CURSUL 6

2.6. RELAŢIILE FUNDAMENTALE ALE REGIMULUI ELECTROCINETIC

2.6.1. Legea conservării sarcinii electrice.

Se consideră un condensator electric încărcat cu sarcină electrică q, ale cărui armături se leagă printr-un conductor metalic având rezistenţa R şi o suprafaţă închisă **Σ** ce conţine numai armătura încărcată cu sarcina $+q$ (fig.2.12). La închiderea întreruptorului **a**, potenţialul conductorului nu mai este constant (datorită potenţialelor diferite ale armăturilor condensatorului încărcate cu sarcini electrice de semne contrare) şi ca urmare nu se mai menţine echilibrul electrostatic, prin conductor apărând o deplasare ordonată a sarcinilor electrice.

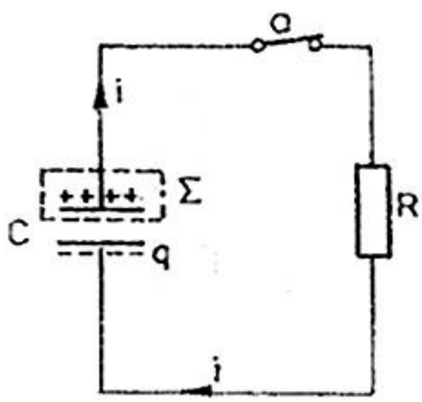


Fig.2.12 - Explicativă la legea conservării sarcinii electrice.

S-a constatat experimental că intensitatea curentului electric de conducţie ce trece prin circuit în timpul descărcării condensaorului, este egală cu viteza de scădere a sarcinii electrice q_Σ de pe armătura condensatorului din interiorul suprafeţei Σ, adică:

$$i_\Sigma = -\frac{\mathrm{d}\,q_\Sigma}{\mathrm{d}\,t} . \qquad (2.19)$$

Relaţia (2.19) se poate generaliza considerând că avem şi corpuri încărcate electric în mişcare şi ca urmare pe lângă intensitatea curentului electric de conducţie există şi intensitate a curentului electric de convecţie:

$$i_\Sigma + i_{v\Sigma} = -\frac{\mathrm{d}\,q_\Sigma}{\mathrm{d}\,\mathrm{t}} . \qquad (2.20)$$

Suma dintre intensităţile curentului electric de conducţie i_Σ şi a curentului electric de convecţie $i_{v\Sigma}$, care ies dintr-o suprafaţă închisă Σ, fixă, este egală în fiecare moment cu viteza de scădere a sarcinii electrice q_Σ localizată în interiorul suprafeţei.

Pentru determinarea formei locale a legii, se va exprima sarcina electrică din interiorul suprafeţei Σ în funcţie de densitatea de volum a sarcinii electrice $\boldsymbol{\rho_v}$ iar intensităţile curenţilor de conducţie şi de convecţie în funcţie de densităţile de curent corespunzătoare. Ca urmare, relaţia (2.20) devine:

$$\int_{\Sigma} (\overline{J} + \overline{J}_v)\, d\overline{S} = -\frac{d}{dt}\int_{V_\Sigma} \rho_v \, dV = -\int_{V_\Sigma} \frac{\partial \rho_v}{\partial t}\, dV, \qquad (2.21)$$

deoarece suprafaţa Σ este imobilă.

Transformând integrala dublă într-o integrală triplă cu ajutorul teoremei lui Gauss-Ostrogradski, se obţine:

$$\int_{\Sigma} (\overline{J} + \overline{J}_v)\, d\overline{S} = \int_{V_\Sigma} div\,(\overline{J} + \overline{J}_v)\, dV = -\int_{V_\Sigma} \frac{\partial \rho_v}{\partial t}\, dV$$

și în final:

$$div(\overline{J} + \overline{J}_v) = div(\overline{J} + \rho_v\, \overline{v}) = -\frac{\partial \rho_v}{\partial t}\ . \qquad (2.22)$$

Relaţia (2.22) reprezintă forma locală a legii conservării sarcinii electrice: **viteza de scădere a densităţii de volum a sarcinii electrice dintr-un punct, este egală cu divergenţa sumei densităţii curentului electric de conducţie şi a densităţii curentului de convecţie.**

În regim electrocinetic staţionar (curent continuu), în care mărimile sunt invariabile în raport cu timpul, forma integrală şi forma locală a legii conservării sarcinii electrice devin:

$$i_\Sigma = -\frac{\mathrm{d}\, q_\Sigma}{\mathrm{d}\, t} = 0\ . \qquad div\overline{J} = 0. \qquad (2.23)$$

Relaţia (2.23) reprezintă **teorema continuităţii liniilor de curent**, adică, **intensitatea curentului electric de conducţie ce trece printr-o suprafaţă închisă este nulă** (prima teoremă a lui Kirchhoff). Liniile de curent sunt linii închise, deci curentul continuu circulă numai prin circuite electrice închise.

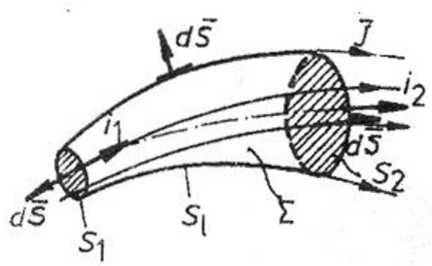


Fig.2.13. Conservarea intensităţii curentului într-un tub de curent.

Consecinţă. Dacă se consideră un tub de linii de curent şi se aplică relaţia (2.23) suprafeţei închise **Σ**, compusă din suprafeţele transversale $\boldsymbol{S_1}$ şi $\boldsymbol{S_2}$ şi suprafaţa laterală $\boldsymbol{S_l}$ (unde $\overline{J} \perp \mathrm{d}\overline{S}$), se obţine (fig.2.13) :

$$i_\Sigma = \int_\Sigma \overline{J}\,\mathrm{d}\,\overline{S} = \int_{S_1} \overline{J}\,\mathrm{d}\,\overline{S} + \int_{S_l} \overline{\mathrm{J}}\;\mathrm{d}\,\overline{\mathrm{S}} +$$

$$+ \int_{\mathrm{S}_2} \overline{\mathrm{J}}\;\mathrm{d}\,\overline{\mathrm{S}} = -\,\mathrm{i}_1 + \mathrm{i}_2 = 0,$$

$$\Leftrightarrow \mathrm{i}_1 = \mathrm{i}_2 \qquad . \qquad\qquad (2.24)$$

Curentul continuu are aceeaşi intensitate de-a lungul unui tub de curent şi în particular de-a lungul unui conductor electric neramificat (de exemplu latura unei reţele electrice). Deoarece în regim electrostatic $\boldsymbol{i_\Sigma = 0}$ (curentul electric de conducție este nul), rezultă că:

$$i_\Sigma = 0 = -\,\frac{\mathrm{d}\,q_\Sigma}{\mathrm{d}\,t} \quad .$$

Rezultă că $\boldsymbol{q_\Sigma}$ **= constant**, adică sarcina electrică a unui sistem izolat de conductori este constantă (teorema conservării sarcinii electrice din electrostatică, paragraful 1.4.2).

2.6.2. Legea conducţiei electrice

În regim electrocinetic existând o deplasare ordonată de sarcini electrice, rezultă că forţa rezultantă ce acţionează asupra acestor particule încărcate electric va fi diferită de zero:

$$\overline{F} = \overline{F}_{el} + \overline{F}_{neel} = q\,(\,\overline{E} + \overline{E_i}\,) \neq 0\;. \qquad (2.25)$$

S-a constatat experimental că **suma vectorială dintre intensitatea câmpului electric** $\overline{E}$ **şi intensitatea câmpului electric imprimat** $\overline{E}_i$ **este proporţională cu densitatea curentului electric de conducţie** $\overline{J}$:

$$\overline{E} + \overline{E}_i = \rho\,\overline{\mathrm{J}}\;. \qquad (2.26)$$

Relaţia reprezintă forma locală a legii conducţiei electrice. Factorul de proporţionalitate **ρ** se numeşte **rezistivitatea materialului** şi depinde atât de material cât şi de temperatură. Deci legea conducţiei electrice este o lege de material.

În conductoarele omogene şi neaccelerate unde nu există câmp electric imprimat (E_i=0), relaţia (2.26) devine:

$$\overline{E} = \rho \overline{J} \; . \tag{2.27}$$

Într-un mediu omogen, izotrop şi neaccelerat, vectorul densităţii de curent coincide ca direcţie şi sens cu vectorul intensităţii câmpului electric (rel. 2.27), iar liniile de curent coincid cu liniile câmpului electric.

Inversul rezistivităţii materialului ***σ*** se numeşte **conductivitatea materialului**:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \; . \tag{2.28}$$

Cu notaţia (2.28), relaţiile (2.26) şi (2.27) devin:

$$\overline{J} = \sigma(\overline{E} + \overline{E}_i) \; , \quad \overline{J} = \sigma \overline{E} \; . \tag{2.29}$$

Pentru circuite filiforme, pentru care densitatea curentului electric este constantă în toate punctele unei secţiuni transversale, se foloseşte forma integrală a legii conducţiei electrice. Pentru aceasta se consideră o porţiune de circuit filiform în care se găseşte o sursă de câmp electric imprimat $\overline{E}_i$ (fig.2.14). Integrând forma locală a legii conducţiei (2.26) pe curba ***C*** (axa conductorului care este şi o linie de curent) între punctele 1 şi 2, rezultă:

$$\int_{1(C)}^{2} (\overline{E} + \overline{E}_i) \, d\overline{l} = \int_{1(C)}^{2} \rho \overline{J} \, d\overline{l} \; . \tag{2.30}$$

Deoarece circuitul este filiform: $J = i / S$ şi $\overline{\boldsymbol{J}} \perp d\overline{\boldsymbol{S}}$, rezultă:

$$\overline{J} \, d\overline{l} = J \, dl = \frac{i \, dl}{S} \; , \tag{2.31}$$

unde ***S*** este secţiunea conductorului, iar ***i*** – intensitatea curentului prin circuitul filiform.

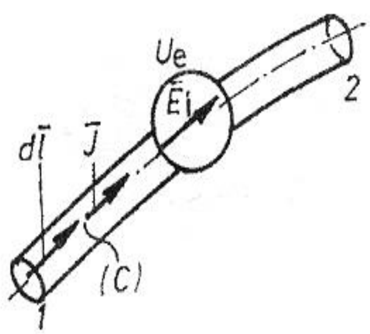


Fig.2.14. Explicativă la calculul formei integrale a legii conducţiei electrice.

Ţinând seama de relația (2.31), relaţia (2.30) devine:

$$\int_{1(C)}^{2} \overline{E}\, \mathrm{d}\bar{l} + \int_{1(C)}^{2} \overline{E}_{\mathrm{i}}\, \mathrm{d}\bar{l} = i \int_{1(C)}^{2} \rho \frac{\mathrm{d}l}{S} . \tag{2.32}$$

Se fac următoarele notaţii:

- pentru tensiunea în lungul firului:

$$u_{12} = u_{\mathrm{f}} = \int_{1(C)}^{2} \overline{E}\, \mathrm{d}\bar{l} \quad ,$$

- pentru tensiunea electromotoare imprimată:

$$u_{ei} = u_{e_{12}} = \int_{1(C)}^{2} \overline{E}_{\mathrm{i}}\, \mathrm{d}\bar{l}$$

- pentru rezistenţa electrică a porţiunii de circuit:

$$R_{12} = \int_{1(C)}^{2} \rho \frac{\mathrm{d}l}{S} \; .$$

Cu notaţiile de mai sus, se obţine forma integrală a legii conducţiei electrice:

$$u_{12} + u_{e_{12}} = i\, R_{12} \; , \tag{2.33}$$

care se enunţă astfel: **pentru o porţiune neramificată de circuit filiform, suma dintre tensiunea electrică în lungul firului şi tensiunea electrică imprimată a surselor ce se găsesc în acea porţiune de circuit, este egală cu produsul dintre intensitatea curentului *i* şi o mărime scalară *R*, caracteristică circuitului, numită rezistenţă electrică**.

Pentru un circuit închis ($\boldsymbol{u_{12} = 0}$, $\boldsymbol{u_{e12} = u_e}$), relaţia (2.33) devine:

$$u_{\mathrm{e}} = R\ i \; , \tag{2.34}$$

unde $\boldsymbol{u_e}$ este t.e.m. de contur.

Relaţia (2.34) arată cauza fizică care stabileşte curentul electric de conducţie printr-un circuit închis şi anume t.e.m. $\boldsymbol{u_e}$, care poate fi produsă fie de câmpuri electrice imprimate (elemente galvanice) fie de câmpuri electrice solenoidale (generatoare electrice).

În regim staţionar (curent continuu) tensiunea în lungul firului este tensiunea la borne $\boldsymbol{U_b}$, iar tensiunea imprimantă este t.e.m. $\boldsymbol{U_e}$, deci legea conducţiei electrice se scrie (mărimile în regim electrocinetic staționar c.c se scriu cu litere mari):

$$U_\mathrm{b} + U_e = \mathrm{R}\ I\ . \tag{2.35}$$

Pentru o porţiune de circuit fără surse de câmp electric imprimat (porţiune pasivă), legea are forma:

$$U_\mathrm{b} = \mathrm{R}\, I\ . \tag{2.36}$$

Relaţia (2.36) este cunoscută sub denumirea de **legea lui Ohm** şi se enunţă astfel: **tensiunea electrică la bornele unei porţiuni de circuit pasiv (fără surse), de curent continuu, este egală cu produsul dintre intensitatea curentului şi rezistenţa circuitului**.

Rezistenţa electrică a conductoarelor.

Din legea lui Ohm, **rezistenţa unui conductor este numeric egală cu raportul dintre tensiunea electrică continuă aplicată conductorului şi curentul care îl străbate**:

$$R = \frac{U_\mathrm{b}}{I}\ . \tag{2.37}$$

Rezistenţa electrică a unui conductor filiform, omogen, de secţiune constantă $\boldsymbol{S}$ şi de lungime $\boldsymbol{l}$ este:

$$R = \rho\frac{l}{S} = \frac{l}{\sigma S}\ . \tag{2.38}$$

Mărimea inversă rezistenţei se numeşte **conductanţă** şi se notează cu $\boldsymbol{G}$:

$$G = \frac{1}{R} = \sigma\,\frac{S}{l} = \frac{S}{\rho\, l}\ . \tag{2.39}$$

În sistemul internaţional de unităţi, rezistenţa electrică are ca unitate de măsură **Ohmul (Ω)**, iar conductanţa - **Siemensul (S)**.

Rezistivitatea $\boldsymbol{\rho}$ a materialelor conductoare depinde liniar de temperatură, dacă diferenţele de temperatură sunt mici. Relaţia de calcul a rezistivităţii $\boldsymbol{\rho_\theta}$ la temperatura $\boldsymbol{\theta}$ în funcţie de rezistivitatea $\boldsymbol{\rho_0}$ de la temperatura de referinţă $\boldsymbol{\theta_0}$ este:

$$\rho_\theta = \rho_0\,[1 + \alpha(\theta - \theta_0)]\,, \qquad (2.40)$$

unde **α** este coeficientul de creştere a rezistivităţii cu temperatura. Coeficientul **α** poate fi pozitiv (la majoritatea metalelor) sau negativ (la cărbune, constantan, electroliţi). Pentru anumite metale, rezistivitatea lor se anulează brusc la temperaturi foarte joase, de ordinul câtorva kelvini. Acest fenomen a fost descoperit în anul 1911 de către **Kammerling - Ones** (1853 - 1926) şi a fost denumit **supraconductibilitate**.

Pentru semiconductoare, rezistivitatea scade exponenţial cu temperatura după relaţia:

$$\rho_\theta = \rho_0\, e^{\alpha\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}\,, \qquad (2.41)$$

unde $T = \theta + 273{,}16$ [K], $T_0 = \theta_0 + 273{,}16$ [K] reprezintă temperatura la care se află semiconductorul, respectiv temperatura de referinţă, exprimate în Kelvini.

În tabelul 2.2 se dau rezistivităţile **ρ**, conductivităţile ***σ*** şi coeficienţii de creştere a rezistivităţii cu temperatura **α** pentru $\theta_0 = 20^\circ$C, ale unor materiale uzuale.

Tabelul 2.2

Materialul	***ρ*[Ω m]**	***σ*[S/m]**	**α [1/K]**
Argint	$(1{,}59\ldots1{,}7)10^{-8}$	$(5{,}9\ldots6{,}3)10^{7}$	$3{,}8\ 10^{-3}$
Cupru	$(1{,}7\ldots1{,}78)10^{-8}$	$(5{,}6\ldots5{,}9)10^{7}$	$3{,}9\ 10^{-3}$
Aluminiu	$(2{,}8\ldots3{,}0)10^{-8}$	$(3{,}3\ldots3{,}6)10^{7}$	$3{,}7\ 10^{-3}$
Fier	$(9\ldots15)10^{-8}$	$(0{,}67\ldots1{,}1)10^{7}$	$4{,}5\ 10^{-3}$
Alamă	$(7\ldots9)10^{-8}$	$(1{,}1\ldots1{,}4)10^{7}$	$1{,}5\ 10^{-3}$
Nichelină	$4{,}3\ 10^{-7}$	$2{,}33\ 10^{6}$	$1{,}3\ 10^{-4}$
Manganină	$4{,}3\ 10^{-7}$	$2{,}33\ 10^{6}$	$1\ 10^{-5}$
Constantan	$4{,}9\ 10^{-7}$	$2{,}04\ 10^{6}$	$-5\ 10^{-6}$
Cărbune	$(6\ldots8)10^{-5}$	$(1{,}25\ldots1{,}67)...10^{4}$	$-\ (2\ldots8)\ 10^{-4}$

Dacă se amplifică relaţia (2.40) cu raportul ***l/S***, se obţine:

$$R_\theta = R_0\,[1 + \alpha(\theta - \theta_0)]\,, \qquad (2.42)$$

care reprezintă dependenţa rezistenţei conductoarelor de temperatură. Elementul de circuit caracterizat complect prin rezistenţa electrică se numeşte **rezistor.** Rezistoarele a căror rezistenţă este constantă se numesc **rezistoare fixe** și se reprezintă ca în figura 2.15a, iar cele la care rezistenţa poate fi modificată cu ajutorul unui cursor, se numesc **reostate variabile** sau **potenţiometre** (fig.2.15b).

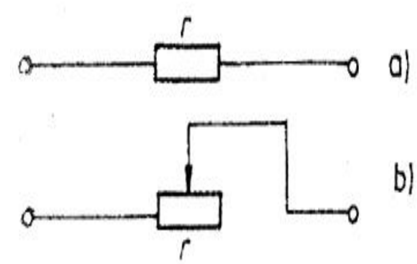


Fig.2.15 - Simbolizarea rezistoare de valori: a) fixe; b) variabile.

Aplicaţii

1. 1. Să se calculeze căderea de tensiune pe o linie electrică bifilară de curent continuu de lungime **l** formată din conductoare cu secțiunea circulară de diametrul **d** , având conductivitatea electrică ***σ.*** Se cunoaşte densitatea de curent admisibilă **J** .

Rezolvare

Secţiunea conductorului este: $S = \pi\, d^2 /4$.

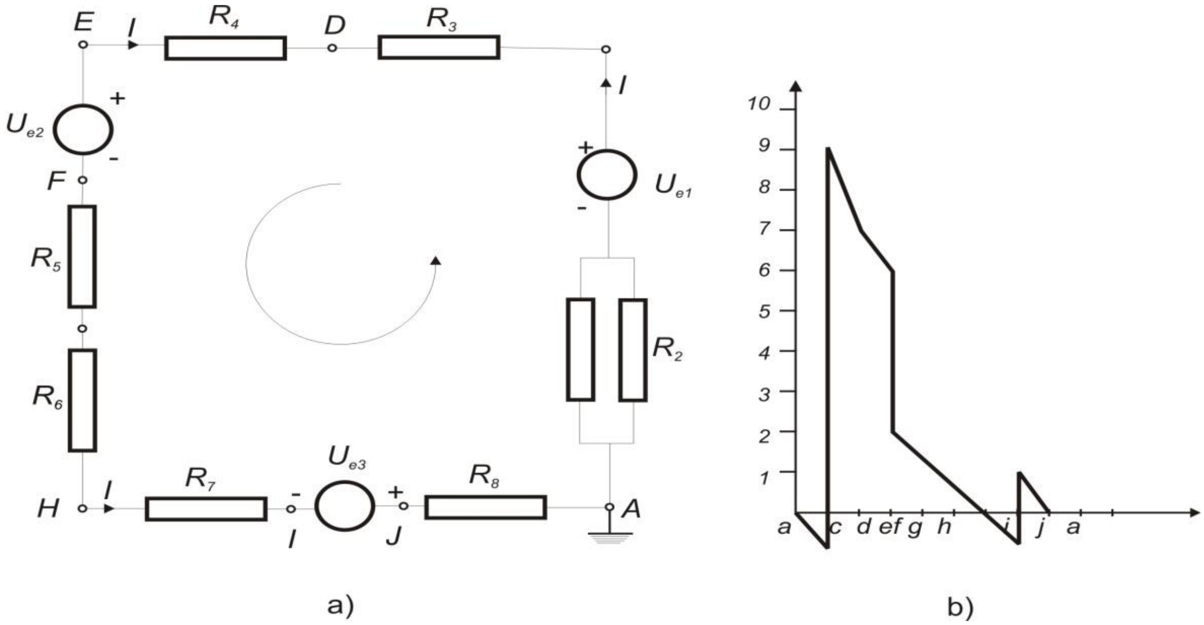
Rezistenţa liniei electrice de lungime 2 l va fi:

$$R = \rho\, 2\, \mathbf{l} / S = 8\, \mathbf{l} / (\pi\ \sigma\, d^2).$$

Intensitatea curentului electric este: $I = J\, S = J\, d^2 /4$.

Căderea de tensiune pe linie va fi: $U_l = R\, I = 2\, I\, J / \sigma$.

2. Se dă circuitul electric reprezentat în figura de mai jos, în care: U_{e1} = 100 V, U_{e2} = 40 V, U_{e3} = 20 V, $R_1 = R_2 = R_3$ = 4 Ω, $R_4 = R_5 = R_7 = R_8$ = 3 Ω, R_6 = 2 Ω**,** rezistenţele interioare ale surselor fiind neglijabile. Să se calculeze intensitatea curentului din circuit, să se construiască diagrama de variaţie a potenţialelor electrice pe circuit şi să se determine tensiunea între punctele HC, EB şi IA.



Circuitul electric pentru aplicaţia numerică 2; b) diagrama de variaţie a potenţialelor.

Rezolvare

Aplicând cea de a doua teoremă a lui Kirchhoff ochiului de circuit ABCDEFGHIJA, rezultă:

$$I = \frac{U_{e1} - U_{e2} + U_{e3}}{R_{1-2} + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_8} = \frac{80}{20} = 4\ A.$$

Deoarece punctul A se află legat la pământ, potenţialul său electric este zero. Între punctele A şi B apare o cădere de tensiune pe rezistenţa echivalentă $R_{1,2}$:

$$U_{AB} = R_{1-2} I = 8\,V.$$

Tensiunea dintre punctele A şi B este:

$U_{AB} = V_A - V_B$, rezultă că: $V_B = V_A - U_{AB} = -8\,V$.

Între punctele B şi C avem sursa de t.e.m. U_{e1}, sensul t.e.m. coincizând cu sensul curentului. Potenţialul punctului C va fi egal cu potenţialul punctului B la care se adaugă U_{e1}:

$V_C = V_B + U_{e1} =+ 92\text{V}$.

Procedând analog se obţine:

$V_D = V_C - U_{CD} = 76\text{V}$, $V_E = V_D = U_{DE} = 64\text{V}$, $V_F = V_D - U_{e2} = 24$ V,

$V_G = V_F - U_{FG} = 12\text{V}$, $V_H = V_F - U_{FH} = 4\text{V}$, $V = V_H - U_{HI} = 8\text{V}$,
$V_j = V_I + U_{e3} = 12\text{V}$, $V_A = V_J - U_{JA} = 0$.

Variaţia potenţialului este redată în figura b.
Tensiunile cerute sunt:

$U_{HC} = V_H - V_C = 88$ V, $U_{EB} = V_E - V_B = 72$ V, $U_{IA} = V_I - V_A = 8$ V.

2.6.3. Legea transformării energiei în conductoare

Starea electrocinetică este caracterizată prin existenţa unui curent electric şi printr-o transformare a energiei câmpului electromagnetic în alte forme de energie. **J.P.Joule** (1818 - 1889) şi **E.H.Lenz** (1804 - 1865) au stabilit experimental că în orice conductor electric parcurs de curent electric se dezvoltă căldură.

S-a stabilit experimental că **puterea electromagnetică p cedată unităţii de volum a conductorului în procesul de conducţie de către câmpul electromagnetic este egală cu produsul scalar dintre intensitatea câmpului electric $\overline{E}$ şi densitatea curentului electric de conducţie** $\overline{J}$:

$$p = \overline{E} \cdot \overline{J} \ . \tag{2.43}$$

Relaţia (2.43) reprezintă forma locală a legii transformării energiei în conductoare, lege general valabilă, sub această formă, pentru conductoare omogene, neomogene, izotrope, anizotrope, liniare sau neliniare.

Din legea conducţiei electrice (rel.2.26), rezultă:

$$\overline{E} = \rho \, \overline{J} - \overline{E}_i .$$

Înlocuind relaţia de mai sus în (2.43) se obţine:

$$p = \rho \, J^2 - \overline{E}_i \, \overline{J} = p_R - p_G \ . \tag{2.44}$$

Primul termen al relaţiei (2.44) $\mathbf{p_R = \rho \, J^2}$ este totdeauna pozitiv şi reprezintă densitatea de volum a puterii transmisă de către câmpul electromagnetic conductorului şi transformată ireversibil în căldură. Dezvoltarea de căldură este caracteristică stării electrocinetice şi poartă numele de **efect electrocaloric sau efect Joule – Lenz.**

Termenul al doilea din relaţia (2.44), $\mathbf{p_G} = \overline{E}_i\,\overline{J}$ poate fi pozitiv sau negativ şi reprezintă densitatea de volum a puterii schimbate între sursele de câmp electric imprimat şi câmpul electromagnetic. Dacă vectorii $\overline{E_i}$ şi $\overline{J}$ au acelaşi sens, densitatea de putere $\mathbf{p_G}$ este cedată de sursa de câmp imprimat câmpului electromagnetic. Acest fenomen are loc în orice element galvanic sau acumulator care debitează curent electric, producând energie electromagnetică din energia chimică internă. Dacă vectorii $\overline{E_i}$ şi $\overline{J}$ sunt antiparaleli, densitatea de putere $\mathbf{p_G}$ este cedată de câmpul electromagnetic şi primită de sursa de câmp electric imprimat. Acest fenomen are loc la încărcarea acumulatorului, când energia câmpului electromagnetic este transformată în energie chimică.

Integrând relaţia (2.43) pe volumul ***V*** al unei porţiuni de conductor filiform, de secţiune ***S***, în care $\overline{E}, \overline{J}$ şi $\mathrm{d}\overline{l}$ sunt paraleli, se obţine puterea totală ***P*** cedată de câmpul electromagnetic conductorului în procesul de conducţie al curentului electric. Notându-se cu S secţiunea conductorului (fig.2.16), se obţine:

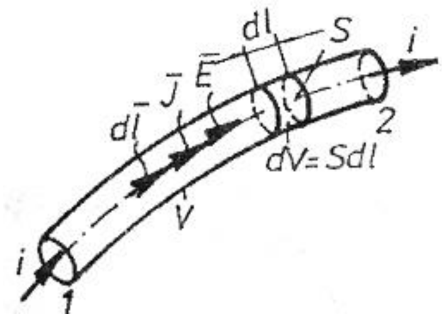


Fig.2.16. Explicativă la calculul puterii totale absorbite de o porţiune neramificată de circuit.

$$P = \int_V p\ \mathrm{d}V = \int_V \overline{J}\ \overline{E}\,(S\ \mathrm{d}l) = \tag{2.45}$$
$$= \int_1^2 J\ S\,\overline{E}\ \mathrm{d}\overline{l} = i\int_1^2 \overline{E}\ \mathrm{d}\overline{l} = i\ u_f\ .$$

Relaţia (2.45) exprimă forma integrală a legii transformării energiei în conductoare care se enunţă astfel:

Puterea electromagnetică primită de un conductor filiform de la câmpul electromagnetic în procesul de conducţie este egală cu produsul dintre tensiunea electrică în lungul conductorului şi intensitatea curentului electric din conductor.

Exprimând tensiunea electrică în lungul firului prin relaţia (2.33), rezultă:

$$P = i\ u_{\mathrm{f}} = i\ (Ri - u_e\ ) = Ri^2 - i u_e = P_R - P_{\mathrm{G}}\ . \tag{2.46}$$

Primul termen al relaţiei (2.46), $\boldsymbol{P_R = R\, i^2}$ este mereu pozitiv şi reprezintă puterea disipată ireversibil sub formă de căldură în conductor de către câmpul electromagnetic.

Al doilea termen al relaţiei, $\boldsymbol{P_G = i\ u_e}$, poate fi pozitiv sau negativ şi reprezintă puterea cedată sau primită de sursa de câmp electric imprimat câmpului electromagnetic.

În figura 2.17 sunt redate sugestiv cazurile în care o sursă de tensiune electrică imprimată cedează energie câmpului electromagnetic ($\boldsymbol{P_G > 0}$) sau primeşte energie ($\boldsymbol{P_G < 0}$) de la câmpul electromagnetic.

Unitatea de măsură a puterii este **Wattul [W]**, iar a energiei **Joulul [J]**. În electrotehnică se foloseşte pentru energie o unitate mai mare, **Kilowattora [kWh]**:

1 kWh = 10^3 W 3600 s =3,6 10^6 J.

Efectul electrocaloric al curentului electric are largi aplicaţii în tehnică ca de exemplu la: iluminatul electric; încălzirea electrică în cuptoarele electrice cu rezistenţă, cu arc electric sau prin inducţie; sudura electrică; tratamentele termice prin metode electrice (călirea prin curenţi de medie şi înaltă frecvenţă).

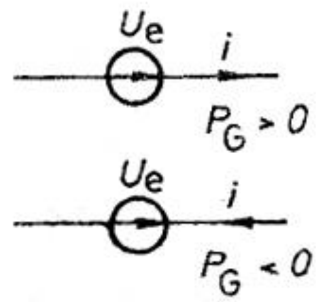


Fig.2.17. Explicativă la puterea unei surse: a) debitată; b) absorbită.

Efectul electrocaloric este uneori nedorit. Majoritatea conductoarelor utilizate în tehnică sunt izolate şi ca urmare a încălzirii lor peste anumite valori prin efect Joule – Lenz, s-ar putea distruge izolaţia, ducând la distrugerea aparatului sau maşinii. Datorită efectului electrocaloric apar pierderi în conductoarele electrice şi în circuitele magnetice ale maşinilor electrice, care duc la scăderea randamentului maşinilor. În procesul de transmitere a energiei electromagnetice, încălzirea conductoarelor liniilor electrice aeriene duce la scăderea randamentului transmisiei de energie.

2.6.3.1. Teorema conservării puterilor în circuitele de curent continuu.

În cazul funcţionării circuitelor de curent continuu în regim staţionar, mărimile sunt invariabile în timp. Ca urmare nici energia câmpului electromagnetic nu poate fi variabilă în timp. Asta înseamnă că puterea transmisă de câmpul electromagnetic conductoarelor în procesul de conducţie trebuie să fie zero. Din relaţia (2.46) rezultă că $P = 0$, respectiv:

$$P = P_R - P_G = 0\ , \qquad P_R = P_G\ . \tag{2.47}$$

Relaţia 2.47 afirmă că într-o reţea de curent continuu în regim staţionar, puterile disipate în toate rezistenţele circuitului, inclusiv rezistenţele interioare ale surselor, sub formă de căldură sunt egale cu puterile debitate de sursele din reţea, adică:

$$\sum_{k=1}^{L} R_k\, I_k^2 = \sum_{k=1}^{L} U_{ek}\, I_k + \sum_{k=1}^{L} U_{bk} J_k . \qquad (2.48)$$

În relaţia 2.48**,** $\boldsymbol{R_k}$ reprezintă suma tuturor rezistenţelor rezistoarelor şi a rezistenţelor interioare ale surselor de t.e.m de pe latura k, $\boldsymbol{I_k}$ – intensitatea curentului din latura k, $\boldsymbol{U_{ek}}$ – tensiunile electromotoare ale surselor din latura k, U_{bk} reprezintă tensiunea la borenle sursei de curent J_k, produsul $U_{bk}\ J_k$ se ia totdeauna cu plus. Se observă că bilanţul se face pe întreaga reţea (se folosesc toate laturile, suma făcându-se pe toate laturile L ale reţelei). Termenii din membrul stâng se iau totdeauna cu plus, iar produsele din membrul drept $\boldsymbol{U_{ek}\, I_k}$ se iau cu plus dacă t.e.m. şi curenţii corespunzători au acelaşi sens prin sursă şi cu semnul minus, dacă au sensuri contrare (fig.2.17).

2.6.3.2. Calculul conductoarelor la încălzire.

La trecerea curentului prin conductoare, o parte a energiei câmpului electromagnetic se transformă ireversibil în căldură. Din această căldură, o parte se înmagazinează în conductor ducând la creşterea temperaturii sale, iar o altă parte este cedată mediului ambiant.

Cantitatea de căldură Q dezvoltată în conductor în timpul **t** este:

$$Q = R\, I^2 t = \frac{U^2}{R} t\,, \qquad (2.49)$$

unde ***R*** este rezistenţa conductorului, iar ***I*** - intensitatea curentului din conductor.

Cantitatea de căldură Q_d, cedată mediului ambiant în timpul **t** prin suprafaţa laterală S_l, a conductorului este dată de legea lui **Isaac Newton:**

$$Q_d = k\, S_l\, (\theta_c - \theta_0)\, t\,, \qquad (2.50)$$

unde **k** este coeficientul de transmitere al căldurii, $\boldsymbol{\theta_c}$ - temperatura conductorului şi $\boldsymbol{\theta_0}$ – temperatura mediului ambiant.

La atingerea temperaturii de regim θ_f, cele două cantităţi de căldură sunt egale şi deci:

$$R\, I^2 t = k\, S_l\, (\theta_c - \theta_0)\, t\,. \qquad (2.51)$$

Din relaţia (2.51) rezultă valoarea intensităţii curentului electric la atingerea temperaturii de regim:

$$I = \sqrt{\frac{k\, S_l\, (\theta_c - \theta_0)}{R}}\ . \qquad (2.52)$$

În cazul conductoarelor filiforme de secţiune constantă şi circulară avem:

$$I = J\,\frac{\pi\, d^2}{4}\,, \quad S_l = \pi\, d\, l\,, \quad R = \frac{4\,\rho\, l}{\pi\, d^2}\,.\mathrm{S} \qquad (2.53)$$

Înlocuind relaţiile (2.53) în (2.50) se obţine densitatea curentului electric la care conductorul nu se încălzeşte peste temperatura de regim:

$$J = 2\sqrt{\frac{k\,(\theta_f - \theta_0)}{\rho\, d}}\ . \qquad (2.54)$$

Conductoarele izolate au anumite temperaturi maxime admisibile de funcţionare (60°...120°C), în funcţie de natura izolaţiei şi de condiţiile de montaj. Curentul electric şi densitatea curentului electric calculate cu relaţiile (2.52) şi (2.54) poartă numele de **curent** şi respectiv **densitate de curent nominale.**

În tabelul 2.3 sunt date densităţile de curent admisibile pentru conductoarele de cupru izolate şi neizolate pentru câteva secţiuni mai des întîlnite. Pentru conductorul neizolat se dau densităţile admisibile pentru încăperi închise şi pentru încăperi deschise. Se observă că pentru conductoarele aflate în aer liber, densitatea de curent admisibilă este mai mare decît în încăperile închise. Acest lucru se poate explica prin faptul că în aer liber există o circulaţie mai bună a aerului, deci o răcire mai eficientă.

Tabelul 2.3

S [mm^2|	**Conductor izolat J [A/mm^2]**	**Conductor neizolat**	
		încăperi închise J [A/mm^2]	**în aer liber J [A/mm^2]**
4	9	14,2	14,5
6	7,7	12,2	12,6
10	6,8	10,3	10,8
16	5,7	8,1	9,4
25	4,9	6,6	8,2

35	4,3	6,0	7,7
50	3,8	5,3	6,7
70	3,5	4,8	6,1

Aplicaţii

1. Să se calculeze energia consumată de un fierbător electric în timpul **t** dacă este alimentat la o tensiune ***U,*** puterea fierbătorului fiind *P*. Să se calculeze de asemenea rezistenţa fierbătorului şi lungimea conductorului, dacă se cunoaşte rezistivitatea ***ρ*** şi diametrul **d** al conductorului.

Rezolvare

Energia absorbită de fierbător în timpul t este: W = P t.

Rezistenţa fierbătorului va fi: $R = U^2/P$.

Lungimea conductorului rezultă: $l = R\ S / \rho = \pi\ U^2\ d^2 /(4\ \rho P)$.

2. Un motor electric de curent continuu, alimentat de la o sursă electrică cu tensiunea *U* = 110 V, absoarbe un curent având intensitatea *I* = 40 A. Alimentarea motorului se face printr-o linie de lungime l = 800 m. Să se determine diametrul conductoarelor liniei, astfel încât căderea de tensiune pe linie să fie 3 %. Să se calculeze puterea disipată pe linie. Calculul se va face pentru conductoare din cupru şi pentru conductoare din aluminiu.

Rezolvare

Căderea de tensiune pe linie admisă este:

$$\Delta U = \frac{3}{100} U = 3{,}3\,V,$$

în acelaşi timp:

$$\Delta U = R_l\, I = \rho \frac{2\, l}{\frac{\pi\, d^2}{4}} I, \qquad d = \sqrt{\rho \frac{8\, l\, I}{\Delta U\ \pi}}\ .$$

Pentru conductoare din cupru, respectiv aluminiu, rezultă:

$$d_{Cu} = 21{,}5\ mm\ , \qquad d_{Al} = 27{,}2\ mm\ .$$

Puterea pierdută pe linie în ambele cazuri va fi:

$$P = \Delta U \cdot I = 3{,}3 \cdot 40 = 132\ W\ .$$

2.6.3.3. Siguranţele fuzibile.

Sunt aparate de protecţie contra supracurenţilor şi în special contra curenţilor de scurtcircuit. Ele au proprietatea de a întrerupe instantaneu circuitul electric când intensitatea curentului depăşeşte o valoare limită impusă, ca urmare a topirii elementului fuzibil (filiform sau lamelar) prin efectul termic al curentului. Materialele din care se execută elementele fuzibilele sunt argintul, cuprul, zincul şi aliajele de staniu cu cadmiu. Materialele pentru fuzibile, trebuie să aibă o temperatură de topire joasă, o rezistivitate electrică mică, o inerţie termică mică şi să fie inoxidabile.

2.6.3.4. Lampa electrică cu incandescenţă.

Partea activă a unei lămpi electrice cu incandescenţă este filamentul, un conductor, care se încălzeşte la trecerea curentului electric până la temperaturi în jur de $2000°$ C. La această temperatură, filamentul emite o radiaţie luminoasă apropiată de cea albă. Filamentul se realizează din sârmă foarte subţire de wolfram, care are o temperatură de topire foarte înaltă, o evaporare lentă şi o rezistenţă mecanică mare. Randamentul lămpilor cu incandescenţă este foarte scăzut. Numai (4...6)% din energia electrică absorbită se transformă în energie luminoasă, restul se transformă în energie calorică. Funcţionarea lămpii cu incandescenţă se întrerupe când filamentul sublimează (se arde) în punctul cu temperatura cea mai mare.

TEME DE STUDIU

Test 1.

Care este forma locală a legii transformării energiei în conductoare ?.

Test 2.

Care este forma integrală a legii transformării energiei în conductoare ?.

Test 3.

Care este teorema conservării puterilor în circuitele de curent continuu ?.

Test 4.

Cum se determină semnul puterii debitate de surse ? .

Test 5.

Care este rolul siguranţelor fuzibile şi cum funcţionează .

Test 6.

Cum funcţionează un bec cu filament şi ce randament are.

Test 7.

Enunţaţi teorema conservării puterilor în circuitele de curent continuu. Unde se utilizează această teoremă ?.

Test 8.

Care este legea conservării sarcinii electrice ?.

Test 9.

Care sunt conseciinţele legii conservării sarcinii electrice ?.

Test 10.

Ce este tubul de curent ?.

Test 11.

Care este legea conducţiei electrice ?.

Test 12.

Cum se defineşte rezistenţa unei porţiuni de circuit ?.

Test 13.

Ce este conductanţa electrică a unei porţiuni de circuit ?.

Test 14.

Care sunt cazurile particulare ale legii conducţiei electrice ?.

Test 15.

Cum depinde rezistivitatea (rezistenţa electrică) a materialelor de temperatură?.

Test 16.

Care este unitatea pentru rezistenţa electrică ?:

- ohmul;
- simensul;
- amperul.

Test 17.

Care este unitatea pentru conductanţa electrică ?:

- ohmul;
- simensul;
- amperul.

Test 18.

Care este unitatea pentru rezistivitatea electrică ?:

- ohmul;
- simensul;
- ohm metrul.

Test 19.

Care sunt unitățile de măsură pentru energia electrică și ce relații sunt între ele?: