

PETRE-MARIAN NICOLAE
MARIAN-ŞTEFAN NICOLAE

**PETRE-MARIAN NICOLAE
MARIAN-ȘTEFAN NICOLAE**

TEORIA CIRCUITELOR ELECTRICE



**Editura UNIVERSITARIA
Craiova, 2020**

Referenți științifici:
Prof.dr.ing. Mandache Lucian
Prof.dr.ing. Enache Sorin

Copyright © 2020 Editura Universitaria
Toate drepturile sunt rezervate Editurii Universitaria

Descrierea CIP a Bibliotecii Naționale a României
NICOLAE, PETRE-MARIAN

Teoria circuitelor electrice / Petre-Marian Nicolae, Marian-Ștefan Nicolae. - Craiova : Universitaria, 2020
Conține bibliografie
ISBN 978-606-14-1653-0

I. Nicolae, Marian-Ștefan

621.374

© 2020 by Editura Universitaria

Această carte este protejată prin copyright. Reproducerea integrală sau parțială, multiplicarea prin orice mijloace și sub orice formă, cum ar fi xeroxarea, scanarea, transpunerea în format electronic sau audio, punerea la dispoziția publică, inclusiv prin internet sau prin rețelele de calculatoare, stocarea permanentă sau temporară pe dispozitive sau sisteme cu posibilitatea recuperării informațiilor, cu scop comercial sau gratuit, precum și alte fapte similare săvârșite fără permisiunea scrisă a deținătorului copyrightului reprezintă o încălcare a legislației cu privire la protecția proprietății intelectuale și se pedepsesc penal și/sau civil în conformitate cu legile în vigoare.

1. Noțiuni introductive privind circuitele electrice

1.1. Circuitele electrice și clasificarea lor

Sarcina elementară a electronului este $e = -1,602176565(35) \times 10^{-19}$ C, fiind o constantă fizică universală. Sarcina electronului va fi întotdeauna negativă [21].

Prin definiție, curentul electric reprezintă deplasarea ordonată (dirijată) a purtătorilor de sarcină electrică (a electronilor) [22]. Considerăm ca sens pozitiv sensul de deplasare al “golurilor” (sarcinilor pozitive), opus sensului real de deplasare al electronilor printr-un conductor.

Curentul electric nu are punct de plecare sau de sosire, ci circulă obligatoriu pe trasee conductoare închise care trec prin sursele de alimentare. De-a lungul unui traseu conductor neramificat, intensitatea curentului electric rămâne nemodificată.

Un circuit electric este un traseu prin care se mișcă electronii de la o sursă de tensiune sau curent. Deoarece curentul electric circulă doar pe trasee închise, putem considera că un circuit electric este o cale de curent închisă.

Sarcinile electrice în mișcare pot fi purtate între două puncte date de electroni, ioni sau o combinație de ioni și electroni. Producerea și menținerea curentului electric este determinată de existența unei tensiuni electrice între cele două puncte (între care se deplasează sarcinile) ale unui conductor electric.

Prin circuit electric se înțelege ansamblul mediilor prin care poate circula curentul electric. Prin mediile conductoare și semiconductoare circulă curentul electric de conducție, iar prin mediile dielectrice numai curentul de deplasare [17].

Circuitele electrice sunt părți componente esențiale ale unor importante și variate sisteme tehnice, din diverse domenii (sisteme de acționare, electronică, instalații de automatizare și poziționare, protecții, roboți industriali, etc) [23]. Prin stabilirea unor curenți electrice după anumite trasee, circuitele electrice asigură implicit apariția și desfășurarea fenomenelor electromagnetice necesare obținerii efectelor utile dorite în cadrul sistemelor respective.

Un circuit electric este constituit, în general, din elemente de circuit.

Acestea sunt [24]:

- sursele de energie electrică. Acestea transformă, printr-un proces oarecare, o energie neelectrică în energie electrică;
- consumatorii de energie electrică. Aceștia transformă energia electrică primită într-o energie neelectrică;

- conductoarele electrice care transportă energie electrică de la sursă la consumator;
- aparatele electrice, destinate comenzii, protecției, controlului, reglajului și semnalizării funcționării circuitelor electrice. Aparatele electrice nu sunt nici surse de energie electrică și nici consumatoare de energie electrică (consumul propriu de energie electrică este neglijabil) [25].

Elementele componente ale unui circuit electric se clasifică obișnuit în elemente active și elemente pasive. Elementele active sunt reprezentate de sursele de energie, iar principalele elemente pasive sunt: rezistorul, bobina și condensatorul. Parametrii prin care se caracterizează elementele de circuit pasive sunt: rezistența (R); inductivitatea proprie (L) și inductivitatea mutuală (L_{jk}); capacitatea (C). Un ansamblu de circuite electrice conectate între ele într-un mod oarecare constituie o *rețea electrică*. Se mai poate aminti că termenul de rețea electrică este folosit frecvent în electroenergetică și pentru a exprima ansamblul instalațiilor electrice care intervin la transportul și distribuția energiei electrice.

Din punct de vedere al variației în timp, în linii mari, tensiunile și curenții se pot clasifica în *mărimi periodice* și *neperiodice*, în fiecare caz existând forme de variație în timp din cele mai diferite. Dintre mărimile periodice, de o largă răspândire și totodată importanță în toate domeniile electrotehnicii sunt mărimile sinusoidale. O formă caracteristică, întâlnită în special în telecomunicații, o constituie semnalele modulate.

Cu această ocazie se poate menționa faptul că mărimile (tensiuni, curenți) aplicate din exterior de la surse de energie se numesc și *mărimi de excitație* sau *semnale*, iar ceea ce rezultă (tensiuni, curenți) în circuit, respectiv la ieșirea acestuia, se numește *răspuns*; această terminologie este întâlnită mai ales în automatizări și electronică.

În anumite condiții, studiul circuitelor electrice se poate face relativ simplu, rezultând metode caracteristice de rezolvare. În cadrul acestor metode specifice teoriei circuitelor electrice se lucrează cu mărimi globale (*tensiuni, curenți și parametri de circuit*), ce pot fi relativ ușor definite și măsurate.

Posibilitatea de a considera parametri concentrați depinde de dimensiunile liniare ale circuitului și de frecvență. Într-un regim variabil, în anumite condiții (la frecvențe foarte înalte, chiar la circuite de lungime relativ mică), se pot manifesta în circuit anumite efecte caracteristice propagării undelor electromagnetice de-a lungul circuitului, cu viteza v_u (în vid, $v_{u0} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$). Astfel, este posibil ca la un circuit de tip serie, datorită fenomenului de propagare, curentul în diferite secțiuni de-a lungul circuitului să nu aibă la un moment dat aceeași valoare. Pentru a putea considera parametri unui circuit concentrați, este necesar ca aceste aspecte ale fenomenelor de propagare să nu se manifeste. Condiția necesară în acest scop

este ca *timpul de propagare al undelor electromagnetice* de-a lungul circuitului să fie destul de mic, pentru ca în intervalul respectiv de timp variația mărimilor (curenți, tensiuni) din circuit să fie neglijabilă. Referindu-ne la mărimi sinusoidale și notând cu t' acest timp, respectiv cu $T=1/f$ perioada, condiția menționată este $t' \ll T$. Dacă se notează cu l lungimea circuitului și cu λ lungimea de undă corespunzătoare frecvenței din circuit ($\lambda = v_u / f$), condiția analizată se poate scrie și sub forma:

$$1 \ll \lambda = \frac{v_u}{f} \quad (1.1)$$

Circuitele la care parametrii nu pot fi considerați concentrați se numesc *circuite cu parametri repartizați*. Un exemplu tipic de astfel de circuite îl constituie liniile electrice lungi (în electroenergetică și în telecomunicații). Teoretic, în acest caz, parametrii se consideră concentrați pentru elemente infinitezimale de conductor - practic pentru lungimi ce satisfac relația (1).

Din relația (1) rezultă faptul că, ***pe măsură ce frecvența este mărită***, lungimea circuitelor pentru care se pot considera parametrii concentrați este mai mică. Pentru orientare, ne referim la unele exemple:

- o linie electrică având lungimea de 2 km, la 50 Hz, poate fi studiată practic ca un circuit cu parametri concentrați ($\lambda \simeq 6.000$ km); la o frecvență mai înaltă, de exemplu la 100 kHz, aceeași linie trebuie studiată însă ca un circuit cu parametri repartizați ($\lambda \simeq 3$ km);

- un transformator electric, care funcționează în regim permanent la 50 Hz, poate fi considerat cu parametri concentrați; dacă se studiază însă comportarea transformatorului de exemplu la unde de șoc, având componente de înaltă frecvență, el trebuie considerat cu parametri repartizați.

O altă ipoteză uzuală în teoria circuitelor electrice se referă la *caracterul filiform al conductoarelor* unui circuit. În regim variabil, un conductor se consideră filiform dacă este suficient de subțire pentru ca ***densitatea de curent (și implicit intensitatea câmpului electric) să poată fi considerată uniform repartizată în secțiunea acestuia***, ceea ce presupune de fapt neglijarea efectului pelicular. Notând cu a dimensiunea liniară a conductorului și cu δ adâncimea de pătrundere, condiția ca un conductor să poată fi considerat filiform se scrie sub forma:

$$a \ll \lambda = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot f \cdot \delta \cdot \mu}} \quad (1.2)$$

1.2. Regimurile de funcționare ale circuitelor electrice

După natura funcțiilor care exprimă valorile instantanee ale tensiunilor și intensităților curenților ca funcții de timp, regimurile de funcționare se clasifică în:

- a) Regim de *curent continuu* (c.c.) în care intensitățile curenților, tensiunile, potențialele electrice și mărimile de excitație sunt **constante** în timp;
- b) Regimuri *periodice*, în care intensitățile curenților, tensiunile, potențialele electrice și mărimile de excitație sunt funcții **periodice** în timp;
- c) Regimul *variabil*, în care intensitățile curenților, tensiunile, potențialele electrice și mărimile de excitație sunt funcții **oarecare** de timp.

Regimurile variabile prin care se face trecerea de la unele regimuri de c.c. sau regimuri periodice la alte regimuri de c.c. sau periodice se numesc **regimuri tranzitorii** (durata lor fiind în cazurile uzuale relativ redusă).

Se numește regim electrocinetic staționar regimul circuitelor electrice parcurse de curent de conducție continuu, caracterizate local prin legea conducției electrice:

$$\vec{E} + \vec{E}_i = \rho \cdot \vec{J} \quad (1.3)$$

Regimul electrocinetic staționar - numit, în mod obișnuit, regimul circuitelor electrice de curent continuu (c.c.) - se caracterizează prin următoarele aspecte:

- conductoarele sunt parcurse de curenți staționari (densitatea de curent \vec{J} are aceeași valoare în fiecare punct al unui conductor aflat în regim de conducție);
- au loc schimburi energetice cu exteriorul;
- conductoarele sunt omogene, neaccelerate sau accelerate (cazul mașinilor rotative de c.c.).

Spre deosebire de regimul electrostatic, caracterizat prin condiția de echilibru electrostatic, $\vec{E} + \vec{E}_i = 0$, în cazul regimului electrocinetic staționar această relație nu mai este respectată, datorită circulației curenților electrici.

1.3. Aproximațiile teoriei circuitelor electrice

În teoria circuitelor electrice aflate în regim cvasistaționar (în care mărimile de stare ale câmpului electromagnetic au o variație suficient de lentă pentru ca peste tot, cu excepția dielectricului condensatoarelor, să se poată neglija curentul electric de deplasare) se folosesc legile electromagnetismului, anumite

forme particulare ale lor sau anumite consecințe ale lor. Aceste legi sunt exprimate cu ajutorul mărimilor de circuit: *tensiunea electrică* u , *tensiunea electromotoare* e , *curentul* i , *sarcina* q , *fluxul magnetic* Φ etc. Cele mai importante dintre aceste relații sunt următoarele [12], [19]:

a) *Legea inducției electromagnetice*. Tensiunea electromotoare indusă în lungul unei curbe închise Γ este egală cu viteza de scădere a fluxului magnetic prin orice suprafață S_Γ sprijinită pe această curbă:

$$\oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot d\vec{l} = e_\Gamma = - \frac{d\Phi_{S_\Gamma}}{dt} \quad (1.4)$$

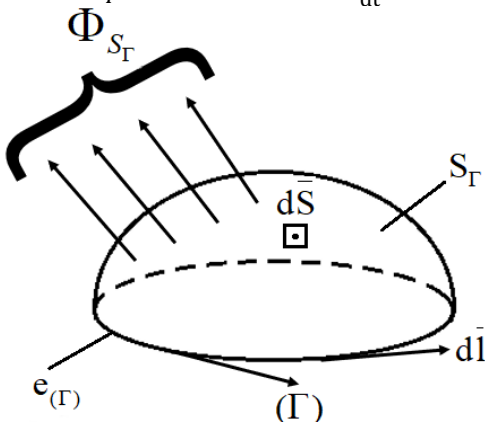


Fig. 1.1. Explicativă a legii inducției electromagnetice

b) *Legea conducției electrice (Ohm)*. Se consideră o porțiune a unui conductor între punctele A și C. Această porțiune este delimitată de două suprafețe, S_1 și S_2 , plasate perpendicular pe direcția firului (fig. 1.2). Ne deplasăm de-a lungul axei mediane a conductorului între cele două puncte. Forma locală a legii conducției electrice este valabilă în fiecare punct din interiorul conductorului:

$$\vec{E} + \vec{E}_i = \rho \cdot \vec{J} \quad (1.5)$$

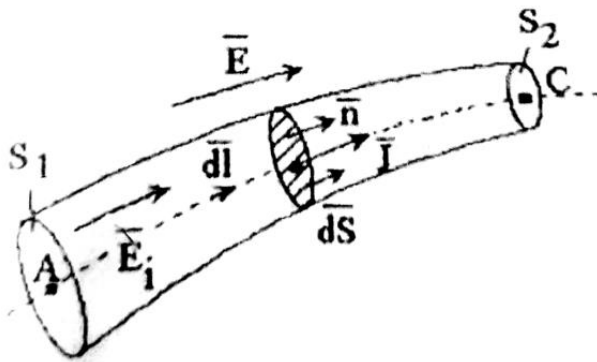


Fig. 1.2. Porțiune a unui conductor electric

Pentru un conductor filiform (cu aria secțiunii neglijabilă în raport cu lungimea acestuia), prin integrare între punctele A și C, obținem:

$$\int_{(AC)} (\vec{E} + \vec{E}_i) \cdot d\vec{l} = \int_{(AC)} \rho \cdot \vec{J} \cdot d\vec{l} \quad (1.6)$$

Definim:

(i) Tensiunea electrică (sau tensiunea) între două puncte A și C ca integrala de linie a vectorului intensitate a câmpului electric \vec{E} :

$$u_{(AC)} = \int_{(AC)} \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (1.7)$$

unde \vec{E} este integrat de-a lungul căii (AC) între două suprafețe echipotențiale.

În general, *tensiunea electrică depinde de calea aleasă pentru integrare.*

(ii) Tensiunea electromotoare corespunzătoare unei porțiuni neomogene a unui conductor:

$$e_{(AC)} = \int_{(AC)} \vec{E}_i \cdot d\vec{l} \quad (1.8)$$

(iii) Rezistența electrică a unei porțiuni a unui conductor (AC):

$$R = \int_{(AC)} \rho \cdot \frac{dl}{S} = \frac{\rho}{S} \cdot \int_{(AC)} dl = \frac{\rho \cdot l_{(AC)}}{S} \quad (1.9)$$

$$[u]_{SI} = 1[V]; [e]_{SI} = 1[V]; [R]_{SI} = 1[\Omega].$$

Ținând seama de (9) și de faptul că, pentru o secțiune transversală constantă a porțiunii de circuit, $J=i/S$, obținem:

$$u_R = \int_{(AC)} \rho \cdot \vec{J} \cdot d\vec{l} = \int_{(AC)} \rho \cdot J \cdot dl = \int_{(AC)} \rho \cdot \frac{i}{S} \cdot dl = i \cdot \int_{(AC)} \rho \cdot \frac{dl}{S} = R \cdot i \quad (1.10)$$

Înlocuind (7) și (8) în (6):

$$\int_{(AC)} (\vec{E} + \vec{E}_i) \cdot d\vec{l} = \int_{(AC)} \vec{E} \cdot d\vec{l} + \int_{(AC)} \vec{E}_i \cdot d\vec{l} = u_{(AC)} + e_{(AC)} \quad (1.11)$$

așadar, din (10) și (11) rezultă:

$$u_{(AC)} + e_{(AC)} = R \cdot i \quad (1.12)$$

Ecuția (11) reprezintă forma integrală a legii conducției electrice (legea lui Ohm), și se poate obține pentru latura de circuit din fig. 1.3.

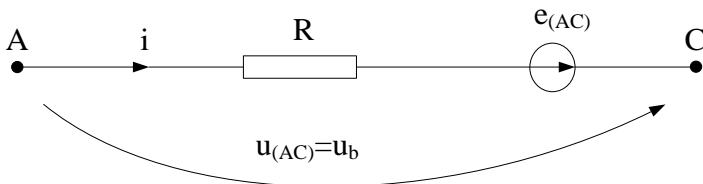


Fig. 1.3. Regula de asociere curent-tensiune de la receptoare

$u_{(AC)}$ se mai numește și „diferență de potențial între borne” sau „tensiune la borne”- u_b , iar $R \cdot i$ se numește „cădere de tensiune”.

Regula de asociere curent-tensiune din fig. 1.3 este utilizată pentru receptoare (u și i pornesc din același punct).

Dacă tensiunea la borne are sens invers, adică

$$u_{(AC)} = -u_b, \quad (1.13)$$

regula de asociere curent-tensiune este cea de la generatoare (fig. 1.4).

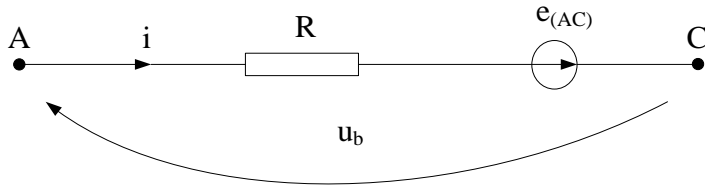


Fig. 1.4. Regula de asociere curent-tensiune de la generatoare

$$-u_b + e_{(AC)} = R \cdot i \quad (1.14)$$

sau:

$$u_b = e - R \cdot i \quad (1.15)$$

c) *Teorema continuității curentului electric de conducție.* În regim cvasistaționar intensitatea totală a curentului electric printr-o suprafață închisă Σ , care nu străbate dielectricul unui condensator, este nulă:

$$\iint_{\Sigma} \vec{J} \cdot d\vec{S} = i_{\Sigma} = 0 \quad (1.16)$$

În regim electrocinetic staționar liniile de curent (numite și liniile câmpului vectorial al densității de curent) se conservă în cazul unui tub de curent, adică liniile care intră în tub sunt egale cu cele care ies din tub.

d) *Legea conservării sarcinii electrice.* Intensitatea i a curentului electric de conducție care intră (iese) în suprafața închisă Σ , ce conține armătura unui condensator electric, este egală cu viteza de creștere (scădere) a sarcinii q a acestei armături:

$$i = \pm \frac{dq}{dt} \quad (1.17)$$

Semnul (+) corespunde cazului când sensul de referință al curentului intră în armătura de sarcină q , iar semnul (-) cazul contrar. De data aceasta, curentul de deplasare care trece prin dielectricul condensatorului, $i = d\Phi/dt = \pm dq/dt$ nu mai poate fi neglijat, fiind egal cu curentul de conducție ce alimentează condensatorul.

e) *Teorema capacității electrostatice*. Raportul dintre sarcina q a armăturii unui condensator și tensiunea electrică u_C dintre această armătură și cealaltă de sarcină $-q$ este o mărime de material numită capacitate electrostatică:

$$C = \frac{q}{u_C} > 0, \quad (1.18)$$

independentă de mărimea sarcinii q (deci și de tensiunea u_C) pentru dielectricii liniari, și determinată de configurația geometrică a condensatorului și de natura dielectricului.

f) *Teorema inductivității*. Raportul dintre fluxul Φ_{rs} (produs de curentul circuitului s prin conturul circuitului filiform r) și curentul i_s care produce acest flux este o mărime de material numită inductivitate (sau inductanță):

$$L_{rs} = \frac{\Phi_{rs}}{i_s} = L_{sr} \quad (1.19)$$

independentă de mărimea fluxului Φ_{rs} (deci a curentului i_s) pentru material magnetic liniar și determinată de configurația geometrică a sistemului de circuite și de natura materialelor învecinate. Relația (1.19) definește *inductivitatea proprie* dacă $r=s$:

$$L_{rr} = L_r = \frac{\Phi_{rr}}{i_r} > 0 \quad (1.20)$$

și *inductivitatea mutuală* dacă $r \neq s$. În cazul a n circuite filiforme situate într-un mediu liniar din punct de vedere magnetic, fluxul rezultat Φ_r , produs de toate circuitele prin conturul circuitului r , este suma fluxurilor produse de fiecare în parte:

$$\Phi_r = \sum_{s=1}^n \Phi_{rs} = \sum_{s=1}^n L_{rs} \cdot i_s \quad (r=1,2,\dots,n) \quad (1.21)$$

Acestea sunt relațiile lui Maxwell referitoare la inductivități.

g) *Teorema energiei magnetice*. Energia acumulată în câmpul magnetic al unui sistem de n circuite situate într-un mediu magnetic liniar este:

$$W^{(m)} = \sum_{s=1}^n \frac{1}{2} \cdot \Phi_s \cdot i_s = \sum_{s=1}^n \sum_{r=1}^n \frac{1}{2} L_{rs} \cdot i_r \cdot i_s \quad (r=1,2,\dots,n) \quad (1.22)$$

Fiecare dintre termenii cu indici egali ai acestei sume

$$W_{rr}^{(m)} = \frac{1}{2} \cdot \Phi_r \cdot i_r = \frac{1}{2} L_{rr} \cdot i_r^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Phi_r^2}{L_{rr}} \quad (1.23)$$

este energia magnetică proprie a circuitului r , iar fiecare pereche de termeni cu indici distincți

$$W_{rs}^{(m)} = \frac{L_{rs} \cdot i_r \cdot i_s + L_{sr} \cdot i_s \cdot i_r}{2} = L_{rs} \cdot i_r \cdot i_s = \Phi_{rs} \cdot i_r = \Phi_{sr} \cdot i_s \quad (1.24)$$

este energia magnetică de interacțiune a circuitelor r și s .

i) *Legea transferului energiei în conductori*. Puterea disipată sub formă de energie într-un conductor de rezistență R străbătut de curentul i este

$$p_R = R \cdot i^2 > 0 \text{ (legea Joule-Lenz),}$$

iar puterea cedată circuitului de un generator

$$p_g = e_g \cdot i \text{ (>0 sau <0)}$$

dacă sensurile de referință ale mărimilor e_g și i coincid (puterea cedată negativă este efectiv preluată din circuit).

j) *Teorema transferului de putere la borne*. Puterea p_b primită instantaneu pe la borne de o rețea cu N borne de acces, ale cărei laturi nu sunt cuplate magnetic cu exteriorul, este egală cu suma produselor dintre potențialele instantanee v_c ale bornelor și curenții $i_c^{(ex)}$ absorbiți din exterior

$$p_b = \sum_{c=1}^n v_c \cdot i_c^{(ex)} \quad (1.25)$$

Într-adevăr, dacă Σ este o suprafață închisă care conține rețeaua, intersectând cele N borne, puterea primită din exterior este egală (conform teoremei energiei electromagnetice) cu fluxul vectorului Poynting prin acea suprafață

$$p_b = p_\Sigma = \iint_{\Sigma} (\bar{E} \cdot \bar{H}) \cdot d\bar{A}_{int} \quad (1.26)$$

(calculul se face cu normala interioară pentru a obține puterea primită). Dacă rețeaua nu are laturi cuplate inductiv cu exteriorul, câmpul electric indus este neglijabil în punctele suprafeței Σ și se poate considera $\bar{E} = -grad(v)$. Cu $rot \bar{H} = \bar{J}$ (regim cvasistaționar) se obține

$$\begin{aligned} p_b = - \iint_{\Sigma} [grad(v) \cdot \bar{H}] \cdot d\bar{A}_{int} &= - \iint_{\Sigma} [rot(v\bar{H}) - v \cdot rot(\bar{H})] \cdot d\bar{A}_{int} \Rightarrow \\ &\Rightarrow p_b = \iint_{\Sigma} v \cdot \bar{J} \cdot d\bar{A}_{int} \end{aligned} \quad (1.27)$$

deoarece fluxul unui rotor printr-o suprafață închisă este identic nul ($div \text{ rot} \equiv 0 \Rightarrow rot(v\bar{H}) = 0$).

Ultima integrală are integrandul nul în punctele din dielectric, iar în dreptul fiecărei borne:

$$\iint v \cdot \bar{J} \cdot d\bar{A}_{int} = v \cdot \iint \bar{J} \cdot d\bar{A}_{int} = v \cdot i^{(ex)}.$$

Se obține deci relația (1.25).

În particular, în cazul unei rețele cu două borne de acces, prin care intră curenții $i_1^{(ex)} = i$ și $i_2^{(ex)} = -i$, puterea primită pe la borne are expresia:

$$p_b = v_1 \cdot i_1^{ex} + v_2 \cdot i_2^{ex} = (v_1 - v_2) \cdot i \quad (1.28)$$

Introducând tensiunea la borne $u_b = v_1 - v_2$, cu sensul de referință asociat după regula de la receptoare, *puterea primită pe la borne din exterior de un dipol* are expresia:

$$p_b = u_b \cdot i \quad (1.29)$$

Aceeași expresie exprimă puterea cedată pe la borne spre exterior, dacă sensurile de referință ale mărimilor u_b și i sunt luate după regula de la generatoare.

Observații: 1. În relațiile de mai sus am folosit **litere mici**, u , i , v , p , pentru a desemna **valorile instantanee** – funcții de timp – ale mărimilor respective, în acord cu convenția uzuală.

2. În măsura în care nu există ambiguitate, indicii inferiori nu se mai pun, puterea la borne se notează p , iar tensiunea la borne u .

Studiul circuitelor electrice filiforme în regim cvasistaționar arată că fiecare latură a unui asemenea circuit poate fi privită ca o asociație de elemente de circuit ideale (sau pure) – rezistoare, bobine, condensatoare, etc – fiecare element fiind caracterizat prin câte un parametru de circuit – rezistență, inductivitate, capacitate, etc.

1.4. Elemente ideale de circuit electric

În teoria circuitelor electrice se introduc, prin abstractizare, așa numitele elemente ideale de circuit (fig. 1.5), și anume [26]:

- generatorul ideal de tensiune, a cărui tensiune la borne este independentă de curent. Sursa de tensiunea electromotoare se notează cu e sau U_e ;
- generatorul ideal de curent, la care curentul debitat este independent de tensiunea la borne. Sursa de curent se notează cu j sau J ;

- rezistorul ideal, caracterizat prin mărimea R (rezistența electrică): $R = \frac{\rho \cdot l}{S}$;

- bobina ideală, caracterizată numai prin mărimea L (inductanța)

$$L = \frac{N^2}{R_m} = \frac{\mu \cdot N^2 \cdot S}{l}$$

