

ЭЛЕКТР ЖӘНЕ МАГНЕТИЗМ

Профессор Досболаев М.Қ.

merlan@physics.kz

Тұрақты электр тогы

Электр тогы дегеніміз зарядтардың реттелген (бағытталған) қозғалысы

- Өткізгіштер және диэлектриктер;

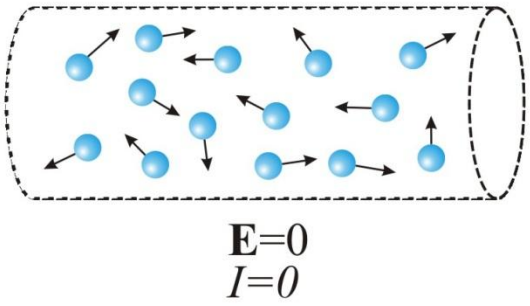
Бірінші текті өткізгіштер – қатты және балқыған күйдегі металдар (электрондар).

Екінші текті өткізгіштер – тұздар ерітінділері, қышқылдар (иондар).

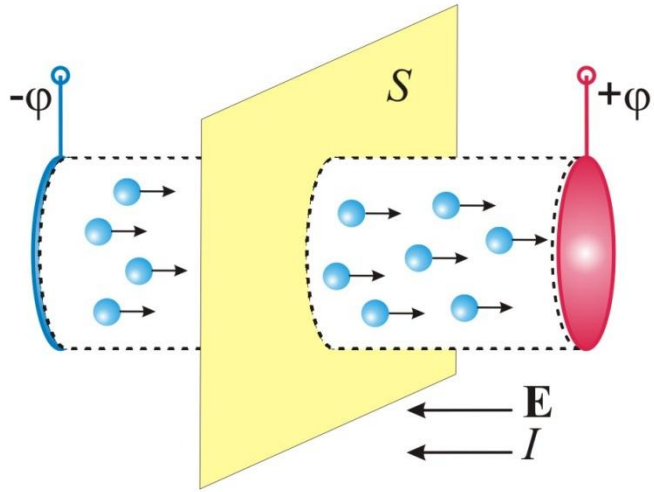
- Ток бағыты оң зарядтардың қозғалыс бағытына сай келеді;
- Ток күші дегеніміз, қандайда бір бет (өткізгіштің көлденен қимасының ауданы) арқылы бірлік уақытта тасымалданатын зарядтар мөлшеріне тең скаляр шама (2 сурет):



Андре-Мари́ Ампе́р
(1775-1836)



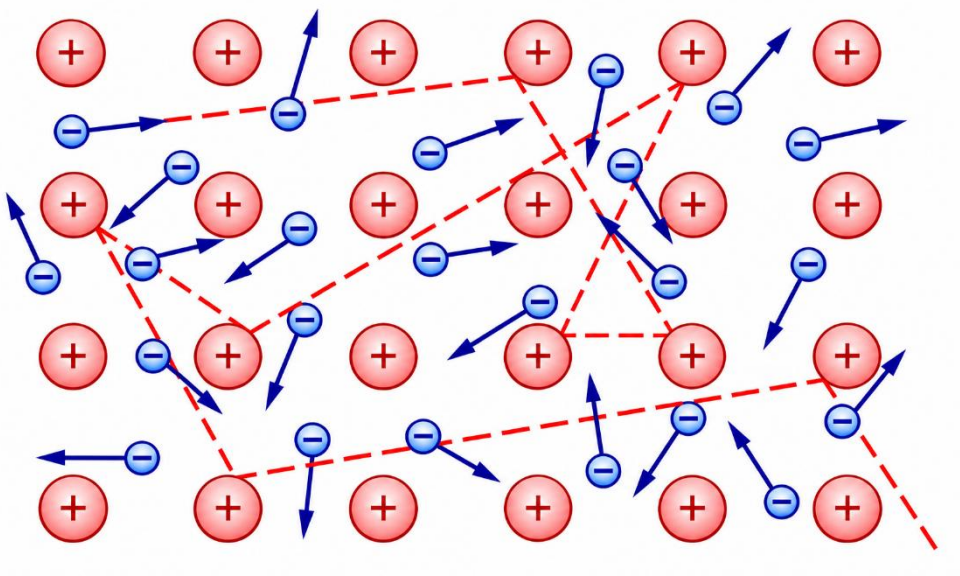
1 сурет



2 сурет

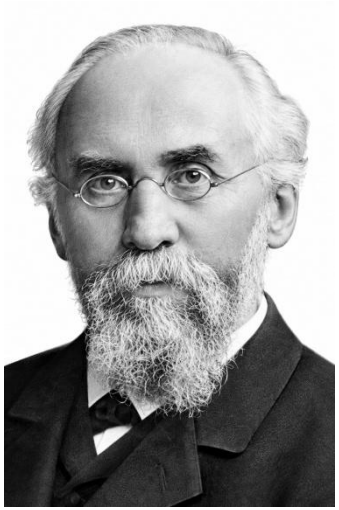
$$I = \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}\,[\mathrm{A}] \quad (1)$$

Металдардағы электр тогы (электронды газ)





П. Друде



Х. Лоренц

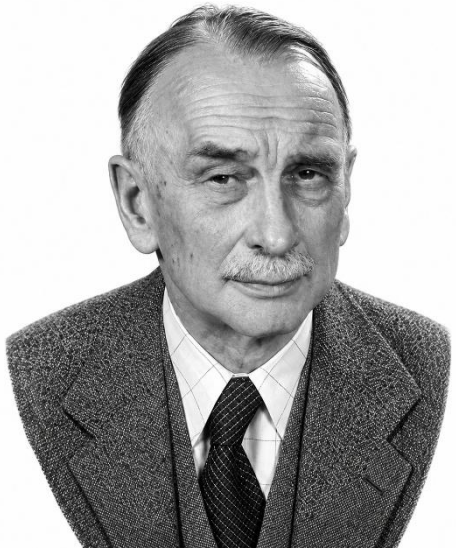
$$n_e = \frac{N}{V} \approx 10^{23} - 10^{29}\ \text{м}^{-3}$$

$$\lambda_e \approx 10^{-10}\ \text{м}$$

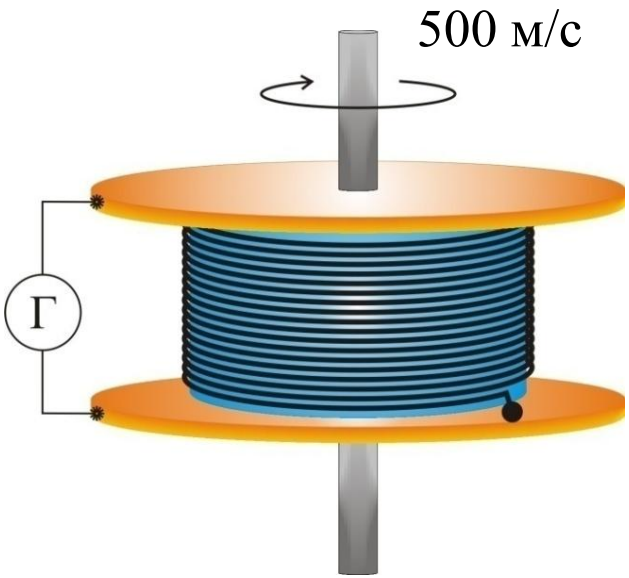
Бөлме температурасындағы электрондардың жылулық қозғалысының орташа кинетикалық энергиясы:

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = 117\ \text{км/с}$$

Толмен-Стюарт эксперименті. Металдардағы электр тогын тасымалдаушылардың еркін электрондар екенін және олардың массасы мен теріс электр заряды бар екенін тәжірибе жүзінде көрсететін классикалық физикалық эксперимент.



Ричард Толмен
(1881-1948)





Томас Стюарт
(1926-1982)

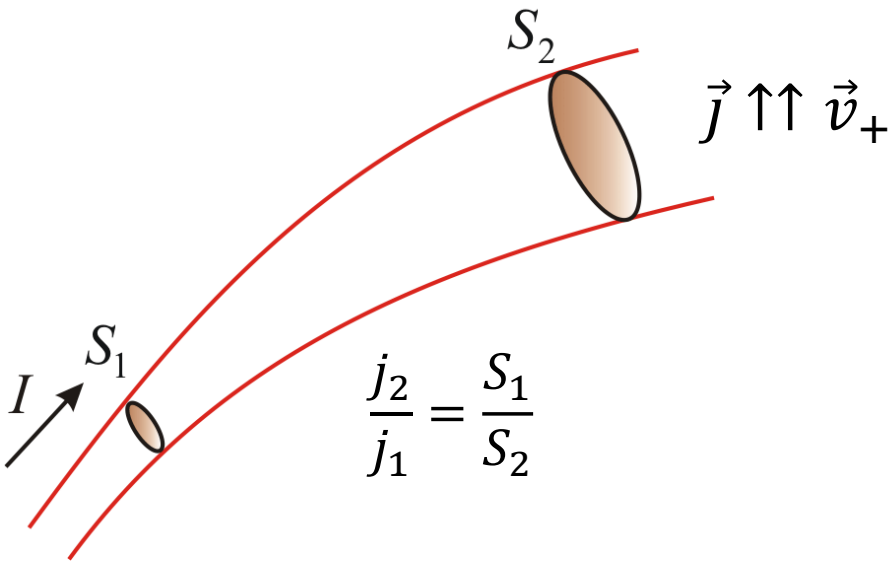
3 сурет. Эксперимент схемасы

$$\vec{F}_{\text{ин}} = -m\vec{a} = \vec{E}q$$

А.А. Детлаф. Курс физики. 1977. 2 том. 100 бет

Өткізгіш арқылы электр тогы өткен кезде ток оның көлденең қимасы бойынша біркелкі таралмауы мүмкін, сондықтан ток тығыздығы деген ұғым енгізілген

Бірлік ауданнан өткен ток тығыздығы векторының модулі: $j = \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}S_\perp}\left[\frac{\mathrm{A}}{\mathrm{м}^2}\right]$ (2)



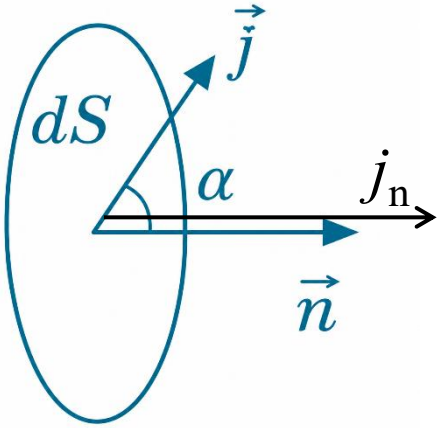
4 сурет

$$\vec{j} = \rho_+\vec{v}_+ + \rho_-\vec{v}_- \quad (3)$$

$$\vec{j} = \rho_-\vec{v}_- \quad (4)$$

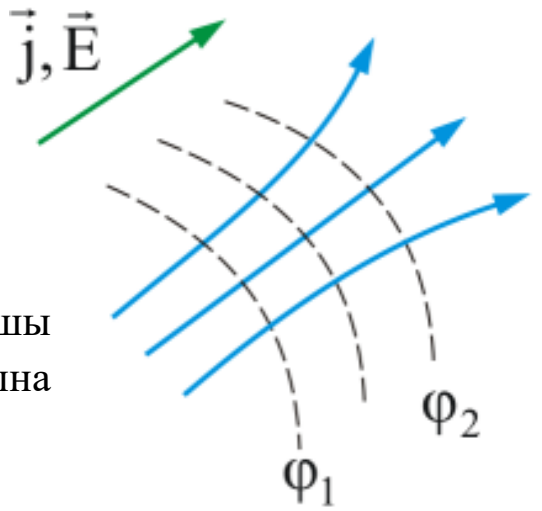
Ток күшімен ток тығыздығы арасындағы байланыс

$$j = \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}S_\perp} \quad (2)$$



$$\mathrm{d}I = j\mathrm{d}S_\perp = j \cdot \cos\alpha \cdot \mathrm{d}S = j_n \mathrm{d}S = \vec{j}\mathrm{d}\vec{S} \quad (5)$$

$$I = \int \vec{j}\mathrm{d}\vec{S} \quad (6)$$



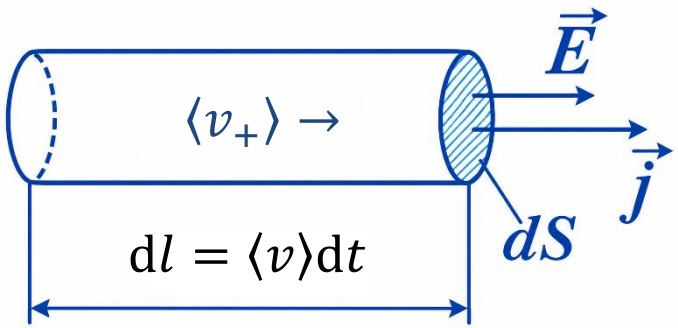
5 сурет

Ток күші скаляр және алгебралық шама, оның таңбасы 6-шы формуладан көріп отырғанымыздай $\mathrm{d}\vec{S}$ векторының (нормаль) бағытына тәуелді, демек оң немесе теріс болады.

Тұрақты ток үшін: $I = j\mathrm{S}$ (7)

$\vec{n}$ – бірлік вектор; j_n – $\mathrm{d}S$ ауданшаның $\vec{n}$ нормаліне түсірілген $\vec{j}$ векторының проекциясы

Ток тығыздығымен заряд арасындағы байланыс (10)



6 сурет. Ұзындығы $\mathrm{d}l$ *болатын цилиндр тәрізді өткізгіш бөлігі*

$\mathrm{d}S$ бет арқылы тасымалданатын зарядтар: $\mathrm{d}q = n_e e \langle v \rangle \mathrm{d}S\mathrm{d}t.$ (8)

$$j = \frac{\mathrm{d}I}{\mathrm{d}S} = \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}S\mathrm{d}t} = n_e e \langle v \rangle \quad (9)$$

$$\vec{j} = -n_e e \langle \vec{v} \rangle. \quad (10)$$

e – элементар заряд; n_e – электрондар концентрациясы.

Өткізгіштегі ток жылдамдығы.
$S = 1$ мм^2 мыс сым үшін есептелінген ең максимал ток тығыздығы $11 \cdot 10^6$ А/м^2 тең.

$$j = n_e e \langle v \rangle \quad (10)$$

$$\langle v \rangle = \frac{j}{n_e e} = \frac{11 \cdot 10^6}{8{,}5 \cdot 10^{28} \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}} \approx 8 \cdot 10^{-4} \text{ м/с} = 0{,}8 \text{ мм/с} \quad (11)$$

$$\langle v_{\text{кв}} \rangle = 117 \text{ км/с}$$

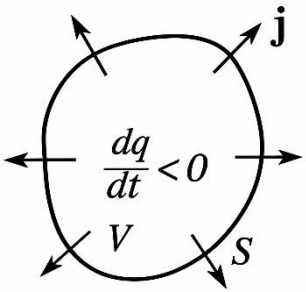
Электр тізбегі тұйықталған кезде жарық жылдамдығымен тарайтын электр өрісі тізбектің барлық бөлігіне әпсәтте әсер етеді, демек оның бойындағы электрондар да бір мезетте қозғалысқа келеді деп айтуға болады. Мұндай тізбектегі токтың орнығу уақыты:

$$t = \frac{L}{v} \quad (12)$$

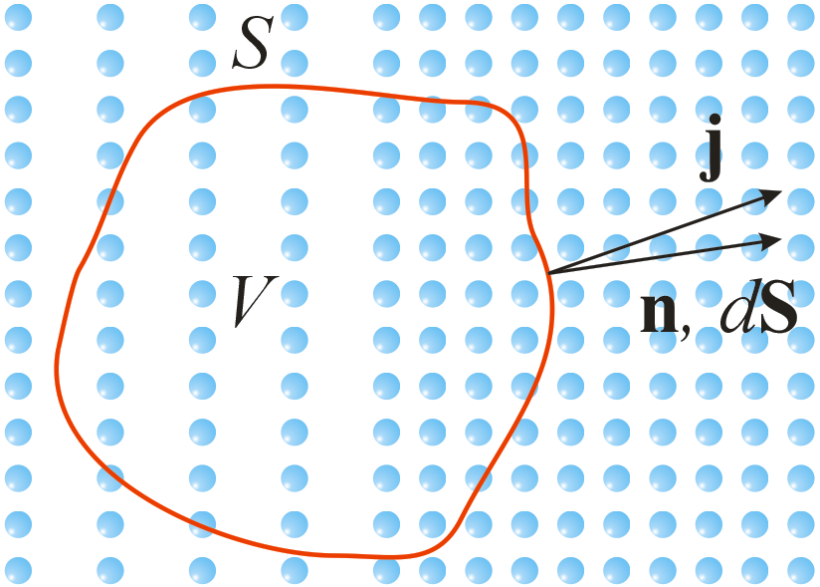
$\langle v \rangle$ – электрондардың бағытталған қозғалысының орташа жылдамдығы; L – тізбек ұзындығы; v – электрлік сигналдың таралу жылдамдығы.

А.А. Детлаф. Курс физики. 1977. 2 том

Тұтас өткізгіш денедегі ток. Үзіліссіздік теңдеуі. Ток тығыздығы векторының ағыны



Савельев



Тұйық бет арқылы ток тығыздығы векторының ағыны $\left(\oint \vec{j}\mathrm{d}\vec{S}\right)$ осы тұйық бет қаптап тұрған көлемнің сыртына бірлік уақытта шыққан зарядты береді:

$$\oint_S \vec{j}\mathrm{d}\vec{S} = -\frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} \quad (13)$$

$$q \rightarrow \int_V \rho \mathrm{d}V$$

$$\oint_S \vec{j}\mathrm{d}\vec{S} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_V \rho \mathrm{d}V = -\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t}\mathrm{d}V \quad (14)$$

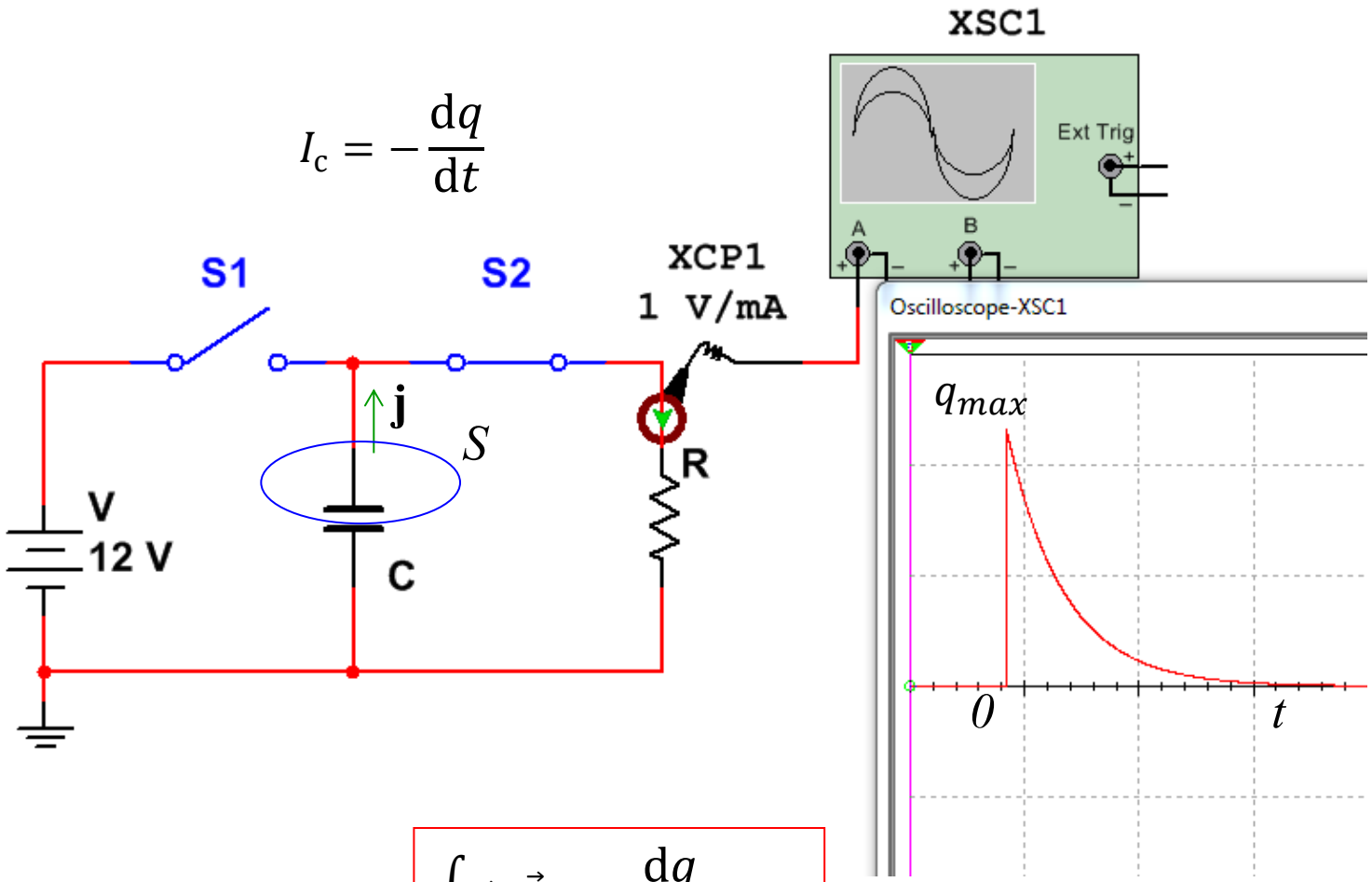
$$\nabla \vec{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (15)$$

Электр зарядының сақталу заңы

$\mathrm{d}\vec{S}$ – элементар ауданша векторы

Ток тығыздығы векторының ағыны

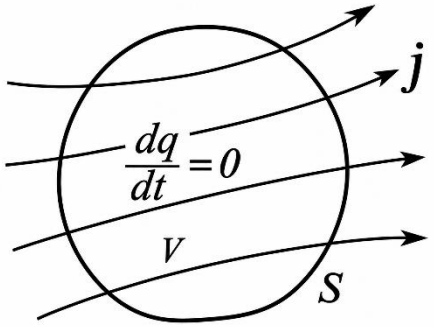
$$I_c = -\frac{dq}{dt}$$



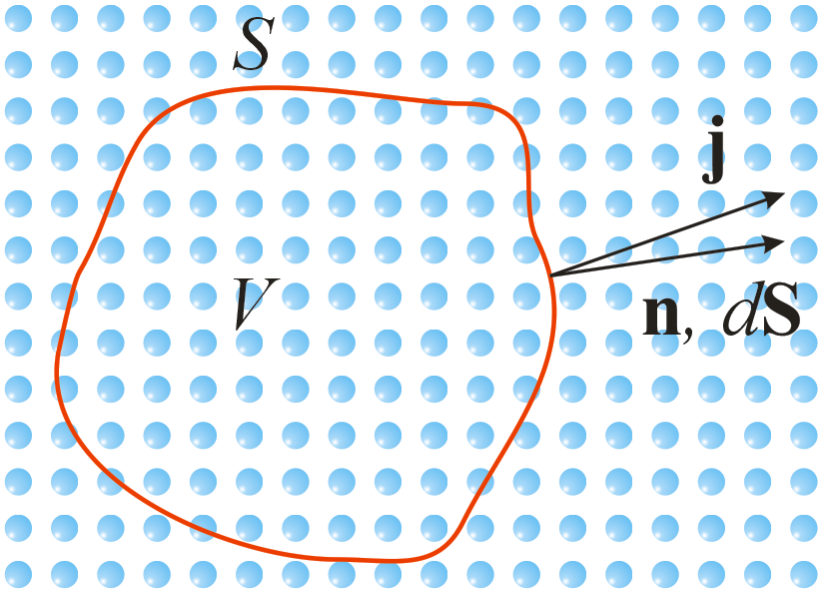
$$\oint \vec{j} d\vec{S} = -\frac{dq}{dt} \quad (13)$$

q_{max} – компенсацияланбаған зарядтың максимум шамасы

Тұтас өткізгіш денедегі ток. Үзіліссіздік теңдеуі. Ток тығыздығы векторының ағыны



7 сурет



Стационар (тұрақты) ток жағдайында, кеңістіктегі зарядтың таралуы өзгеріссіз

$$\oint_S \vec{j}\,\mathrm{d}\vec{S} = 0 \quad (16)$$

Стационар (тұрақты) ток жағдайында, тығыздық векторының көзі жоқ, ол еш жерде басталмайды және аяқталмайды

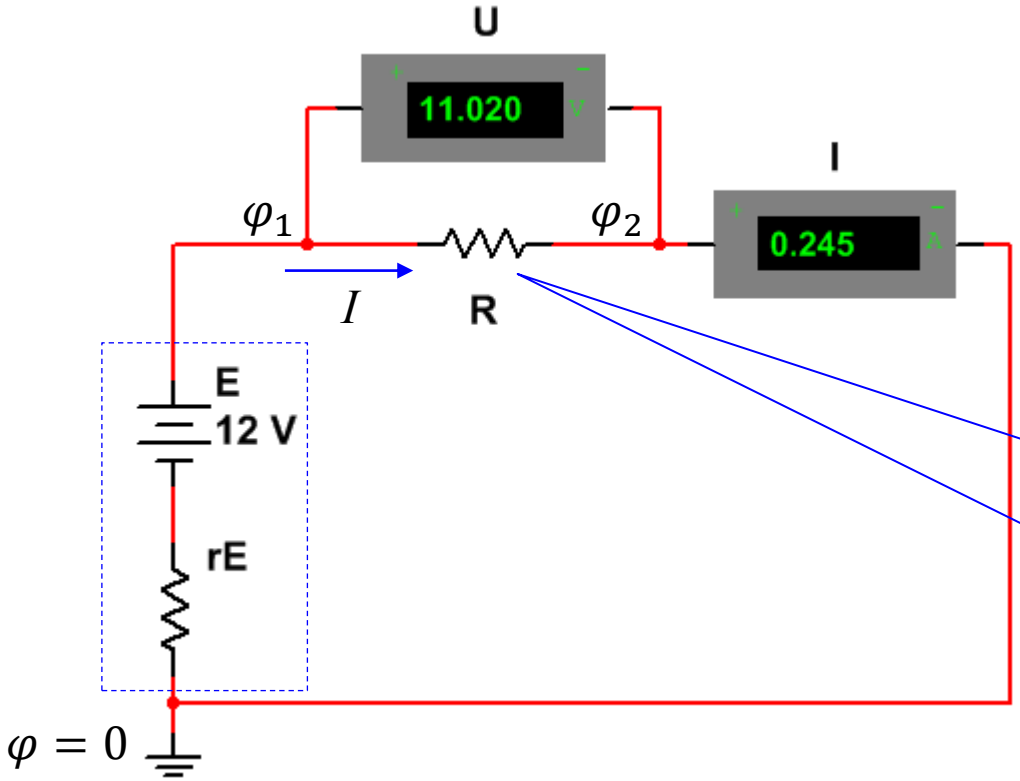
$$\nabla\vec{j} = 0 \quad (17)$$

Эксперименттік жолмен ашылған
өткізгіштің біртекті бөлігі үшін Ом заңы

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} = \frac{U}{R} \quad (18)$$



Геóрг Сúмон Ом
(1787-1854)



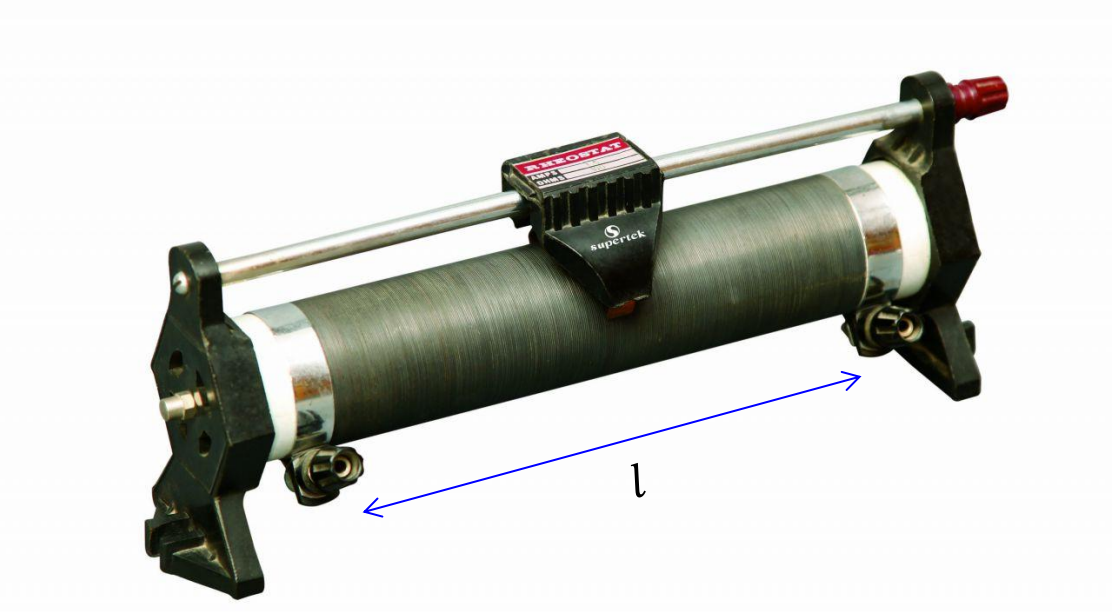


Электр кедергісі.
Резистор

rE – ЭҚК-нің ішкі кедергісі

Электр кедергісі. Резистор. Реостат

$$R = \rho \frac{l}{S} \text{ [Ом]} \quad (19)$$



8 сурет. Реостат

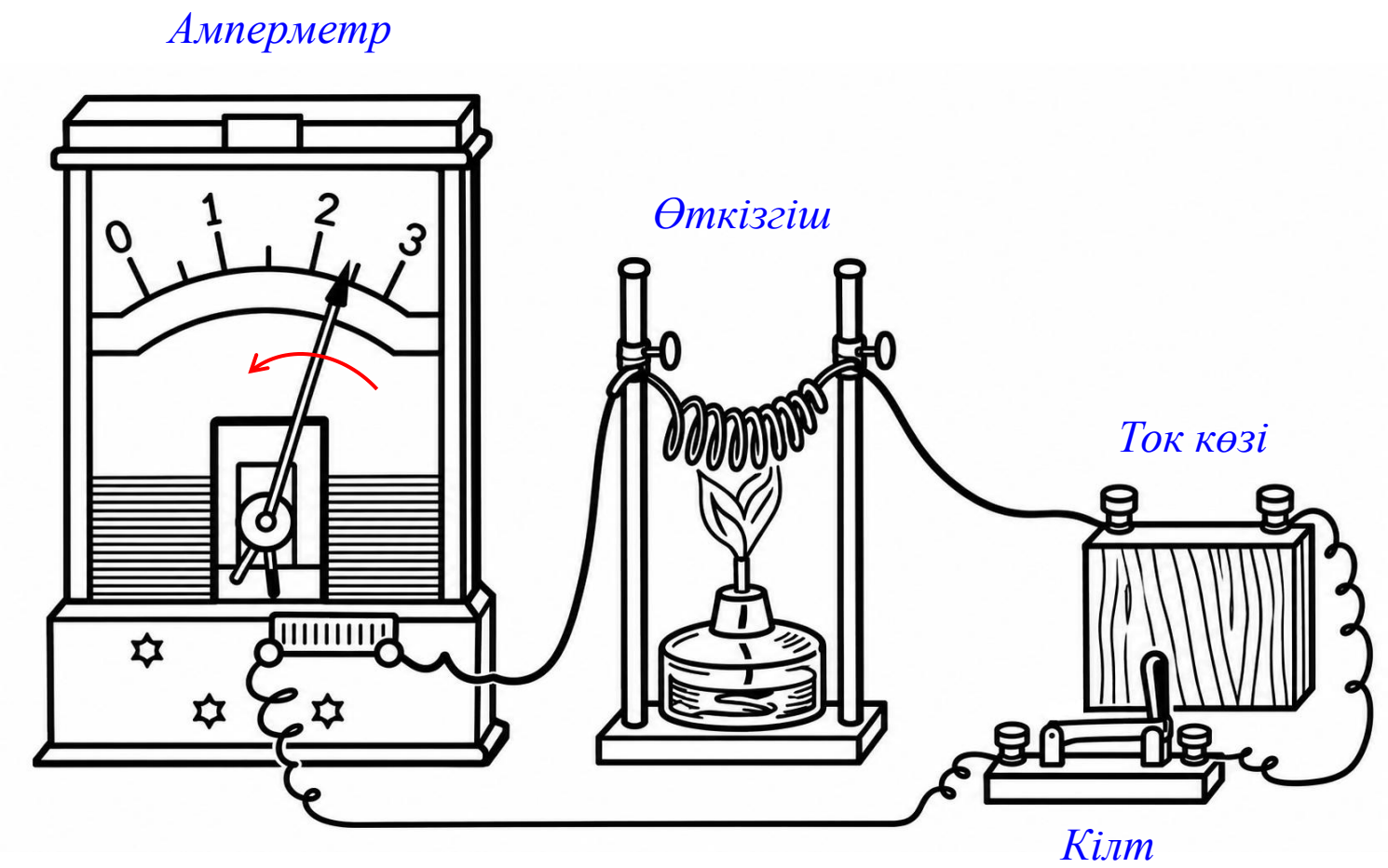
$$S = \frac{\pi D^2}{4} \text{ [м}^2\text{]}$$

$$\rho_{\text{нихром}} = 1{,}1 \cdot 10^{-6} \text{ [Ом} \cdot \text{м]}$$

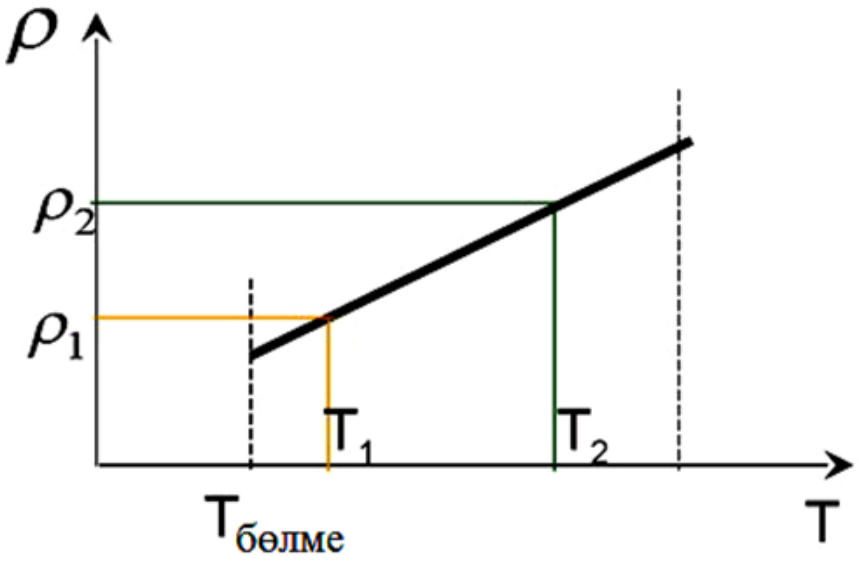
$$I = \frac{US}{\rho l} \quad (20)$$

ρ – меншікті электр кедергісі; l – өткізгіштің ұзындығы; S – көлденең қима ауданы

Электр өткізгіштіктің температурадан тәуелділігін зерттеу



Электр өткізгіштіктің температурадан тәуелділігі



9 сурет

$$\rho = \rho_{\text{бөлме}}[1 + \alpha(T - T_{\text{бөлме}})] \ (21)$$

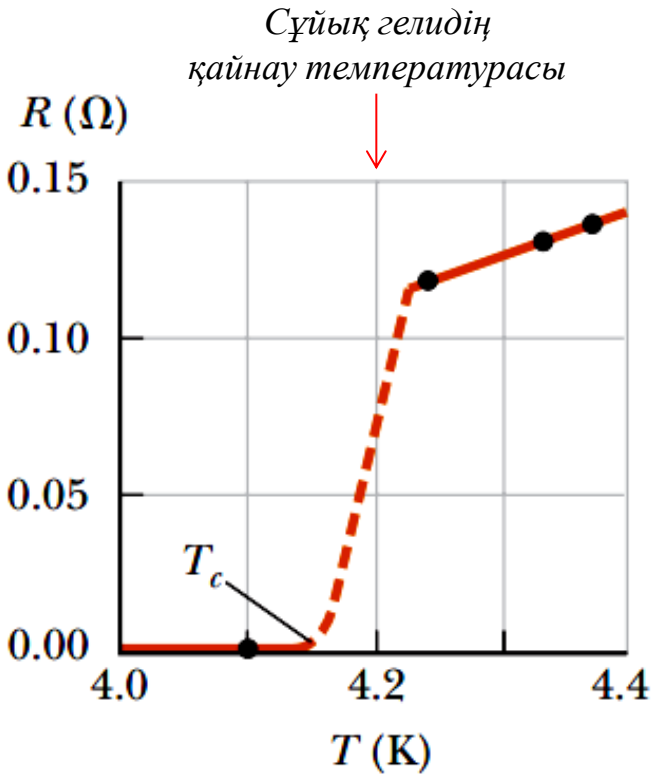
$$\alpha = \frac{1}{\rho}\frac{\Delta\rho}{\Delta T}$$

$$R = R_{\text{бөлме}}[1 + \alpha(T - T_{\text{бөлме}})] \ (22)$$

$$\alpha_{\text{нихром (20)}} = 0{,}2 \cdot 10^{-3}\ [\text{К}^{-1}]$$

α – кедергінің температуралық коэффициенті, температураға кері тәуелді шама

Асқын электр өткізгіштік – кванттық құбылыс



Material	T_c(K)
Zn	0.88
Al	1.19
Sn	3.72
Hg	4.15
Pb	7.18
Nb	9.46
Nb_3Sn	18.05
Nb_3Ge	23.2
$YBa_2Cu_3O_7$	90
Bi–Sr–Ca–Cu–O	105
Tl–Ba–Ca–Cu–O	125
$HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$	134

T_c – критикалық температура

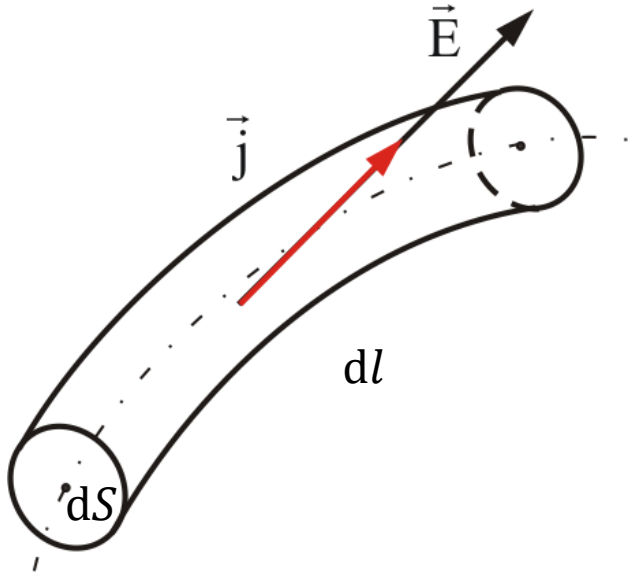
Дифференциалдық формадағы Ом заңы.
j және E векторлары арасындағы байланыс

$$j\mathrm{d}S = I = \frac{U}{R} = \frac{E\mathrm{d}l}{\rho\frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}S}} \quad (23)$$

$$\vec{j} = \frac{1}{\rho}\vec{E} \quad (24)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

$$\vec{j} = \sigma\vec{E} \quad (25)$$



10 сурет. Векторлар коллинеарлы

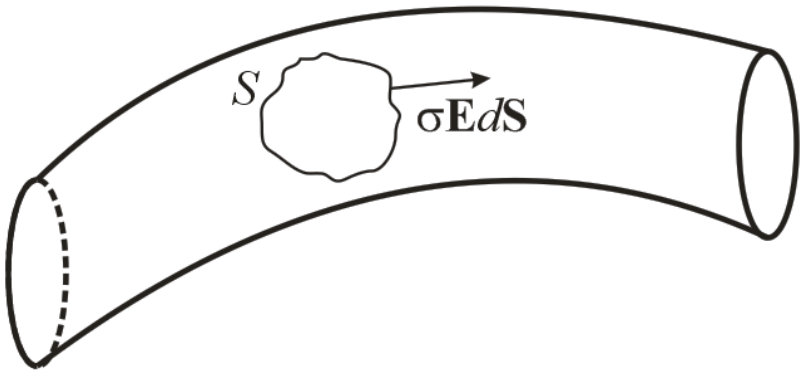
σ – меншікті электр өткізгіштік

Тогы бар өткізгіш ішіндегі заряд туралы.

Тұрақты токты біртекті өткізгіш ішінде артық заряд болмайды

$$\oint_S \mathbf{j}\,d\mathbf{S} = 0 \quad (16) \qquad \mathbf{j} = \sigma\mathbf{E} \quad (25)$$

$$\sigma\oint_S \mathbf{E}\,d\mathbf{S} = 0 \quad (26)$$

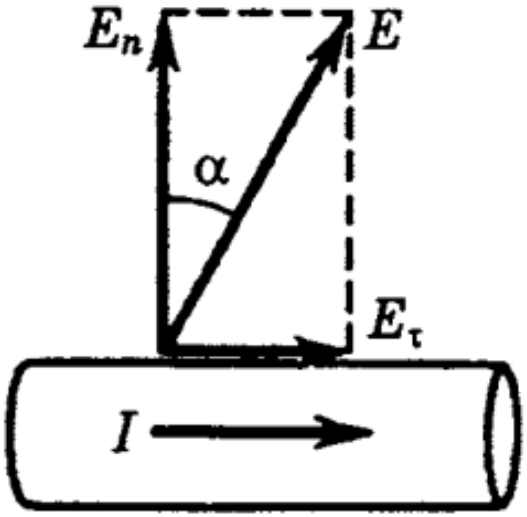


11 сурет

Компенсацияланбаған заряд тек өткізгіштің бетінде ғана пайда болуы мүмкін

Тогы бар өткізгіштің электр өрісі

Компенсацияланбаған заряд тек өткізгіштің бетінде ғана пайда болады



12 сурет

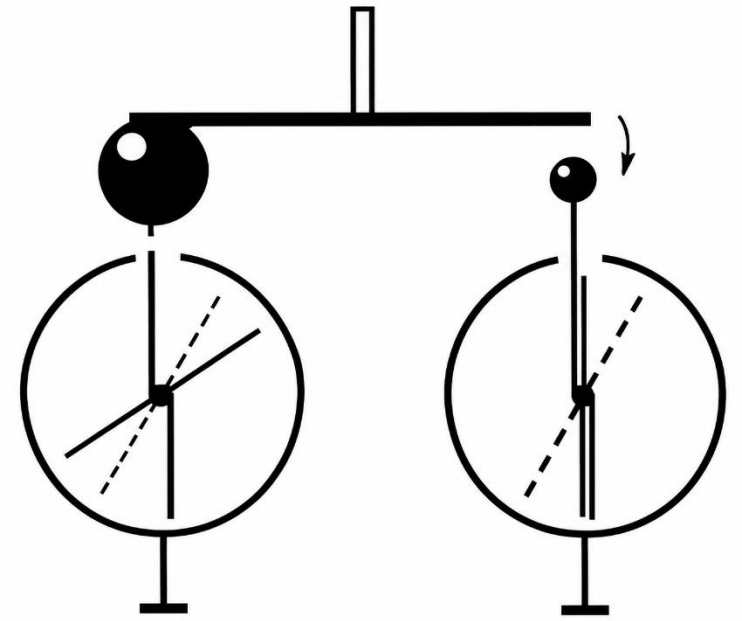
$$E_n = \sigma / \varepsilon_0$$

$$E_{\tau_1} = E_{\tau_2}$$

Е векторының тангенциал құраушылары үздіксіз

Тогы бар өткізгіш көлемінде өріс кернеулігі нөлге тең емес, себебі оны тудыратын зарядтар қозғалыста болады

Сыртқы (бөгде) күштер



13 сурет. Электр статикалық күш әсері

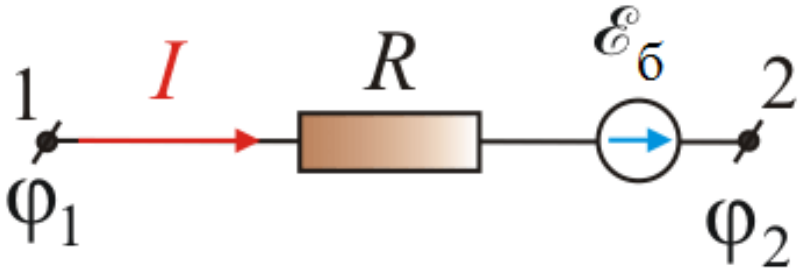
$$\vec{F} = \vec{F}_{\text{кул}} + \vec{F}_{\text{сырт}} = q\left(\vec{E}_{\text{кул}} + \vec{E}_{\text{сырт}}\right). \quad (27)$$

Тізбектің кез-келген нүктесіндегі электр өрісінің кернеулігі осы жердегі кулондық күш өрісі мен бөгде күштер өрісінің векторлық қосындысына тең

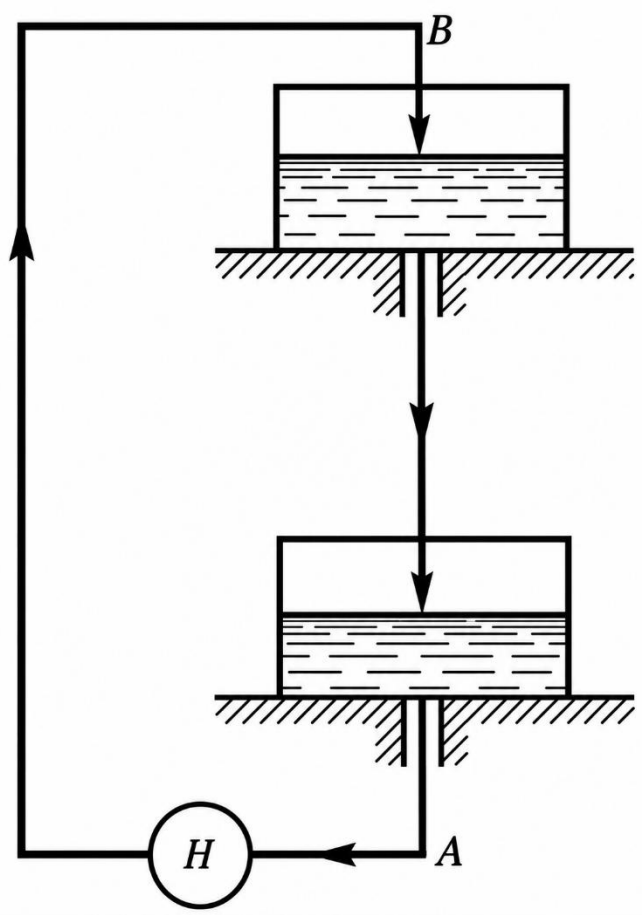
Сыртқы күштер. Ом заңының жалпылама түрі

$$\vec{j} = \sigma\left(\vec{E}_{\text{кул}} + \vec{E}_{\text{сырт}}\right). \quad (28)$$

Дифференциалдық формадағы жалпыланған Ом заңы



Сыртқы (бөгде) күштердің табиғаты әртүрлі, олар өткізгіш бөлігінің химиялық (гальваникалық элементтер, акумуляторлар) және физикалық (термо-, фотоэлементтер) біртекті болмауымен байланысты



14 сурет. Сыртқы күш әсерінің моделі

Сыртқы (бөгде) күштер көзі







15 сурет

Ток көзі

- Химиялық (Вольта бағаны, 1800 ж.)
- Физикалық (Фарадей заңы, 1831 ж.)



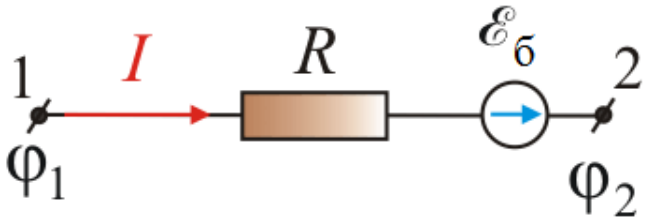
16 сурет



17 сурет

Тізбектің біртекті емес бөлігі үшін Ом заңы

Бойымен ток жүретін ұзындығы 1-2 болатын жіңішке өткізгіш сымды қарастырамыз



$$\vec{j} = \sigma\left(\vec{E}_{\text{кул}} + \vec{E}_{\text{сырт}}\right). \quad (28)$$

18 сурет. Біртекті емес тізбек

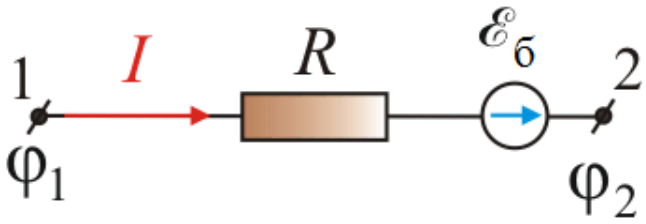
$$\int_1^2 \frac{\vec{j}d\vec{l}}{\sigma} = \int_1^2 \vec{E}_{\text{кул}}d\vec{l} + \int_1^2 \vec{E}_{\text{сырт}}d\vec{l}\,. \quad (29)$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho}; \qquad \vec{j}d\vec{l} = j_l dl; \qquad j_l = I/S$$

Бұл жерде j_l ток күші сияқты алгебралық шама. Сондықтан, егер $\vec{j} \uparrow\uparrow d\vec{l}$ болса, онда $j_l > 0$. Ал $\vec{j} \downarrow\uparrow d\vec{l}$ болса, онда $j_l < 0$.

j_l – $d\vec{l}$ векторы бағытындағы $\vec{j}$ векторының проекциясы

Тізбектің біртекті емес бөлігі үшін Ом заңы



18 сурет. Біртекті емес тізбек

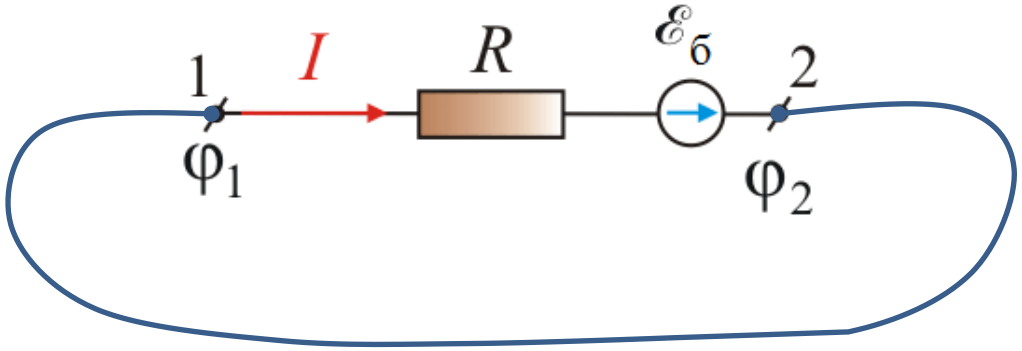
$$\int_1^2 \frac{\vec{j}d\vec{l}}{\sigma} = \int_1^2 \vec{E}_{\text{кул}}d\vec{l} + \int_1^2 \vec{E}_{\text{сырт}}d\vec{l}\,. \quad (29)$$

$$\int_1^2 \frac{\vec{j}d\vec{l}}{\sigma} = I\int_1^2 \rho\frac{dl}{S}\,. \quad (30)$$

$$RI = \varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon_{12}\,. \quad (31)$$

Бұл – тізбектің біртекті емес бөлігі үшін Ом заңы. 1-ден 2 нүктесіне алынған бағыт оң деп есептелінеді.

Тізбектің біртекті емес бөлігі үшін Ом заңы



19 сурет. Тұйықталған тізбек үшін $\varphi_1 = \varphi_2$ және $I \neq 0$

$$RI = \varepsilon_{12}. (32)$$

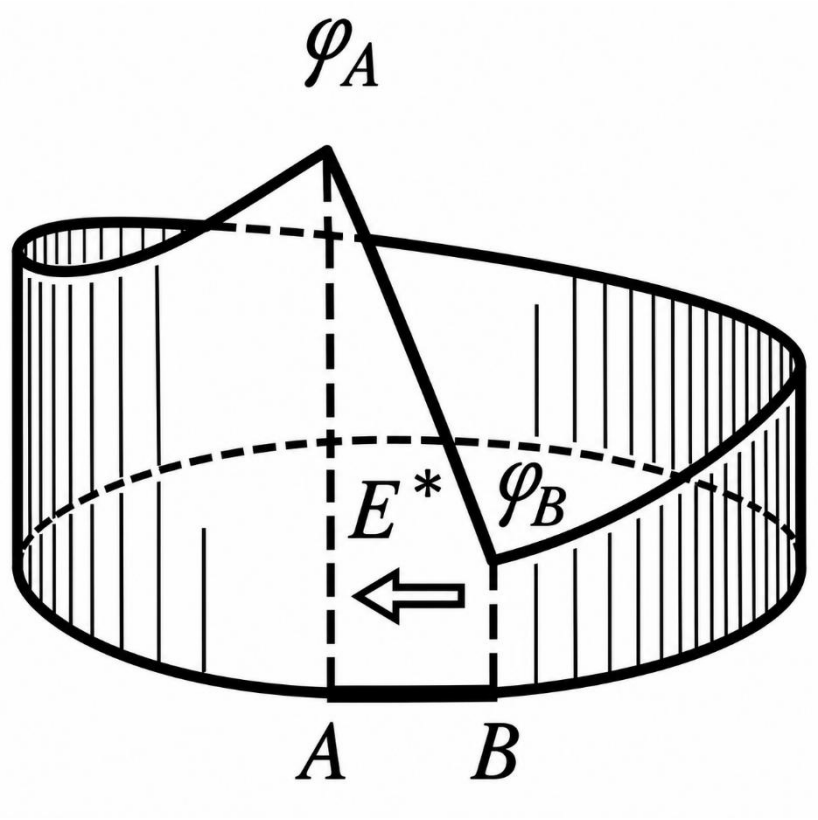


20 сурет. Тұйықталмаған тізбек үшін $I = 0$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \varepsilon_{12} = 1{,}5 \text{ В}$$

R – тұйық тізбектің толық кедергісі, ε_{12} – тізбектегі жекеленген ЭҚК-нің алгебралық суммасы

Сыртқы күші бар тұйық тізбектің потенциалдық диаграммасы

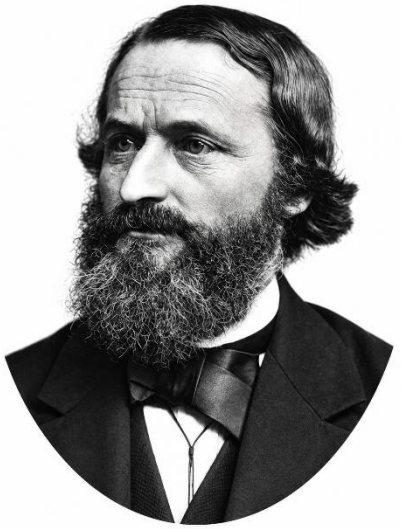


21 сурет. А оң, ал В теріс потенциалды нүктелер (ұштар)

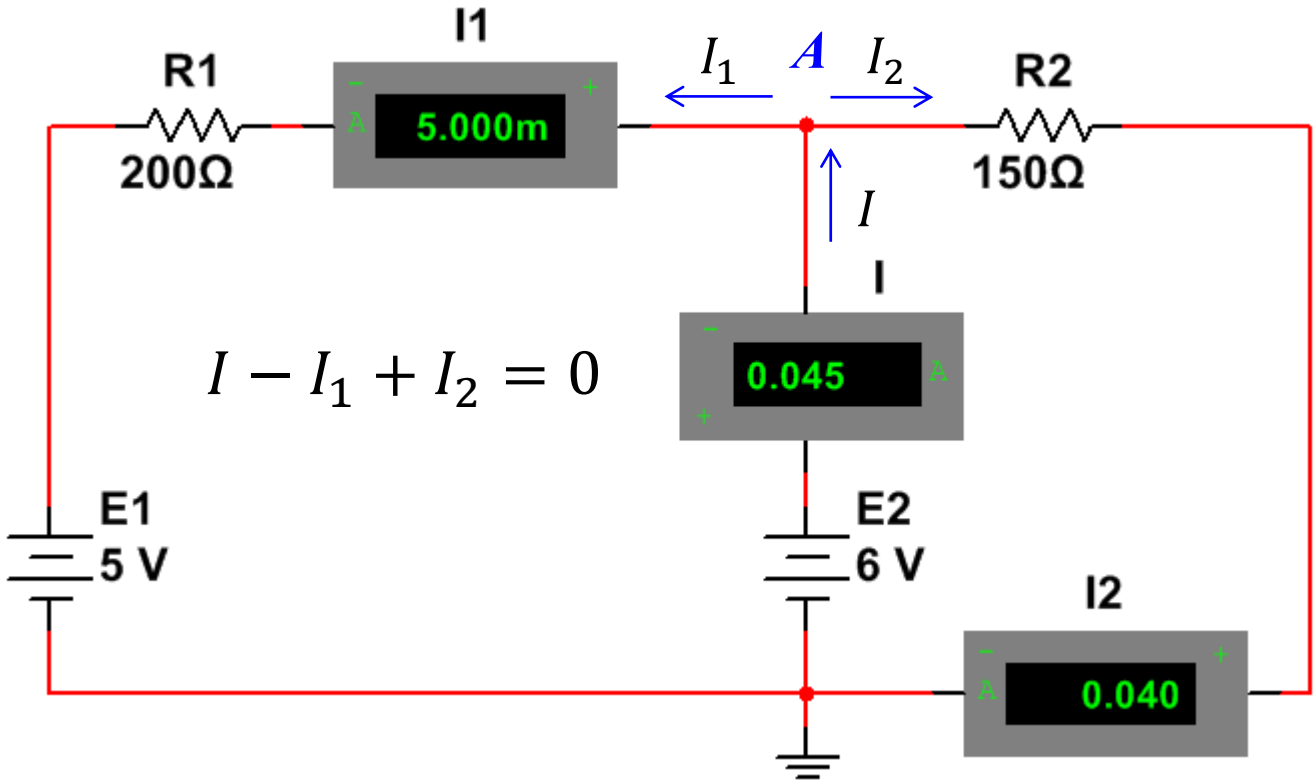
Электр тізбегі үшін Кирхгоф ережелері

$$\sum I_k = 0\,.(33)$$

Тізбек түйіндегі токтардың алгебралық суммасы нөлге тең



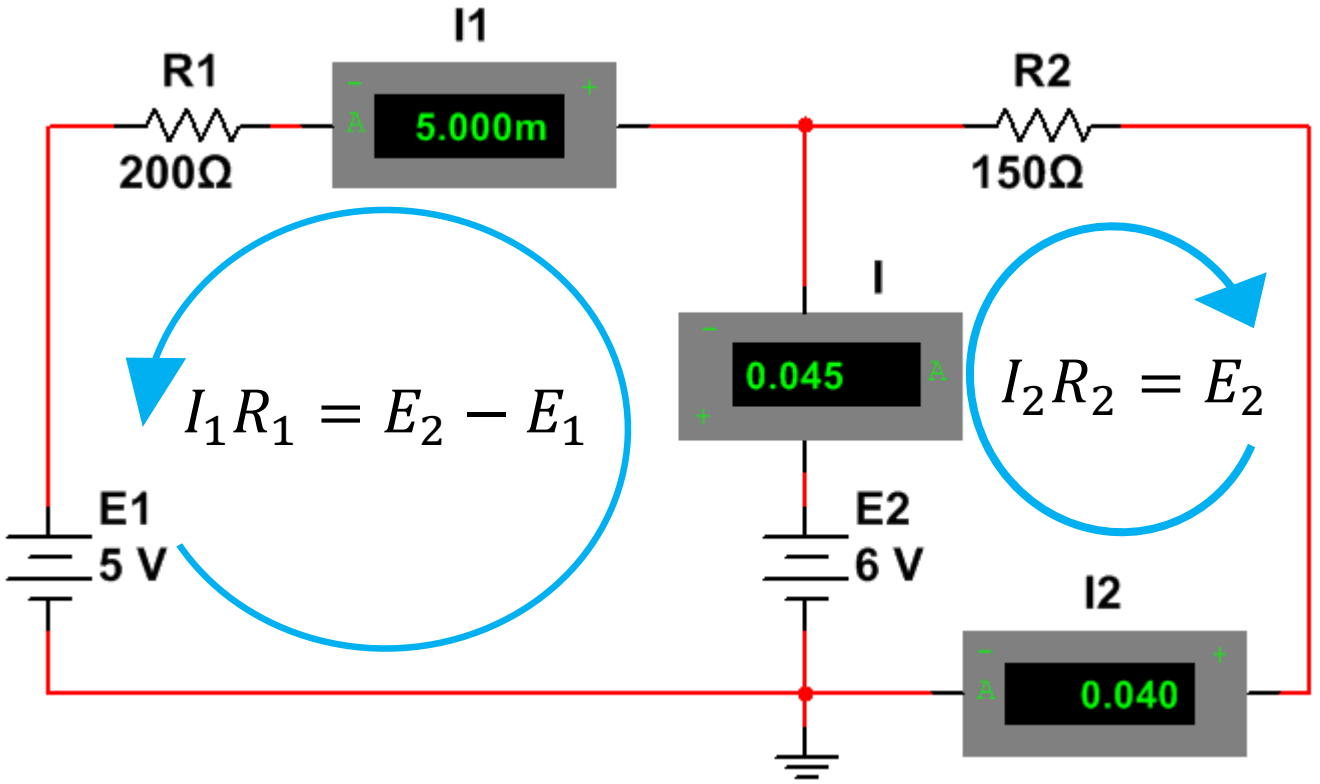
Густав Роберт Ки́рхгоф
(1824-1887)



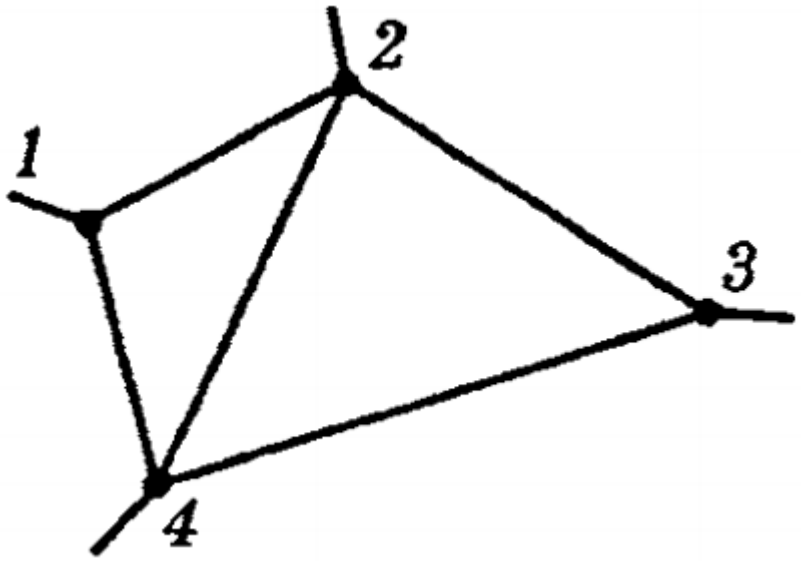
Электр тізбегі үшін Кирхгоф ережелері

$$\sum I_k R_k = \sum \varepsilon_k \,. (34)$$

Жеке контурдағы ток күштерімен ол жердегі кедергілердің көбейтіндісінің алгебралық суммасы осы контурға әсер ететін ЭҚК алгебралық суммасына тең болады



Кирхгоф ережелерін қолданған кездегі теңдеулер саны



22 сурет. Бұл үшін барлығы бес теңдеу

$$\sum I_k = 0 . (33)$$

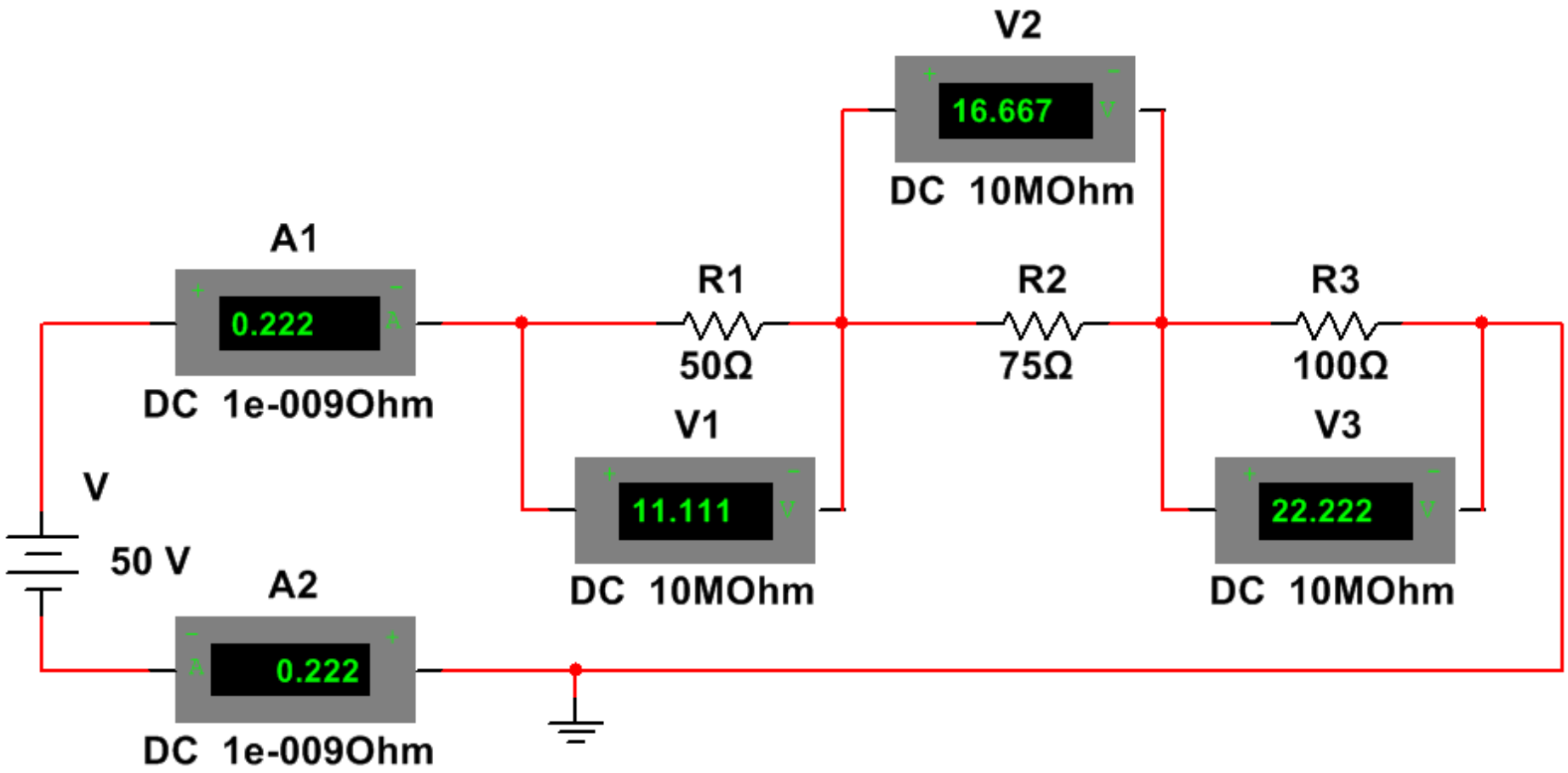
Түйіндер саны: $n - 1$

$$\sum I_k R_k = \sum \varepsilon_k . (34)$$

124, 234, ~~1234~~

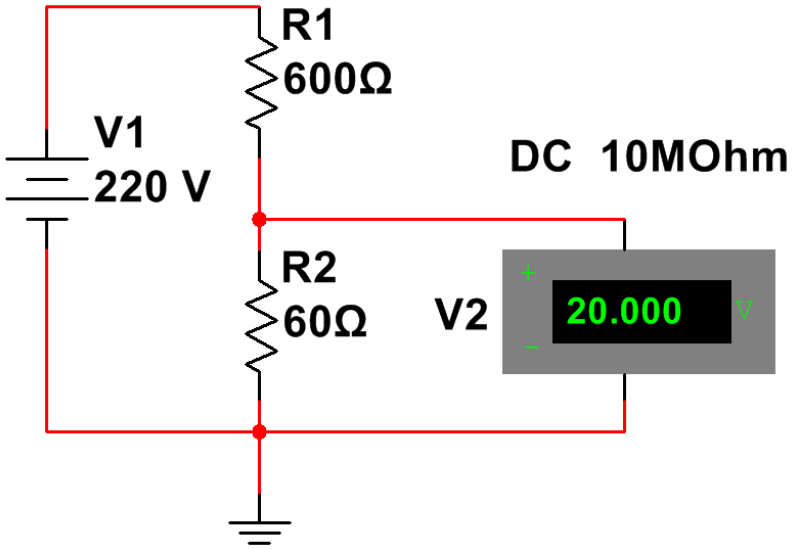
124, 1234, ~~234~~

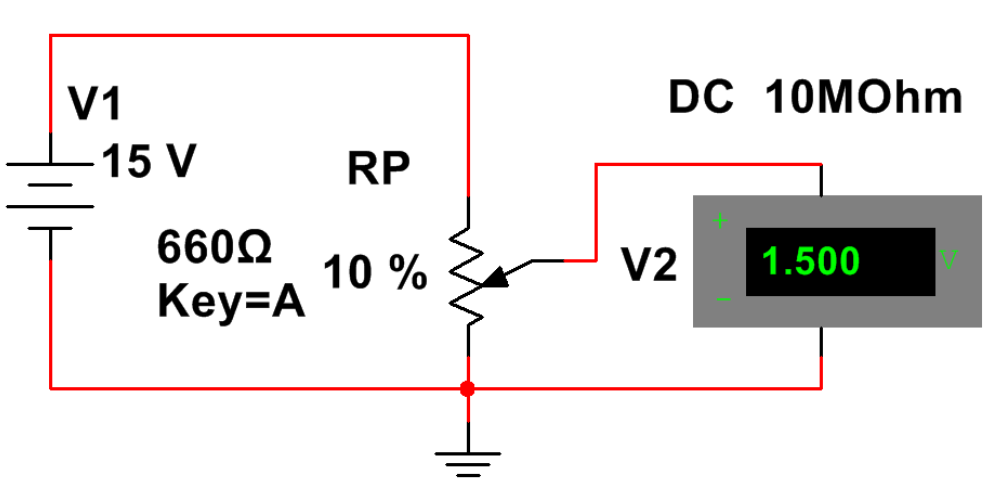
Резисторларды тізбектеп жалғау



$$R = R_1 + R_2 + R_3 \qquad V = V_1 + V_2 + V_3$$

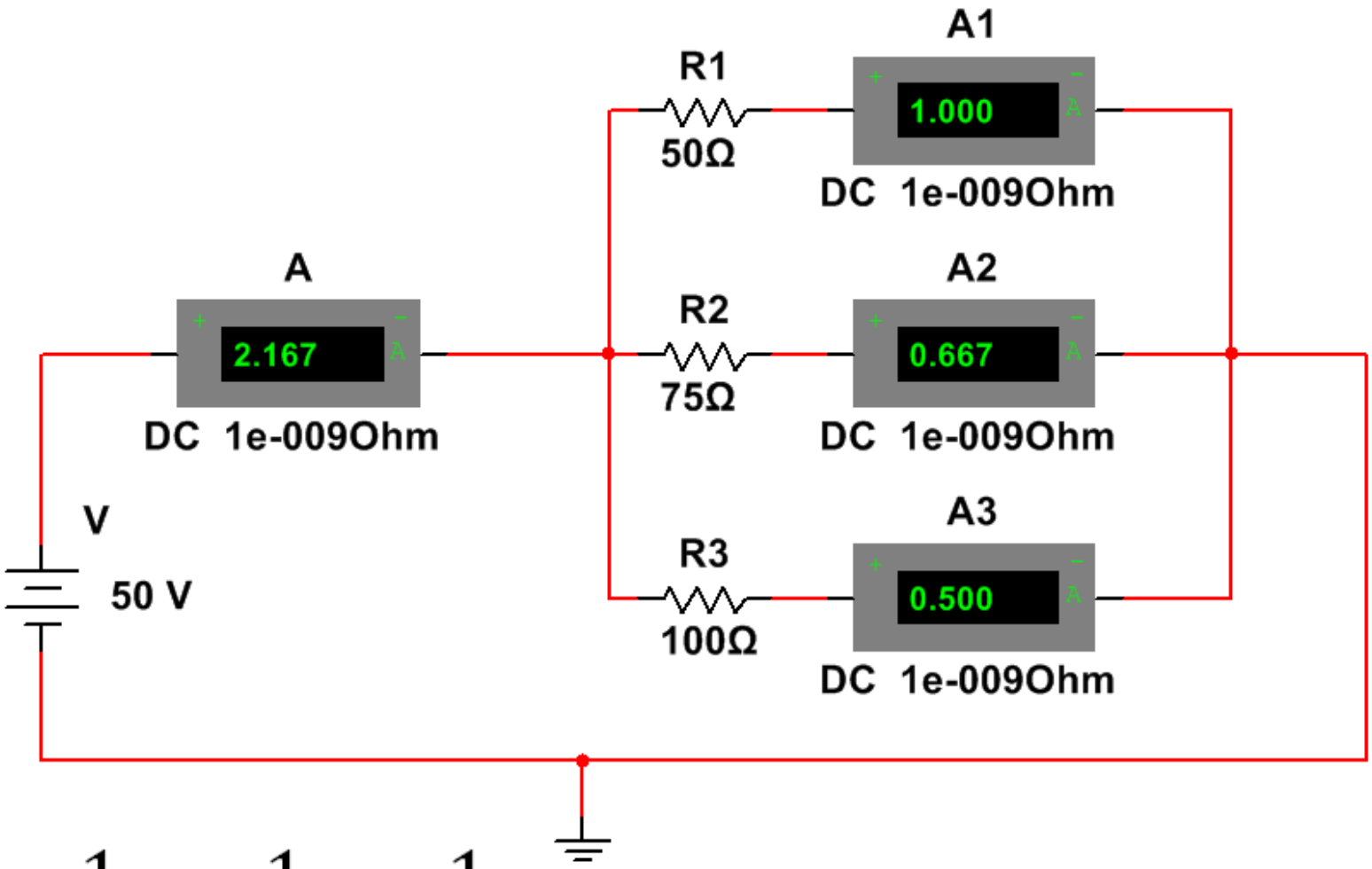
Резисторлар көмегімен кернеуді бөлу





$$V_2 = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) \cdot V_1$$

Резисторларды параллель жалғау



$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

Джоуль (1841) – Ленц (1842) заңы

Электр тогының жылулық әсерінің заңдылығын анықтаған



Джеймс Пре́скотт Джо́уль
(1818-1889)



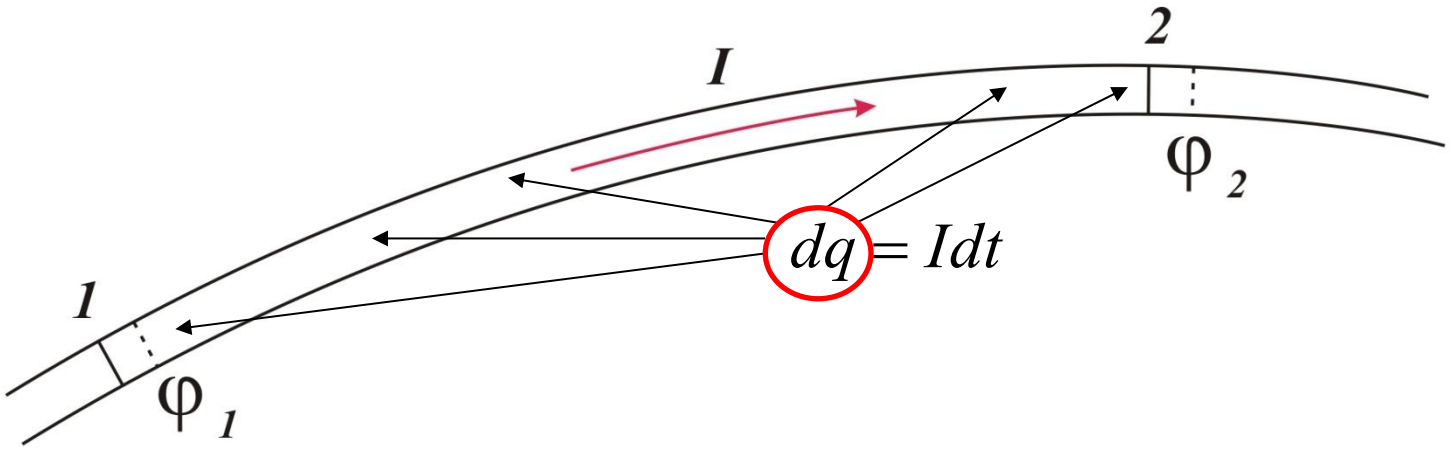
Эмилий Христианович Ленц
(1804-1865)

http://www.ess-ltd.ru/elektro/djoul-lenc.php

Джоуль – Ленц заңы

Өткізгіш бойымен ток жүрген кездегі *бірлік уақытта* бөлінетін жылу мөлшері?

Энергияның сақталу заңы және Ом заңы негізінде анықтаймыз



$$\delta A = \mathrm{d}q(\varphi_1 - \varphi_2) = I(\varphi_1 - \varphi_2)\mathrm{d}t. (35)$$

Энергияның сақталу заңына сай

$$\delta A = \dot{Q}\mathrm{d}t \ (36)$$

$$\dot{Q} = I(\varphi_1 - \varphi_2) \ (37)$$

Джоуль – Ленц заңының формуласы

Бірлік уақытта бөлінетін жылу

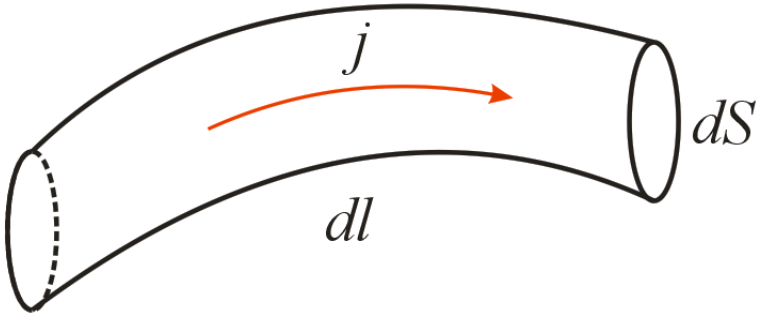
$$\dot{Q} = I(\varphi_1 - \varphi_2) \quad (37)$$

$$\varphi_1 - \varphi_2 = RI$$

$$\dot{Q} = RI^2. \quad (38)$$

Жергілікті формадағы Джоуль – Ленц заңы,

өткізгіштің қандайда бір бөлігінде бөлінетін жылуды сипаттайтын заң



Осы өткізгіш бөлігінен *dt* уақытта бөлінетін жылу мөлшері:

$$\delta Q = RI^2 dt = \frac{\rho dl}{dS}\left(jdS\right)^2 dt = \rho j^2 dV dt \quad (39)$$

$$dV = dSdl$$

Токтың меншікті жылу қуаты: $\dot{Q}_{мен} = \rho j^2$ (40)

Электр плиткасы



$$\frac{dQ}{dt} = I^2 R \left[\frac{Дж}{сек} = Ватт \right]$$

Метал өткізгіштердің электрондық теориясының негізгі заңдылықтары

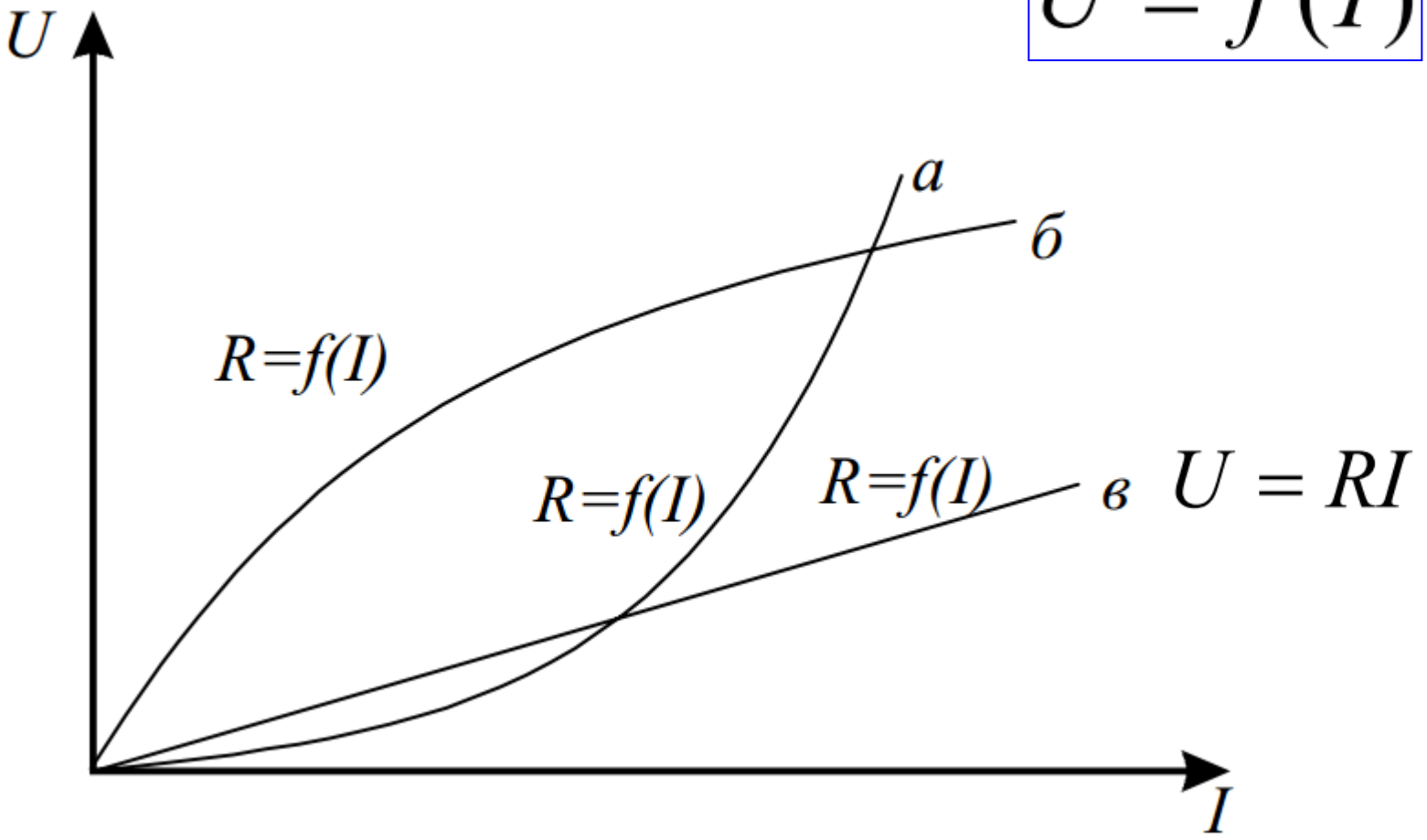
- Металды келесі модель ретінде қарастыруға болады, яғни, бос электрондардан тұратын идеал электрондық газға батырылған иондардың кристалдық торы. Металдардың барлық атомдары иондалған деп есептелінеді, осылайша ол жердегі бос электрондардың концентрациясы атомдардікімен шамалас $n_e \approx 10^{23} - 10^{29}$ м$^{-3}$ және температурадан тәуелсіз.
- Металдардағы бос электрондар үздіксіз хаосты (жылулық) қозғалыста болады.
- Металдарда электр тогы тек қана бос электрондардың реттелген қозғалысы (дрейфі) кезінде туады.

Метал өткізгіштердің электрондық теориясының негізгі заңдылықтары

- Электрондар кристалл тордың түйіндерінде жылулық тербелістегі иондарға (фонондар) соқтығысқан кезде оларға кинетикалық энергиясының бір бөлігін береді, нәтижесінде бойынан ток жүріп тұрған өткізгіш қызады $Q = I^2Rt$, яғни электр энергиясы жылулыққа қайтарымсыз түрленеді.
- Заттардың ішкі құрылымы әртүрлі болғандандықтан, олардың кедергілері де соған сәйкес (ρ −меншікті электр кедергісі).
- Барлық металдарда орта температурасы өскен кезде кедергілері жоғарылайды, ал төмендеген кезде азаяды (асқын өткізгіштік), $R = R_0(1 + \alpha t)$.

Вольтамперлік сипаттама (ВАС)

$$U = f(I)$$



а-металл (шам), *б*-жартылай өткізгіш,
в-константан Cu 59%+Ni 39-41%+Mn 1-2%.