teorie pentru modelarea fenomenelor electromagnetice din tehnică, motiv pentru care este de multe ori numită electrotehnică.

Universitatea Politehnica București este institutia de învățământ tehnic superior care asigură o excelentă pregătire a viitorilor ingineri în principalele profiluri cerute de economie: electric, mecanic, chimic etc. Facultățile care formează inginerii din domeniul electric sunt: Facultatea de Electronică, Telecomunicații și Tehnologia Informației, Facultatea de Automatică și Calculatoare, Facultatea de Inginerie Electrică, Facultatea de Energetică și Facultatea de Transporturi – secția Telecomenzi și Electronică în Transporturi. La toate aceste facultăți se asigură pregătirea fundamentală a studenților în domeniul electric predându-se cursuri de Electrotehnică.

La Facultatea de Inginerie Electrică, studenții urmează un semestru, 3 ore pe săptămână, cursul de Bazele Electrotehnicii, unde este prezentată teoria macroscopică Maxwell-Hertz. Apoi sunt dezvoltate cele două principale părți ale acestei teorii, necesare în activitatea tehnică a viitorului inginer, prin cursurile: Teoria circuitelor electrice (TC) și Teoria câmpului electromagnetic (TCE). Trebuie subliniat faptul că fundamentele din TC rezultă din TCE, dar ordinea de predare se datorează pregătirii matematice a studenților. Din fericire, TC poate fi prezentată fără a demonstra “legile” ce stau la baza dezvoltării teoriei: elementul de circuit, relațiile lui Kirchhoff, puterea absorbită de elementul de circuit.

TCE este structurat in 6 parti:

Partea I. Legile Teoriei macroscopice Maxwell-Hertz. Principalele marimi.
Comportarea marimilor campului electromagnetic in vecinatatea suprafetelor.

Partea II. Electrostatica.

Partea III. Campul magnetic stationar.

Partea IV. Electrocinetica.

Partea V. Regimuri cvasistationare.

Partea VI. Regimul general variabil in medii immobile.

Recomandam studentilor sa foloseasca cursurile

/1/ I. F. Hăntilă, T. Leuca, și C. Ifrim, *Electrotehnica teoretică*, vol. 1.
București: Editura Electra, 2002,

/2/ . F.Hantila, M.Vasiliu, “*Campul electromagnetic variabil in timp*”, Editura
Electra, 2005, ISBN 973-7728-48-3

/3/ Aceste cursuri se gasesc si pe internet: <http://ferrari.lce.pub.ro/studenti>

In Anexele din /1/ sunt recapitulate principalele elemente de algebra si analiza vectoriala, integrale pe varietati, derivate substantiale. Avand in vedere ca ca TCE foloseste frecvent notiunile de mai sus, este necesar ca studentul sa le cunoasca. **Recomandam citirea acestor Anexe.**

Examenul: scris, partial si final. La fiecare examen se for da subiecte de teorie si probleme. La partial, unul din subiectele de teorie este din capitolul legilor.

Punctare: 20p act in timpul anului, 40p partial, 40p final.

PARTEA I

Legile Teoriei macroscopice Maxwell-Hertz.

(Recapitulare?) Comportarea marimilor campului electromagnetic in vecinatatea suprafetelor.

Cursul de Bazele electrotehnicii a inceput cu prezentarea unor fenomene de natura electromagnetica, care au permis imaginarea unor proceduri prin care sa fie introduce principalele marimi ale teoriei macroscopice Maxwell-Hertz. Au fost prezentate si legile teoriei. Organizarea relatiilor verificate de marimile campului electromagnetic in legi si teoreme nu este unica. Ea poate sa depinda de preferintele celor care predau cursul. Din acest motiv si din cauza importantei cunoasterii legilor electromagnetismului, fundamentale pentru prezentarile din acest curs, consideram ca este necesar sa recapitulam legile teoriei macroscopice Maxwell-Hertz. Vor fi repetate si principalele marimi ale campului electromagnetic.

1. Marimi de natura electrica

1.1. Câmpul electric în vid. Intensitatea câmpului electric în vid

Dacă pieptănăm firele de păr uscat cu un pieptene de ebonită, se constată că între firele de păr, ca și între pieptene și firele de păr, apar forțe care nu sunt de natură inerțială sau gravitațională. Spunem că sunt de natură electrică, iar despre pieptene și firele de păr spunem că sunt electrizate. Spunem că orice alt obiect este electrizat, dacă asupra lui se exercită forțe de natură electrică, când este pus în vecinătatea pieptenului electrizat.

Numim corp de probă un obiect electrizat, de formă sferică, arbitrar de mic și metalizat. Există puncte din spațiu, de exemplu în vecinătatea firelor de păr, unde asupra corpului de probă se exercită forțe de natură electrică. Spunem că, în acele puncte, există câmp electric. Pentru a asocia o mărime fizică proprietății spațiului de a avea câmp electric, imaginăm următorul procedeu de măsurare. Într-un punct P_0 din spațiu (Fig. 1.1), cu câmp electric, numit punctul cu câmp electric de referință, se introduce corpul de probă și asupra lui se exercită forța F_0 . În punctul P în care vrem să măsurăm câmpul electric, asupra aceluiași corp de probă, se exercită forța F .

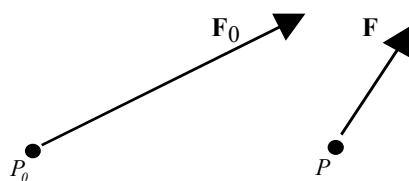


Fig. 1.1. Măsurarea intensității câmpului electric în vid.

Mărimea ce caracterizează câmpul electric din punctul P are valoarea:

$$\mathbf{E}_v = \frac{\mathbf{F}}{F_0} E_{0v} \quad (1.1)$$

și se numește intensitatea câmpului electric în vid. Intensitatea câmpului electric de referință, în vidul din punctul P_0 , notată cu E_{0v} , depinde de sistemul de unități ales. Intensitatea câmpului electric în vid \mathbf{E}_v este o mărime vectorială, ca și forța \mathbf{F} , și este mărime primitivă, deoarece a fost introdusă printr-un procedeu de măsurare.

În sistemul de unități internațional (S.I.), unitatea de măsură pentru \mathbf{E}_v este voltul/metru (V/m).

1.2. Sarcina electrică q

Să imaginăm acum un procedeu de măsurare a stării de electrizare. Fie un punct din spațiu P în vecinătatea căruia avem câmp electric uniform de intensitate E_v . Dacă punem în punctul P diferite corpuri electrizate, constatăm că asupra lor se exercită diferite forțe, toate având orientarea intensității câmpului electric. Putem scrie:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E}_v \quad (1.2)$$

unde q este o constantă care depinde de corpul electrizat ce se introduce în câmp electric și nu de valoarea lui E_v , adică, introducând același corp electrizat în alt punct cu câmp electric, relația (1.2) rămâne valabilă. Admitem că electrizarea corpului este cu atât mai puternică, cu cât forța \mathbf{F} este mai mare, deci q poate fi mărimea fizică ce caracterizează starea de electrizare.

În S.I., unitatea de măsură pentru sarcina electrică este Coulomb-ul (C). Deoarece 1C este o sarcină electrică foarte mare, în practică se folosesc submultipli ai C:

<i>mili...</i>	(m...)	10^{-3}
<i>micro...</i>	(μ ...)	10^{-6}
<i>nano...</i>	(n...)	10^{-9}
<i>pico...</i>	(p...)	10^{-12}

Observatie. Procedura de explorarea a campului electric este usor de inteles daca observam marea asemanare cu campul gravitacional, cu forta gravitacionala si cu masa inertiala. Fie o mica bila metalica pe care o punem in diferite puncte din spatiu (vid). Constatam ca asupra ei se exercita forte si spunem ca sunt forte gravitationale, iar in punctual in care aper aceste forte, spunem ca avem camp

gravitational. Dacă alegem un punct P_0 din spațiu (Fig. 1.1), cu câmp gravitational, numit punctul cu câmp gravitational de referință, se introduce mica bila în acel punct și asupra lui se exercită forța \mathbf{F}_0 . În punctul P în care vrem să măsurăm câmpul gravitational, asupra aceluiași corp de probă, se exercită forța \mathbf{F} . Mărimea ce caracterizează câmpul gravitational din punctul P are valoarea:

$$\mathbf{\Gamma}_v = \frac{\mathbf{F}}{F_0} \mathbf{\Gamma}_{0v} \quad (1.1g)$$

și se numește intensitatea câmpului gravitational. Intensitatea câmpului gravitational de referință, din punctul P_0 , notată cu $\mathbf{\Gamma}_{0v}$, depinde de sistemul de unități ales. Intensitatea câmpului gravitational în vid $\mathbf{\Gamma}_v$ este o mărime vectorială, ca și forța \mathbf{F} , și este mărime primitivă, deoarece a fost introdusă printr-un procedeu de măsurare.

Fie un punct din spațiu P în vecinătatea căruia avem câmp gravitational de $\mathbf{\Gamma}_v$. Dacă punem în punctul P diferite corpuri (bile), constatăm că asupra lor se exercită diferite forțe, toate având orientarea câmpului gravitational. Putem scrie:

$$\mathbf{F} = m \mathbf{\Gamma}_v \quad (1.2g)$$

unde m este o constantă care depinde de corpul ce se introduce câmp gravitational și nu de valoarea lui $\mathbf{\Gamma}_v$, adică, introducând același corp electricizat în alt punct cu câmp gravitational, relația (1.2g) rămâne valabilă.

Densitatea de volum a sarcinii electrice. Pentru a cerceta dacă sarcina electrică admite distribuție volumică într-un punct P , facem limita:

$$\rho_v = \lim_{v(\omega) \rightarrow 0} \frac{q(\omega)}{v(\omega)} \quad (1.3)$$

unde ω este un mic domeniu suficient de regulat ce conține punctul P , iar $v(\omega)$ este volumul domeniului ω (Fig.1.2). Dacă limita există, spunem că, în punctul P ,

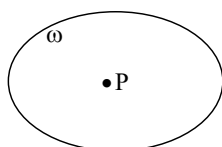


Fig.1.2. Densitatea de volum a sarcinii electrice.

densitatea de volum a sarcinii electrice este ρ_v . Fie un domeniu Ω în interiorul căruia sarcina electrică este distribuită cu densitate de volum ρ_v (Fig. 1.3). Împărțim domeniul Ω în mici subdomenii de volume Δv_k în care sarcina electrică este $\Delta q_k \cong \rho_{vk} \Delta v_k$, unde ρ_{vk} este

densitatea de volum a sarcinii electrice într-un punct al subdomeniului. Sarcina electrică a întregului domeniu Ω rezultă prin însumarea sarcinilor subdomeniilor:

$$q_\Omega = \sum_k \Delta q_k = \sum_k \rho_{vk} \Delta v_k \quad (1.4)$$

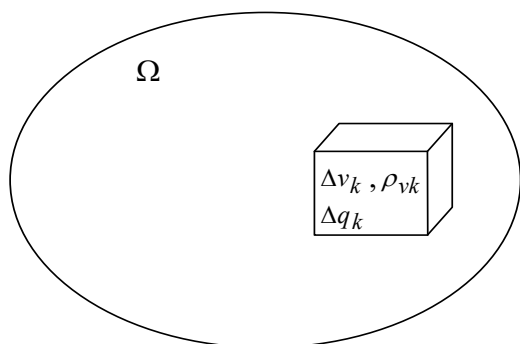


Fig.1.3. Sarcina electrică a unui domeniu.

Când dimensiunile subdomeniilor sunt arbitrar de mici, limita sumei (1.4), dacă există, ea este:

$$q_\Omega = \int_{\Omega} \rho_v dv \quad (1.5)$$

Dacă facem o analogie între masa inerțială și sarcina electrică a unui domeniu, atunci densitatea de sarcină electrică este analoagă cu densitatea de masă.

Densitatea de suprafață a sarcinii electrice. Pentru a cerceta dacă sarcina electrică admite distribuție de suprafață într-un punct P al unei suprafețe S , facem limita (Fig 1.4):

$$\rho_S = \lim_{s(\sigma) \rightarrow 0} \frac{q(\sigma)}{s(\sigma)} \quad (1.6)$$

unde $\sigma \subset S$ este o mică suprafață ce conține punctul $P \in S$, $s(\sigma)$ este aria suprafeței σ . Dacă limita există, spunem că, în punctul P de pe suprafața S , sarcina

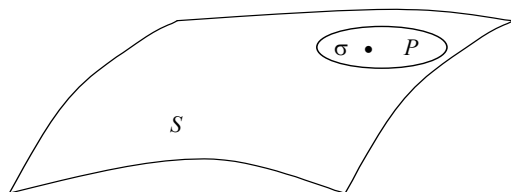


Fig. 1.4. Densitatea de suprafață a sarcinii electrice.

electrică este distribuită superficial, cu densitatea de suprafață ρ_S . Fie o suprafață S pe care sarcina electrică este distribuită cu densitate de suprafață ρ_S .

Împărțim suprafața S în mici suprafețe de arii Δs_k în care sarcina electrică este

$$\Delta q_k \cong \rho_{Sk} \Delta s_k, \quad \text{unde } \rho_{Sk} \text{ este}$$

densitatea de suprafață a sarcinii electrice într-un punct al micii suprafețe. Sarcina electrică a întregii suprafețe S rezultă prin însumarea sarcinilor micilor suprafețe:

$$q_S = \sum_k \Delta q_k = \sum_k \rho_{Sk} \Delta s_k$$

Când dimensiunile micilor suprafețe tind către zero, limita sumei de mai sus, dacă există, ea este:

$$q_S = \int_S \rho_S ds \quad (1.7)$$

Densitatea de suprafață a sarcinii electrice este analoagă cu densitatea de suprafață a masei pentru o tablă de grosime neglijabilă (masa unui metru pătrat pentru o tablă omogenă). Spre deosebire de tabla de grosime neglijabilă, care este o idealizare, suprafețele încărcate cu sarcină electrică există, de exemplu, pe suprafețele corpurilor conductoare.

Densitatea de linie (lineică) a sarcinii electrice. Pentru a cerceta dacă sarcina electrică admite distribuție lineică într-un punct P de pe curba C , facem limita:

$$\rho_l = \lim_{l(\lambda) \rightarrow 0} \frac{q(\lambda)}{l(\lambda)} \quad (1.8)$$

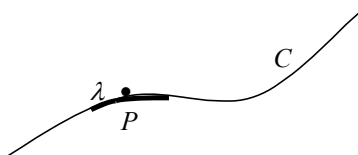


Fig. 1.5. Densitatea lineică de sarcină electrică.

unde λ este o mică porțiune de pe curba C care conține punctul P , iar $l(\lambda)$ este lungimea micii porțiuni (Fig.1.5). Dacă limita există, spunem, că în punctul P , densitatea de linie (lineică) a sarcinii electrice este ρ_l . Analog cu relațiile (1.5), (1.7), sarcina electrică pe curba C este:

$$q_C = \int_C \rho_l dl \quad (1.9)$$

Densitatea lineică de sarcină ρ_l este analoagă cu densitatea lineică de masă a unei sârme de grosime neglijabilă (masa unui metru de sârmă în cazul unei sârme omogene).

Observații: a) Din punct de vedere fizic, distribuțiile de volum și suprafață ale sarcinii electrice pot exista, în timp ce distribuțiile lineice (pe curbe) și punctuale nu există, ele necesitând o energie infinită pentru a le crea. Totuși, ultimele două distribuții pot fi deseori utile pentru a modela sarcini electrice de pe corpuri ale căror dimensiuni sunt mult mai mici decât celelalte dimensiuni ale domeniului în care studiem câmpul electric.

b) Definițiile de mai sus ale densităților de sarcină electrică sunt lipsite de rigurozitate. De exemplu, în cazul densității de volum, admitem că putem

determina sarcina electrică a unui mic subdomeniu ω care poate face parte dintr-un corp. Ținând cont de modul în care a fost definită sarcina electrică, ar trebui ca acolo unde se află micul subdomeniu să avem un câmp uniform, măsurabil. Dar măsurătoarea presupune înlăturarea micului subdomeniu, fapt care poate duce la modificarea câmpului electric. Apoi, având micul subdomeniu la locul lui, cum putem măsura forța? Trebuie să precizăm totuși faptul că sarcina electrică și densitățile de sarcină pot fi introduse în mod riguros admitând legea fluxului electric ca relație de definire (par. 1.8). Sarcina electrică apare astfel ca o sursă a unui câmp de vectori. Am preferat modul adoptat mai sus pentru analogia sa cu masa inerțială, care permite o înțelegere mai ușoară a sensului fizic al sarcinii electrice.

c) Analogia densitatilor de sarcina electrica cu densitatile de masa este interesanta.