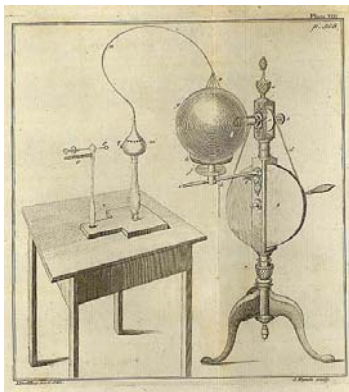


5. ПОСТОЈАНА ЕЛЕКТРИЧНА СТРУЈА



Еден вид електростатска машина.

Сè до 1800 година науката за електрицитетот се занимавала, главно, со добивање на статички електрицитет со помош на триење. Во претходните столетија биле конструирани машини кои овозможувале добивање на многу високи потенцијали. Со нив се добивале силни празнења кои кај луѓето предизвикувале восхитувања, но практична примена на тие машини немало. Големи впечатоци кај луѓето предизвикувале природните електрични појави- молњата или светењето на шилестите предмети на бродовите во време на луњи. Меѓутоа, природата на

овие појави уште долго време не им била јасна. Голем чекор бил направен од Франклин, кој во 1752 година го извел познатиот експеримент со змејот со кој успеал да докаже дека молњата е всушност гасно празнење, исто како и искрата што прескокнува од едно на друго наелектризирано тело.

Во 1800 година дошло до откритие од огромно практично значење. Таа година Алесандро Волта (Alessandro Volta, 1745-1827) го конструирал првиот извор на електрична електромоторна сила, популарно наречен извор на струја. Тоа започнало нова епоха којашто целосно ја преобразила нашата цивилизација и се втемелило во целата современа техника, комуникациите, медицината, науката и општо во целокупниот наш живот. Сиот наш живот е нераскинливо врзан со користењето на електричната струја.

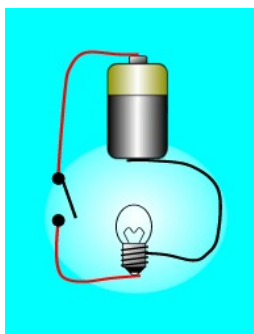
5.1. ЕЛЕКТРИЧНА СТРУЈА. ЈАЧИНА НА СТРУЈА. ГУСТИНА НА СТРУЈАТА

Потенцијалната разлика што ја создавале порано конструираниите електростатски машини, кои се празнеле преку искра, била многу голема, но полнежот што притоа преминувал од едното тело на друго бил мал. Волта успеал (подоцна ќе објасниме како) да направи уред со две метални електроди од различна природа, во кој на едната електрода постојано се натрупувал полнеж од еден знак, а на другата полнеж со спротивен знак. Кога двата краја на електродите од овој уред (*извор на електричната струја*) ќе се спојат со спроводник, односно кога ќе

протече струја, тогаш создадената потенцијална разлика се самообновува. Извор на струја често се нарекува **батерија**. По откритието на Волта биле конструирани многу помоќни батерии.

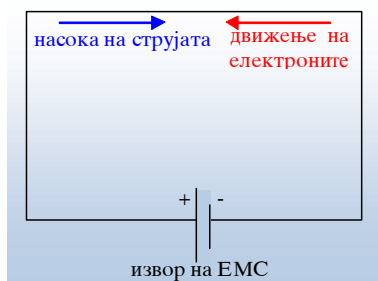
Набргу по откритието на Волтината батерија, станало јасно дека потенцијалната разлика се појавува благодарение на претворањето на хемиската енергија во електрична. Денес се произведуваат најразлични електрични елементи и батерии од различен вид - од цепни батерии (суви елементи) до автомобилски акумулаторски батерии. Сите такви извори на напон, во принцип се состојат од две прачки направени од различни спроводници, потопени во некој електролит. За механизмот на создавањето на постојана потенцијална разлика на двата пола од изворот поопширно ќе зборуваме подоцна.

Потенцијалната разлика меѓу раздвоените полови (клеми) од батеријата се нарекува **електромоторна сила** (ЕМС) и се бележи со $\mathcal{E}$ (не треба да се меша со јачината на електричното поле). Било кој уред кој е способен да подржува постојана потенцијална разлика и да овозможува движење на електрични полнежи во надворешното коло се вика **извор на ЕМС**.



Сл. 5.1(а). Едноставно електрично коло

Со приклучување на спроводници на клемите од една батерија и еден потрошувач се добива едноставно електрично коло (сл. 5.1а). Во принципните шеми, батеријата се означува со две еднакво дебели црти со различна должина (види сл. 5.2б) од кои подолгата претставува позитивен пол, а покусата негативен. По поврзувањето доаѓа до движење на електричните полнежи кое се нарекува **електрична струја**. Струјата може да тече како низ тврди тела (метали, полупроводници), така и во течности (електролити), во гасови и низ вакуум. Течењето струја низ гасови обично се нарекува гасно празнење. За да низ некое тело тече електрична струја, нужно е во него



Сл.5.1(б). Насока на струјата

да има слободни наелектризирани честички, кои можат во него да се поместуваат. Овие честички се нарекуваат **носители на струјата**. Тоа може да се електрони, јони, па дури и макроскопски честички што носат полнеж (на пример наелектризирани честички од прашина или капки течност). Течењето струја кај тврдите тела е условено со движењето на слободни електрони. Во спроводните

течности (електролитите), носителите на струјата се разноимените јони. Кај гасовите, пак, носители на струјата се слободни електрони и јони.

Насока на електричната струја условно е земена онаа по која се движат позитивните полнежи. Поради тоа се зема дека струјата во металите има спротивна насока од движењето на носителите на струјата-електроните (сл.5.3 б). Линиите по должината на кои доаѓа до движење на носителите на струја се нарекуваат *струјни линии*.

Основните величини што ја карактеризираат електричната струја се: **јачина на електрична струја I** (или само **електрична струја**) и **густина на струјата $\vec{j}$** .

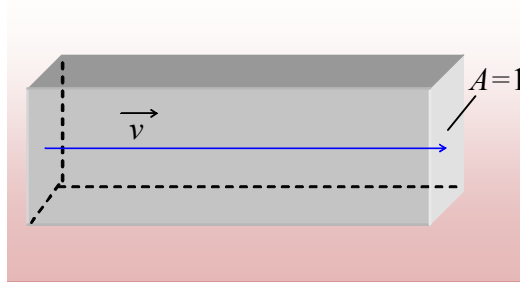
Јачина на електричната струја во спроводникот е резултатниот електричен полнеж кој во единица време поминува низ даден пресек на спроводникот.

Густина на струјата претставува електричен полнеж што поминува во единица време низ единица површина нормална на насоката на движењето на носителите на струја. Алтернативно оваа величина може да се искаже како: густина на струјата е јачина на струја на единица плошина нормална на струјните линии).

Низ еден спроводник струја ќе потече само ако носителите на струјата се најдат во електрично поле. Носителите на струјата, на пример електроните во тврдите тела, се наоѓаат во состојба на хаотично топлинско движење со средна брзина на топлинското движење $\vec{u}$. Во отсуство на електрично поле, поради хаотичноста на нивното топлинско движење, бројот на носителите кои случајно поминуваат во спротивните насоки низ која и да било замислена површина од внатрешноста на спроводникот е еднаков, па следува дека средната брзина $\vec{u}=0$, па и струјата е еднаква на нула. Штом ќе се вклучи електричното поле, покрај хаотичното движење, се јавува и насочено движење на струјните носители, т. е. тие добиваат дополнителна средна брзина $\vec{v}$ (дрифтова или дрејфова брзина), па така сега нивната средна брзина е $\vec{u}+\vec{v}$. Но, бидејќи средната вредност на хаотичната е нула ($\vec{u}=0$), тогаш средната брзина на носителите ќе биде дрифтовата брзина ($\vec{v}$).

Да ја најдеме врската меѓу дрифтовата (дрејфовата) брзина $\vec{v}$ и густината на струјата.

Нека во внатрешноста на спроводникот низ кој тече струјата мисловно одделиме површина со единична плоштина која е нормална на струјните линии. Тоа значи дека таа површина е нормална на $\vec{v}$ (сл. 5.2).



Сл. 5.2

Нека зад таа површина замислиме паралелопипед со висина еднаква на средната брзина $\vec{v}$. Тогаш бројот на носителите што во единица време поминуваат низ разгледуваната површина A , ќе биде еднаков на бројот на носителите што се наоѓаат во внатрешноста на

паралелопипедот. Ако со n ја означиме концентрацијата на носителите (бројот на честички во единица волумен), и земеме дека секој носител на струја (електрон) има полнеж e , тогаш за густината на струјата се добива:

$$\vec{j} = ne\vec{v} \quad (5.1)$$

при што $\vec{j}$ е векторска физичка величина чиј правец и насока се поклопува со брзината $\vec{v}$ (брзината на насоченото движење на **позитивните** полнежи). Овде под $\vec{v}$ се подразбира брзина на насоченото дрејфово движење во дадена точка во спроводникот, па соодветно и векторот на густината на струјата се однесува на дадена точка од спроводникот. Ако површината A не е со единична плоштина, тогаш количество електричество dQ кое за време dt поминува низ површината A ќе биде дадено со:

$$dQ = jAdt \quad (5.2)$$

Ако векторот $\vec{j}$ не е нормален на површината A , тогаш треба да се земе само нормалната компонента на векторот $\vec{j}$ врз A . Овде може да се воведи вектор на површина $\vec{A}$, па изразот (5.2) да се запише во поинаква форма од која може да се изведе релација за јачината на струјата I :

$$dQ = \vec{j} \cdot \vec{A} dt \quad (5.3)$$

Оттука за јачината на струјата, која по дефиниција е:

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (5.4)$$

се добива:

$$I = \vec{j} \cdot \vec{A} \quad (5.5)$$

Треба да се напомне дека оваа врска важи само ако во секоја точка од спроводникот густината на струјата е константна. Во спротивен случај, треба да се земе бесконечно мала површина $d\vec{A}$, на која и соодветствува одредена вредност на густината на струјата $\vec{j}$, па тогаш јачината на струјата (dI) ќе биде:

$$dI = \vec{j} d\vec{A} \quad , \quad \text{а оттука} \\ I = \int_A \vec{j} d\vec{A} \quad . \quad (5.6)$$

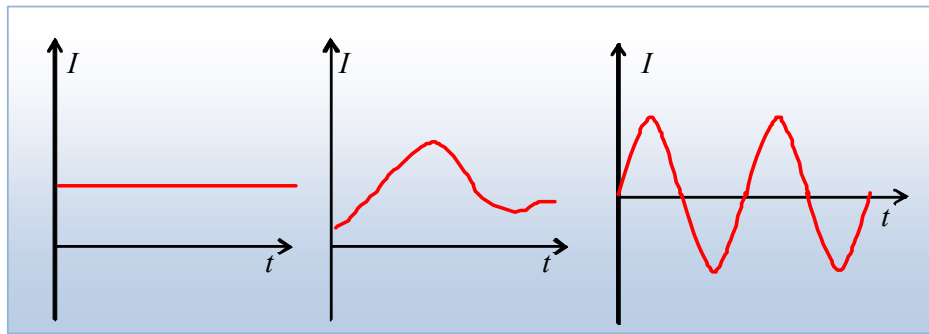
Од скаларниот производ произлегува дека јачината на струјата е скаларна величина. Како што се гледа од релацијата (5.6), таа е еднаква на *флуксот на векторот на густината на струјата*.

Единица за мерење на јачината на струјата е **еден ампер**. Таа е основна единица во SI. Нејзината дефиниција ќе ја дадеме подоцна. Засега можеме да го дадеме следново појаснување. Ако низ напречен пресек на некој спроводник во една секунда поминува електричен полнеж од еден кулон, велиме дека низ спроводникот протекла струја од еден ампер. Јачината на струјата се мери со инструмент, наречен амперметар. Тоа е уред со многу мал внатрешен отпор и секогаш во струјното коло се врзува во серија. Единица за густина на струјата е **ампер на квадратен метар**.

Ако густината на струјата и јачината на струјата не се менуваат во текот на времето, тогаш таквата струја се нарекува **постојана (стационарна) струја**. Често ваквата струја се вика “**права**” струја, бидејќи нејзината графичка зависност на $I=I(t)$ е права линија, паралелна со t -оската (сл. 5.3а). Во англиската литература оваа струја се вика *direct current (DC)*.

Меѓутоа, во текот на времето струјата може да се менува, па таквата струја ја викаме променлива. Но, ако струјата постојано си тече во иста насока, тогаш таквата струја е **еднонасочна променлива струја** (види сл. 5.3б).

Ако струјата ја менува и големината и насоката во општ случај струјата се нарекува **променлива струја**. Доколку таа промена е синусна (косинусна) функција од времето, тогаш струјата се нарекува **наизменична струја**. Оваа струја најмногу се користи во електротехниката, а според англискиот назив “*alternative current*” се означува со AC.



а) Постојана

б) Еднонасочна променлива
струја

в) Наизменична

Сл. 5.3

Изразите за густина и јачината на струјата што ги прикажавме важат само за случаите кога носителите на струјата се од еден вид. Меѓутоа, кај течностите и кај гасовите струјата може да се должи на два вида носители, и тоа и на позитивни и на негативни. Таму имаме честици што се спротивни по полнеж кои се движат во двете спротивни насоки (брзини со спротивен знак) па следува дека производот (Qv) секогаш ќе има ист знак. Тогаш, за јачината на струјата и за густината на струјата ќе важат следниве релации:

$$I = I^+ + I^- \quad \text{и} \quad \vec{j} = Q^+ n^+ \vec{v}^+ + Q^- n^- \vec{v}^- \quad (5.7)$$

каде што Q^+ и Q^- се соодветните полнежи, n^+ и n^- концентрациите а $\vec{v}^+$ и $\vec{v}^-$ брзини на позитивните и негативните носители на струјата. Напомуваме дека векторот на густината на струјата $\vec{j}$ во релацијата (5.7) е насочен исто како и $\vec{v}^+$.

За постојана еднонасочна струја, врската помеѓу полнежот Q , јачината на струјата I и времето t е едноставна:

$$I = \frac{Q}{t} \quad (5.8)$$

Тоа а е релацијата според која се дефинира единицата кулон, како полнеж кој протекувајќи низ напречен пресек од даден спроводник за време од една секунда предизвикува јачина на струја од еден ампер. Оваа дефиниција ние веќе ја имаме дадено.

Пример задача 1

Низ спроводна жица со кружен напречен пресек со дијаметар од 2 mm, тече струја со јачина од 2,5 А. Ако струјата тече 4 min, да се определи:

- колкав електричниот полнеж што поминал низ овој спроводник?
- колкава била густината на струјата?
- колку електрони поминале низ пресекот на спроводникот?

Решение

а) Времето на течење е $\Delta t = 4 \cdot 60 \text{ s} = 240 \text{ s}$.

Полнежот $\Delta Q = I \cdot \Delta t = 2,5 \cdot 240 = 600 \text{ C}$.

б) Густината на струјата е еднаква на:

$$j = \frac{I}{A} = \frac{I}{d^2 \frac{\pi}{4}} = \frac{4I}{d^2 \pi} = \frac{10}{0,002^2 \pi} = 1,59 \cdot 10^6 \frac{\text{A}}{\text{m}^2}$$

в) Бројот на електроните ќе се добие од односот

$$N = \frac{\Delta Q}{e} = \frac{600}{1,6 \cdot 10^{-19}} = 3,75 \cdot 10^{21} \text{ електрони.}$$

Пример задача 2

Да се процени средната дрејфова брзина на електроните кај металите, при максимално можна густина на струја од 10 A/mm^2 . Концентрацијата на електроните да се земе за приближно еднаква на концентрацијата на атомите $n = 10^{28} - 10^{29} \text{ m}^{-3}$.

Решение

Од релацијата 5.1. следува:

$$v = \frac{j}{en} = \frac{10^7}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{28}} \approx 6 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}}{\text{s}} = 6 \frac{\text{mm}}{\text{s}}.$$

Опитите делумно го потврдуваат овој резултат. На прв поглед резултатот изгледа противречен, бидејќи сме сведоци дека при вклучувањето на струјното коло во секојдневното, струјата протекува речиси во истиот момент (светилките истовремено засветуваат). Но, ништо не е парадоксално, бидејќи електричното поле, кое е причина за движењето на полнежите, се воспоставува практично моментално во целиот спроводник. Значи, истовремено се придвижуваат сите електрони, со брзината што ја определуваме. Постои построга квантна теорија на течењето струја, која не е предмет на изучувањето во овој курс, според која за оваа брзина се добиваат нешто поразлични вредности.

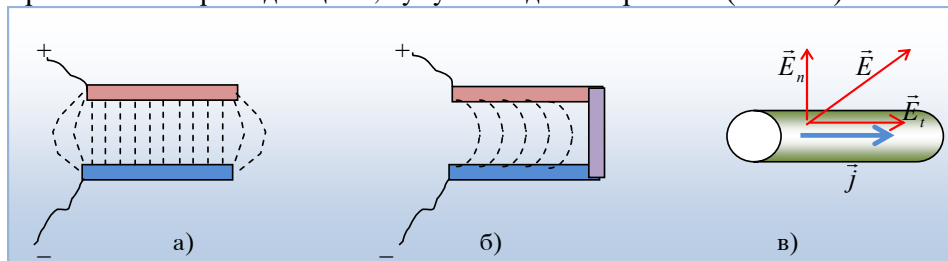
5.1.1. Електрично поле на спроводник низ кој тече струја

Ако низ некој спроводник тече струја, тогаш тој веќе не е тело со еквипотенцијална површина. Движење на носителите на струјата постои затоа што во внатрешноста на спроводникот постои поле што е насочено исто како и движењето на позитивните полнежи. По должината на спроводникот постои пад на напонот, што укажува на тоа дека по должината на спроводникот постои компонента на јачината на електричното поле.

Да го појасниме следново тврдење ќе го направиме следниов експеримент.

Експеримент

Во плиток сад со масло (диелектрик) поставуваме две електроди од слаб спроводник, на пример од дрво, како на сликата 5.4. Електродите ги поврзуваме со двете клеми од електростатската инфлуентна машина и врз маслото посипуваме ситни честички на гриз. Сликата која ја добиваме е познатата слика на силиви линии меѓу две рамнини (слика 5.4 а). Но, ако од една страна ги поврземе електродите и дозволиме низ системот да потече струја, тогаш силивите линии веќе нема да бидат нормални на спроводниците, туку ќе бидат искривени (сл. 5.4б).



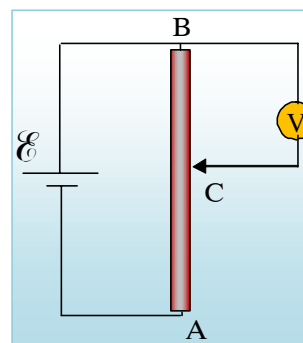
Сл.5.4

Објаснувањето е следново: при течењето струја, полето $\vec{E}$ има и тангенцијална компонента, долж која се движат полнежите (сл. 5.4в), па силивите линии не може да бидат нормални на спроводникот, како што е тоа случај кај статичните полнежи.

Волтметарот е уред со кој се мери потенцијална разлика (напонот) меѓу две точки. Тој има голем внатрешен отпор и секогаш се поврзува со точките меѓу кои се мери напонот (паралелно).

Експеримент: Потенциометар

Отпорникот е поврзан со извор на електромоторна сила $\mathcal{E}$. Напонот помеѓу лизгачот С и крајот В се мери со еден волтметар (слика 5.5). Ако лизгачот С од отпорникот АВ се движи од точката В кон точката А, напонот што го покажува волтметарот станува сè поголем, бидејќи се зголемува потенцијалната разлика меѓу точките В и С. Ваквото поврзување во електричните шеми обично се нарекува потенциометарски спој, и во понатамошниот тек од овој курс ќе го користиме секаде, каде што е потребно да имаме извор со променлив напон.

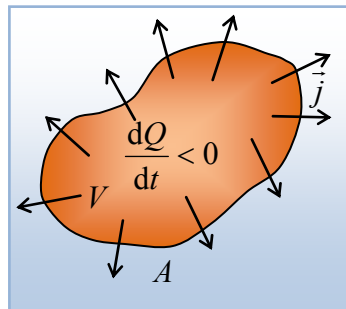


Сл. 5.5.

5.2. РАВЕНКА НА КОНТИНУИТЕТ (НЕПРЕКИНАТОСТ)

Во некоја средина со електрични полнежи што се движат, да замислиме затворена површина A (сл. 5.6).

Нека со изразот $I = \oint_A \vec{j} d\vec{A}$ ја означиме вкупната струја што излегува од затворената површина. Ова се всушност полнежите што го напуштаат волуменот V опфатен со затворената површина A во единица време. Тој полнеж, според законот за запазување на електричните полнежи мора да биде еднаков на намалувањето на вкупниот полнеж dQ во единица време во истиот волумен:



Сл.5.6

$$\oint_A \vec{j} d\vec{A} = -\frac{dQ}{dt} \quad (5.9)$$

Во релацијава знакот минус го означува намалувањето.

Ако се работи за нерамномерна распределба на полнежот низ волуменот, тогаш вкупниот полнеж го претставиме преку волуменската густина ρ :

$$Q = \int_V \rho d\tau \quad (5.10)$$

Релацијата (5.9) тогаш станува:

$$\oint_A \vec{j} d\vec{A} = -\frac{d}{dt} \int_V \rho d\tau = -\int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} d\tau \quad (5.11)$$

Под интегралот напишавме парцијален извод, затоа што густината на полнежот ρ е величина што е функција не само од времето, туку и од координатите. Но, сега нас не интересира само како функција од времето.

Во математиката е познато дека левата страна на равенството (5.11) е површински интеграл кој може да се претстави како волуменски интеграл на следниов начин:

$$\oint_A \vec{j} d\vec{A} = \int_V \text{div } \vec{j} d\tau \quad (5.12)$$

при што треба да се потсетиме дека, дивергенција на еден вектор е скаларен производ од векторот набла и самиот вектор (овде векторот $\vec{j}$):

$$\text{div } \vec{j} = \frac{\partial j_x}{\partial x} + \frac{\partial j_y}{\partial y} + \frac{\partial j_z}{\partial z} = \nabla \cdot \vec{j} \quad (5.13)$$

Равенството (5.11) тогаш поминува во:

$$\int_V \nabla \vec{j} d\tau = - \int_V \frac{\partial \rho}{\partial t} d\tau \quad (5.14)$$

Последново равенство е исполнето само ако подинтегралните функции се еднакви, па следува дека

$$\nabla \vec{j} = - \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad ; \quad \operatorname{div} \vec{j} = - \frac{\partial \rho}{\partial t} . \quad (5.15)$$

Оваа релација се вика **равенка на континуитет (непрекинатост)**. Оваа равенка, како и релацијата (5.11) математички го искажуваат законот за запазување на електричните полнежи. Според оваа равенка, во просторот во којшто има извори на струја $\operatorname{div} \vec{j} > 0$, па доаѓа до намалување на електричните полнежи.

Оваа равенка е особено важна за стационарните (временски постојани) струи. Таму е $\vec{j}$ временски константна величина, па следува дека нејзиниот извод по времето е еднаков на нула, или:

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0 . \quad (5.16)$$

Овој резултат кажува дека за случај на постојана струја, **векторот на густината нема извори**. Струјните линии немаат извор, ниту понор, тие се затворени линии. Имајќи ја предвид релацијата (5.12) следува дека

$$\oint_A \vec{j} d\vec{A} = 0$$

$$\text{т. е. долж течењето на струјата: } j_1 A_1 = j_2 A_2 \dots j_n A_n = \text{const} \quad (5.17)$$

Од оваа релација може да се заклучи: **јачината на струјата I низ кој и да било пресек на шелошо-жицата низ која тече струјата е константна, т.е. секаде еднаква**. Ова е основен услов за стационарно течење на струјата.

5.3. ОМОВ ЗАКОН ЗА ДЕЛ ОД СТРУЈНО КОЛО. ЗАВИСНОСТ НА ОТПОРОТ ОД ТЕМПЕРАТУРАТА

Основна причина поради која низ еден спроводник тече струја е дека на краевите на спроводникот постои потенцијална разлика, постои напон. Ако состојбата на спроводникот не се менува (не му се менува температурата и слично) тогаш за секој спроводник постои еднозначна зависност помеѓу напонот приложен на неговите краеве и јачината на струјата што низ него тече:

$$I = F(V) \quad (5.18)$$

За многу спроводници, особено за металите, оваа зависност е многу проста. Јачината на струјата е право пропорционална со неговиот напон V :

$$I = \Lambda V \quad (5.19)$$

Ова тврдење се вика **Омов закон**, бидејќи до него по експериментален пат дошол германскиот физичар Георг Симон Ом (Ohm Georg Simon, 1787-1854) во дваесетите години на деветнаесетиот век. Коефициентот на пропорционалноста Λ во релацијата (5.19) е величина карактеристична за дадениот спроводник и се вика *електроспроводноста* на спроводникот, а физичката величина која е еднаква на реципрочната вредност на електроспроводливоста, претставува негов **електричен отпор**, R , ($R = \frac{1}{\Lambda}$), па Омовиот закон најчесто се испишува како:

$$I = \frac{V}{R} \quad (5.20)$$

Електроспроводливоста, па соодветно и отпорот на дадениот спроводник зависи во прв ред од неговите димензии, од природата на супстанцијата од која е направен дадениот спроводник, но и од условите под кои се наоѓа, во прв ред од неговата температура. Единица за електричен отпор е еден **ом**, со ознака Ω . Од релацијата (5.20) следува дека:

$$1 \Omega = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ A}}, \text{ или : спроводник има отпор еднаков на еден ом, ако низ него}$$

тече струја од едена ампер кога на неговите краеве се донесе напон од еден волт. Единица за електроспроводливоста е **сименс**, со ознака S . Јасно е дека врската меѓу сименс и ом е следнава: $1 S = 1/\Omega$.

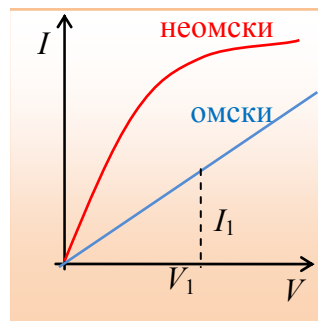
Сите електрични прибори, од грејачи до транзистори и светилки, покажуваат отпор кон струјата што низ нив тече. Спроводниците со кои потрошувачите се поврзуваат обично се со занемарлив отпор. Во многу шеми, особено во електричните прибори, за подесување на јачината на струјата се користат отпорници, кои може да имаат отпори од делови на еден ом, па до ред на големина од мегаоми ($10^6 \Omega = 1 \text{ M}\Omega$). Отпорниците во електронските шеми се означуваат со ,

ако е можно отпорот на отпорникот да се менува.

Во зависност од технологијата на правење, отпорниците може да бидат жичани или керамички, а по својата функција да бидат со променлив отпор (отпорници со лизгач) или со константен отпор.

Графичка зависност на јачината на струјата од напонот V , кај металните спроводници е права (сл. 5.6). т.е. при различни напони односот V/I останува секогаш константен и еднаков на отпорот R . Така, R може да се определи, на пример, како однос V_1/I_1 . Отпорниците кај кои што постои линеарна зависност меѓу струјата и напонот се нарекуваат омски. Постојат материјали за кои зависноста меѓу струјата и напонот не е линеарна, па се нарекуваат нелинеарни или неомски отпори. Пример за ваква нелинеарна зависност е даден на сликата 5.7.

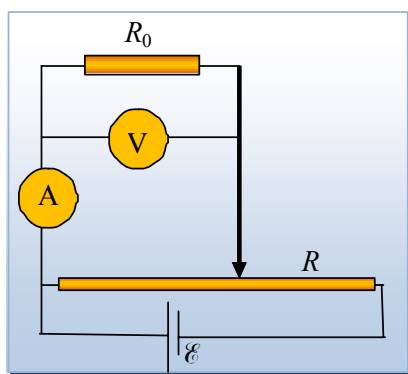
Зависноста на јачината на струјата од напонот и отпорот може и експериментално да се добие со шема дадена на сликата 5.8.



Сл.5.7. Омски (линеарен) и неомски (нелинеарен) отпор

Експеримент

Се составува струјно коло како на сликата 5.8. Во оваа шема отпорникот R е отпорник со лизгач во потенциометарски спој со изворот на електричната струја (12 V), за да може да се менува донесениот напон на краевите од потрошувачот R_0 . Згоден е, како потрошувач да се користи отпорник со познати отпори (отпорна декада).



Сл. 5.8

б) Потоа се држи постојан напонот V , а се менува отпорот на потрошувачот.

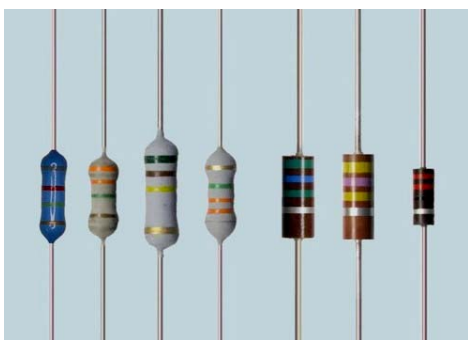
а) Прво се држи постојан отпор на потрошувачот R_0 , а се менува напонот, со тоа што се движи лизгачот на отпорникот R , се гледа како се менува јачината на струјата I во зависност од донесениот напон. Се покажува пропорционалноста на струјата со напонот:

$$I \propto V$$



Се покажува дека: $I \propto \frac{1}{R_0}$.

Во практиката во електронските кола најчесто се употребуваат керамички отпорници (сл.5.9) И тие, како и сите отпорници служат за дотерување на вредностите на струите и напоните во електричните кола. Најчесто се означуваат со помош на четири лентички во боја. Првите две ленти ги даваат првата и втората цифра на вредноста на отпорот. Третата го дава степенот на множителот, а четвртата ја определува класата на толеранцијата (сл. 5.106).



Сл. 5.9



Сл. 5.10

Табела I.

Боја	Број	Множител	Толеранција
Црна	0	10^0	
Кафена	1	10^1	
Црвена	2	10^2	
оранж	3	10^3	
жолто	4	10^4	
зелено	5	10^5	
Сино	6	10^6	
Виолетово	7	10^7	
Сиво	8	10^8	
Бело	9	10^9	
златно		10^{-1}	5%
Сребрено		10^{-2}	10%
Безбојно			20%

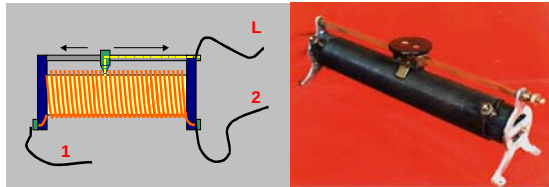
За декодирање на вредноста на отпорниците може да се послужи́ме со Табелата I.

Еден пример за декодирање на вредноста на еден отпорник е даден на сликата 5.10 на која е даден керамички отпорник со обоени ленти.

Според Табелата I, отпорот на овој отпорник изнесува:

$$10 \times 10^2 \Omega \pm 5\% = (1 \pm 0,05) \text{ k}\Omega$$

На сликата 5.11 се дадени цртеж и фотографија на отпорник со лизгач. Ваков отпорник се користи како регулатор на струја, при што се спојуваат деловите означени со 1, но и во потенциометарски спој, како регулатор на напон (поглавје 5.1.1).



Сл. 5.11

5.3.1. Омов закон за отпорот

Уште понапред беше кажано дека отпорот на спроводниците зависи од нивните димензии. Таа зависност е многу едноставна за металните спроводниците со цилиндрична форма и постојан напречен пресек, какви што вообичаено се жиците на спојување. Отпорот R кај таквите спроводници се добива како:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (5.21)$$

каде што L е должината на спроводникот, A неговиот напречен пресек, а ρ е физичката величина карактеристична за супстанцијата од која е направен спроводникот и се нарекува **специфичен електричен отпор**. Физичка величина која е дадена со реципрочната вредност од специфичниот електричен отпор се нарекува **специфична електрична спроводливост**, а обично се бележи со буквата σ .

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (5.22)$$

Единица за мерење на специфичниот електричен отпор во SI е $\Omega \cdot m$.

(Внимание: величината специфична електрична спроводливост не треба да се побрка со површинската густина на полнежи за која веќе ја искористивме истава ознака σ .)

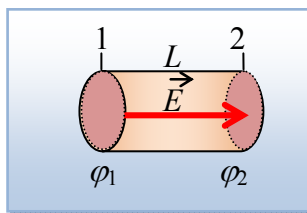
Во табелата 5.1 се дадени се вредностите за специфичниот електричен отпор за некои супстанции при собна температура.

Табела 5.1

супстанција	специфичен електричен отпор ρ ($\Omega \cdot m$)
сребро	$1,66 - 1,63 \cdot 10^{-8}$
бакар	$1,78 \cdot 10^{-8}$
платина	$11,0 \cdot 10^{-8}$
константан, легура (60% Cu, 40% Ni)	$49 \cdot 10^{-8}$
нихром, легура (67,5% Ni, 15% Cr, 16% Fe, 1,5% Mn)	$110 \cdot 10^{-8}$
графит	$3 \cdot 10^{-5}$
10% раствот на NaCl	0,0825
хемиски чиста вода	$\approx 10^8$
стакло (натриумово)	$\approx 10^9$
порцелан	$\approx 10^{13}$
топен кварц, килибар	$> 10^{18}$

Табелата 5.1 покажува колку многу се разликуваат супстанциите според својата електрична спроводливост. Како што се гледа, најдобар спроводник на електричната струја е среброто, со специфичен електричен отпор од редот големина $10^{-8} \Omega \cdot m$, додека килибарот има специфичен електричен отпор поголем од $10^{18} \Omega \cdot m$. Иако среброто е со најмал специфичен електричен отпор, бакар е многу поефтин, па во електротехниката повеќе се користи. За жици на далекуводи најчесто се употребува уште поефтиниот алуминиум.

5.3.2. Омов закон во диференцијална форма



Сл. 5.12

Нека замислиме многу мал дел од еден спроводник низ којшто тече струја (Сл. 5.12). Спроводникот е толку мал што можеме да го сметаме за праволиниски. Должина на спроводникот нека биде L , напречниот пресек A , а меѓу неговите две точки 1 и 2 нека постои потенцијална разлика $\varphi_2 - \varphi_1 = V$. Електричното поле E за тој дел од спроводникот е хомогено и

може да се смета дека е еднакво на: $E = \frac{V}{L}$. За тој дел од спроводникот

може да се смета дека густината на струјата $j = I/A$, или, имајќи ги предвид тие релации, за Омовиот закон за дел од струјно коло се добива:

$$I = \frac{V}{R}; \quad \text{бидејќи } I = jA, \quad V = EL, \quad R = \rho \frac{L}{A}$$

$$jA = \frac{EL}{\rho \frac{L}{A}} \Rightarrow j = \frac{1}{\rho} E \Rightarrow j = \sigma E,$$

каде σ е специфична електрична спроводливост на супстанцијата од која е направен дадениот спроводник.

Последнава релација може да се напише и во векторска форма:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (5.23)$$

Овој израз претставува **Омов закон во диференцијална форма**. Тој ги поврзува физичките величини што се однесуваат на една иста точка, што не е случај со релацијата $I = \frac{V}{R}$.

5.3.3. Зависност на отпорот од температурата и суперспроводливост

Специфичниот електричен отпор, а со тоа и отпорот на спроводниците многу зависи од температурата на спроводникот. Кај металите, по правило, специфичниот електричен отпор расте со температурата. Тоа не е необјасливо. Причината за појавата отпор кај спроводниците се судирите на електроните со атомите, односно со градителите на кристалната решетка. Со зголемување на температурата, кај атомите е се интензивира топлинското безредно (хаотично) движење, па до судирите со носителите на струјата - електроните доаѓа почесто, значи тие поинтензивно го попречуваат движењето на електроните.

Зависноста на специфичниот електричен отпор од температурата може да се окарактеризира со физичката величина **температурен коефициент на отпорот (α)**. Тој коефициент го дава релативниот прираст на специфичниот електричен отпор $d\rho/\rho$, при зголемување на температурата dT за еден степен:

$$\alpha = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}, \quad (5.24)$$

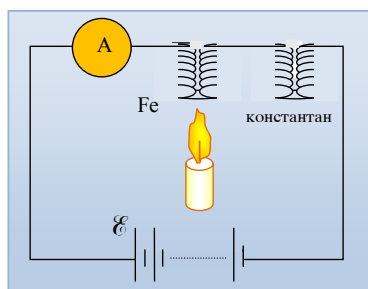
па како што може да се види, се искажува во единицата келвин на минус прва степен (K^{-1}).

Температурниот коефициент на отпорот, за некоја супстанција е различен за различни температурни интервали. Сепак, во мали температурни интервали специфичниот електричен отпор на металите се менува практично линеарно. Ако ρ_0 е специфичниот електричен отпор при $0^\circ C$, а ρ е неговата вредност при некоја температура t искажана во Целзиусови степени, тогаш може да се запише:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t) \quad \text{или} \quad \alpha = \frac{\rho - \rho_0}{\rho_0 t} . \quad (5.25)$$

Кај сите метали отпорот расте со температурата т.е. $\alpha > 0$. Постојат легури кај кои отпорот речиси не се менува со температурата па за овие важи дека $\alpha \sim 0$. Кај полупроводниците, растворите на електролитите и диелектриците отпорот опаѓа со порастот на температурата ($\alpha < 0$). Во тоа може да нè убедат следниве експерименти.

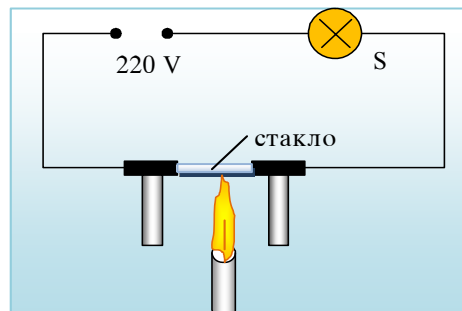
Експеримент 1



Сл. 5.13

Ако металната жица од платина или железо (слика 5.13) ја грееме, амперметарот ќе покаже намалување на струјата, што укажува на тоа дека дошло до зголемување на отпорот. Ако потоа ја грееме жицата од константан, амперметарот не покажува никаква промена на струјата.

Експеримент 2



Сл. 5.14

Ефектна демонстрација на спроводливоста на стаклото при високи температури е скицирана на сликата 5.14. Стаклото е поставено меѓу јагленови држачи. Јаглените електроди се поврзуваат на градска мрежа, 220 V. Во колото е вклучена и една обична светилка S. Стаклото се грее со бунзенов пламеник. При доволно висока температура стаклото станува спроводно за електричната струја, што ќе го регистрира светилката S. При толку висока температура стаклото понатаму не треба да се грее, зашто самата струјата што низ него тече, го загрева.

Внимание: овде е вклучен напон од 220 V, а јагенот е спроводник!

Во табелата 5.2 се дадени вредностите за температурниот коефициент на отпорот α за некои супстанции. За сите чисти метали коефициентот α има вредност блиска до $0,00367 \text{ K}^{-1}$ што е приближно еднакво на $1/273$, т. е. вредност блиска до бројната вредност на волуменското ширење на гасовите.

Легуриите со многу мали вредности на α , како што е на пример константанот се користат за правење на еталонски отпорници.

Табела 5.2

супстанција	температура во °C	α среден температурен коефициент на отпорот во K ⁻¹
сребро	0-100	$40 \cdot 10^{-4}$
бакар	18	$43 \cdot 10^{-4}$
платина	0-100	$39,27 \cdot 10^{-4}$
константан	18	од $-0,4$ до $+0,1 \cdot 10^{-4}$
10% раствор на NaCl	18	$-0,021$
графит	18	$-5 \cdot 10^{-4}$
стакло	100	од $-0,2$ до $-0,1$

Температурната зависност на отпорот на металите е искористена кај разните мерни и автоматски уреди. Најважен од нив е отпорен термометар. Тој преставува отпорник направен од платинска жица со кој прецизно се мери отпорот. Платината се користи бидејќи е отпорна на корозија и има висока точка на топење.

Пример задача 1

Платинскиот отпорен термометар може да се искористи за мерење на непознатата температура на една загреана течност. Нека отпорот на 0°C на платинскиот термометар изнесува 164,2 Ω . По потопување на термометарот во сад со течност, неговиот отпор станал 184,4 Ω . Колкава е температурата на течноста?

Решение:

Бидејќи е отпорот R пропорционален со специфичниот отпор (види релација 5.21), ако уште се има предвид релацијата (5.25), и од табелата 5.2 се земе вредноста за α за платина, се добива:

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t) \quad ; \quad R = \rho \frac{L}{A} \quad \text{а} \quad R_0 = \rho_0 \frac{L}{A}.$$

Откаде за температурата што ја мериме се добива:

$$t = \frac{R - R_0}{R_0 \alpha} = \frac{184,4 - 164,2}{164,2 \cdot 0,003927} = 35,9^\circ \text{C}.$$

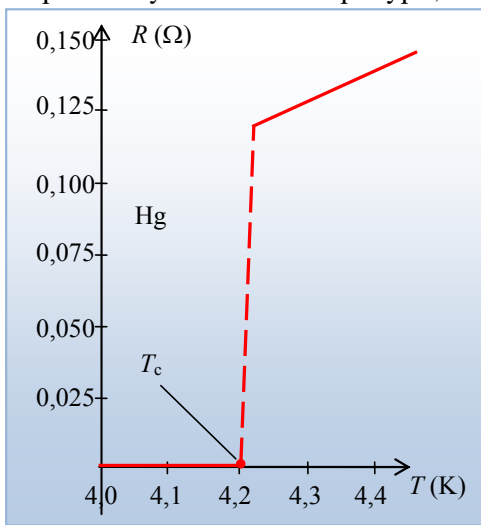
Како што веќе нагласивме, вредноста на α зависи од температурата, затоа треба да се внимава на температурниот интервал во кој важи дадената вредност во табелите на различните прирачници. Ако е температурниот интервал широк, тогаш релацијата (5.25) за специфичниот отпор при некоја температура t треба да содржи и членови од повисок степен (втор, трета итн степен) на зависност од температурата:

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3) \quad . \quad (5.26)$$

Притоа коефициентите β и γ се обично многу мали, но ако температурата t е висока и придонесот на членовите со повисока степен може да биде значителен.

Суперспроводливост

При многу ниски температури, специфичниот отпор на некои метали, а



Сл. 5.15

исто така и легури и соединенија, паѓа, во границите на современите мерења, до нула. Тоа својство се вика **суперспроводливост**.

Материјалите што го имаат ова својство се викаат суперспроводници. Графичката зависност на отпорот од температурата кај овие материјали со намалување на температурата опаѓа линеарно сè до некоја **критична температура**, карактеристична за супстанцијата по која отпорот нагло паѓа на нула. Појавата е откриена од холандскиот физичар Камерлинг Онес (Heike Kamerlingh-Onnes, 1853-1926) во 1911 година, кога експеримен-

тирајќи со жива тој покажал дека таа станува суперспроводник на температура пониска од 4,2 K (сл. 5.15). Со некои понови мерења се покажало дека специфичниот електричен отпор на живата на критичната температура е помал од $4 \cdot 10^{-25} \Omega m$, што значи околу 10^{17} пати помал од специфичниот електричен отпор на среброто. Тоа практично значи отпор скоро еднаков на нула.

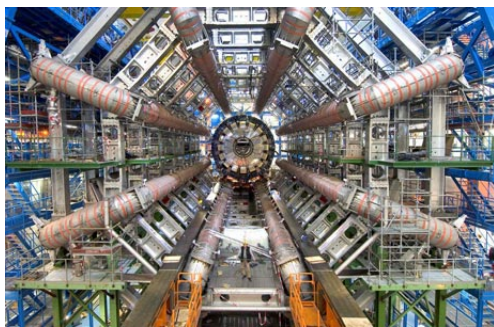
Едно од најзначајните својства на суперспроводниците е фактот што ако еднаш се воспостави струја низ нив, таа ќе тече трајно (бидејќи $R=0$). Всушност се потврдило дека воспоставената струја низ суперспроводничките кола течела неколку години, без да дојде до какво и да било нарушување. Квантномеханичко објаснување на суперспроводливоста дале Бардин, Купер и Шриффер со својата BCS –теорија, создадена во 1957 година.

Едно од најважните откритија во физиката кое предизвикало голема возбуда во научната јавност било откритието на т.н. високотемпературни бакар оксидни суперспроводници во 1986 година. Сè започнало со публикацијата на Георг Беднорц и Алекс Милер (J. Georg Bednorz, 1930 - и K. Alexander Müller, 1927 -) двајца научници од IBM Институт од Цирих, кои добиле суперспроводник од бариум-лантан-

бакарен оксид со критична температура на околу 30 K. За ова свое откритие тие ја добија Нобеловата награда по физика за 1987 година. Всушност тие открија едно ново поле на истражување на полето на суперспроводливоста. Може да се каже ова откритје иницирало лавина на истражувања на ова поле ширум светот. Така, веќе во почетокот на 1987 година две групи на научници во САД (од Алабама унивететот и од универзитетот во Хјустон) успеаја да добијат суперспроводливост со критична температура околу 92 K ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$). Кон крајот на истата година тимови научници од Јапонија и САД, успеаја да добијат суперспроводност на 105 K во оксид на бизмут, стронциум, калциум и бакар, а со примеси и на талуим била постигната суперспроводливост и на 125 K. Сите овие материјали се во обичните услови изолаторски керамики. Голем напредок за практично користење на појавата е постигнатата суперспроводливост над 100 K, зашто температури повисоки од онаа на течниот азот (77 K) релативно лесно се постигнуваат. Истражувањата, познати како истражувања на полето на **високотемпературната суперспроводливост**, продолжуваат со надеж

дека еден ден ќе се добие суперспроводливост и на собна температура.

Една од големите примени на суперспроводливоста е конструкција на суперспроводнички електромагнети во кои се постигнува магнетно поле со јачина над 10-20 T (10 пати поголема од онаа постигната кај најсилните електромагнети). Поради суперспроводливата струја во таквите магнети се штеди



Циновски електромагнет со разладна инсталација од течен хелиум.

електрична енергија. Се разбира, за да се одржуваат ниските температури, сепак се троши енергија.

Во блиска иднина ќе бидат можни суперспроводнички калемени на струјните генератори и мотори. Се очекува да се конструираат суперспроводни далекуводи, кај кои практично не би имало никакви загуби. Постојат и други очекувани примени на суперспроводничките материјали, во електрониката, во транспортот и низа други.

5.4. РАБОТА И МОЌНОСТ НА ЕЛЕКТРИЧНАТА СТРУЈА. ЏУЛОВ ЗАКОН

Електричната енергија е мошне погодна поради тоа што лесно се претвора во други видови енергија. На пример кај електромоторите електричната енергија се претвора во механичка.

Кај греалките, ринглите, тостерите, феновите за сушење коса и слично, електричната енергија се претвора во внатрешна топлинска, каде што претворбата се прави со помош на жичени отпорници (грејачи). да потсетиме дека и во обичната електрична светилка малата нитка се загрева со струја до усвитување. Притоа сосем мал дел од електричната енергија се претвора во светлинска енергија, најголемиот дел, над 90% се претвора (се губи) како топлина која ја зголемува внатрешната енергија на самата жица, но и на околната средина.

Ќе ја изведеме релацијата за електричната енергија. За таа цел повторно замислуваме многу мал дел од спроводникот низ кој тече струја, бидејќи помеѓу точките од неговите краеве постои напон V . За време dt низ пресекот на тој спроводник преминува полнеж $dQ=Idt$.

Од она што досега го научивме, јасно е дека струјата, всушност, претставува движење на полнежите-носители, под дејство на електричното поле. Тогаш извршената работа dW ќе биде еднаква на намалувањето на потенцијалната енергија dU :

$$dW = -dU$$

а како е :

$$dW = VdQ = VIdt \quad (5.27)$$

Имајќи го предвид Омовиот закон за дел од струјно коло, оваа релација може да се запише и како:

$$dW = I^2 R dt \text{ или } dW = \frac{V^2}{R} dt \quad (5.28)$$

За моќноста P , преку овие релации се добиваат следниве изрази:

$$P = \frac{dW}{dt} = I \cdot V; \text{ или } P = \frac{dW}{dt} = I^2 R; \quad P = \frac{V^2}{R} \quad (5.29)$$

Ако струјата се мери во ампери, напонот во волти, а отпорот во оми, работата што се врши при совладување на отпорот при течење на струјата се мери во џули кои често се искажуваат и како ватсекунди. Во електротехниката се користат и вонсистемски единици, дозволени за употреба, како што се ватчас, киловатчас, мегаватчас. Така ,

$$1 \text{ kWh} = (1000 \text{ W}) \cdot (3600 \text{ s}) = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

Моќноста, пак, се мери во вати, киловати, мегавати и др.

Ако струјата тече низ неподвижен метален спроводник, тогаш целата работа на струјата се троши на загревање на спроводникот, па според законот за запазување на енергијата, ослободеното количество топлина dW_T за време dt е еднакво на извршената работа за истото време:

$$dW_T = I \cdot V \cdot dt = I^2 R dt = \frac{V^2}{R} dt \quad (5.30)$$

Овој закон во физиката е познат како **Џулов закон** или Џул-Ленцов закон (според Joule James Prescott, 1818-1889).

Ако станува збор за постојана електрична струја, релацијата (5.30) за ослободената топлина ΔW_T од спроводник (отпорник, потрошувач) на чиешто краишта е донесен напон со големина V , и низ него тече струја со јачина I , за некој одреден временски интервал Δt е дадена со:

$$\Delta W_T = I \cdot V \cdot \Delta t = I^2 R \Delta t = \frac{V^2}{R} \Delta t \quad (5.31)$$

Во овие релации за ослободената топлина или потрошената енергија, ако станува збор за наизменична синусоидална струја, вредностите за јачината на струјата и на напонот се т. н. ефективни вредности. *Под ефективна вредност на јачината на наизменичната струја се подразбира вредноста на онаа постојана струја која за еднакво време низ истиот спроводник би ослободила исто количество топлина како и наизменичната.* За тоа колкави се тие вредности ќе зборуваме подоцна во овој курс. Овде сега само напонуваме дека кога велиме дека градската мрежа има напон од 220 V, станува збор за ефективна вредност на наизменичната струја.

Пример задача 1

Пресметајте го отпорот на 12-волтната автомобилска светилка со моќност од 40 W.

Решение

Според (5.29) отпорот R е:

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{12^2 \text{ V}^2}{40 \text{ W}} = 3,6 \Omega. \text{ Ваков отпор има светилката кога свети, кога е студена, отпорот и е помал.}$$

Пример задача 2

Електричен грејач со моќност 1,8 kW работи просечно по 3 часа дневно на напон од 220 V. Ако цената на 1 kWh енергија изнесува 3 денари, колкав износ треба да плати корисникот на грејачот за еден месец (30) дена?

Решение

Потрошената електрична енергија е:

$$W = P \Delta t = 1,8 \cdot 3 \cdot 30 = 162 \text{ kWh}, \text{ а износот на парите } Pa \text{ ќе биде :}$$

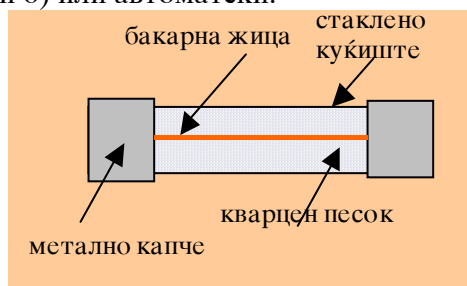
$$Pa = W \cdot c = 162 \cdot 3 = 486 \text{ денари.}$$

5.4.1. Осигурувачи

Освен кај грејните уреди, Џуловиот закон нашол примена и кај осигурувачите, кои се наменети за да ги обезбедуваат електричните кола со потрошувачи од куси споеви (кога ќе се спојат накратко

половите од еден извор) или струјни удари (краткотрајни протоци на јака струја).

Така, спроводниците кои ја доведуваат електричната струја до уредите во домаќинството обично имаат мал отпор. Но, при голема јачина на струјата, спроводникот се загрева и издвојува количество топлина кое, според Џулов закон (5.30), е пропорционално со квадратот на јачината на струјата. Тоа може да биде штетно бидејќи спроводниците поминувајќи низ сидовите на инсталацијата може да предизвикаат пожар. Колку се спроводниците подебели, толку им е отпорот помал и можат да издржат појаки струји, без значајно загревање. Ако јачината на струјата ја надмине допуштената вредност се зборува за “преоптовареност”. Затоа електричните водови во домашната инсталациона мрежа, или пошироко во објектите, треба така да бидат проектирани да можат да ја издржат саканата оптовареност. За заштита од преоптоварување во електричните кола, или одредени електрични уреди, се вградуваат осигурачи: топливи (сл. 5.16 а и б) или автоматски.



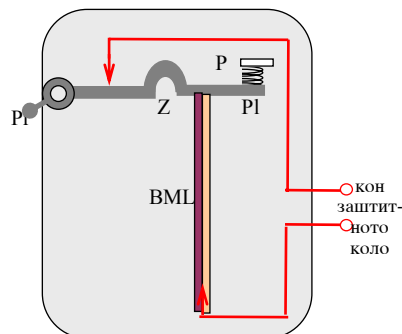
Сл.5.16а



Сл.5.16б

Осигурувачите се уреди што ја прекинуваат струјата кога низ нив ќе протече струја поголема од проектираната вредност. Така, осигурувач пресметан за 15 А прегорува (се стопува), а автоматскиот осигурувач ја исклучува струјата кога струјата во колото ја надминува вредноста од 15 А. Топливите осигурачи сè уште се среќаваат во постарите инсталациони мрежи, или на пример во автомобилите, како и при осигурување на одредени електрични уреди. Тие претставуваат тенка жица поставена во специјален изолаторски држач -кварцен песок, (а) или патрон,(б)- и при протекување на појака струја трајно се оштетуваат, прегоруваат и треба да се заменат.

Принципот на работа на автоматските осигурачи е даден на сликата 5.17. Електричната струја тече



Сл. 5.17

по биметална лента BML, преку плочката Pl која е во контакт со збиена пружина P за да се обезбеди убав контакт со BML. Оваа плочка е во врска и со надворешен прекинувач Pr. Ако јачината на струјата ја надмине проектираната вредност, лентата се искривува и навлегува во жлебот Z на плочката Pl, така што струјата се прекинува. Тоа го регистрира надворешниот прекинувач Pr, преминувајќи во друга положба. Кога ќе се олади биметалната лента, осигурачот може повторно да се вклучи со поместување на надворешниот прекинувач Pr во првобитната положба.

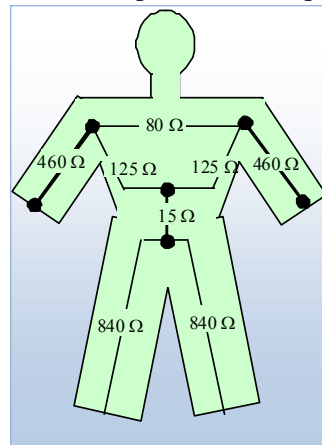
Ако по промена на топливиот осигурач, или при повторно вклучување на автоматскиот осигурач, тие повторно ја прекинуваат струјата, причината може да биде тоа што во колото или се вклучени повеќе потрошувачи на енергијата истовремено, или некаде се појавил краток спој, т.е. на некое место, поради лошата изолација дошло до директно спојување на двата вода. Поради тоа отпорот станал многу мал, па јачината на струјата силно пораснала. Тој краток спој треба задолжително да се отстрани, па потоа да се вклучи осигурувачот.

5.4.2. Мерки на безбедност

Ракувањето со струјајќа треба да биде многу внимателно, затоа што струјајќа може да предизвика смрт или да му зададе тешки како крайкоштрајни, така и иреверзибилни промени на човечкиот организам.

Човечкото тело е спроводливо за електричната струја. Неговиот отпор зависи од многу фактори и може да има вредности од 1000 до 100 000 Ω .

Секој вид ткиво има различна големина на електричниот отпор. На сликата 5.18 се дадени приближните вредности на отпорот за разните делови на човечкото тело. Внатрешните органи на телото имаат значително помал отпор од кожата. Така, ако некој допре неизолиран спроводник под напон, неговото тело станува дел од струјното коло и низ него ќе потече струја. Големината на струјата $I_{\text{тело}}$ зависи од големината на напонот V и од отпорот на човечкото тело $R_{\text{тело}}$: $I_{\text{тело}} = \frac{V}{R_{\text{тело}}}$.



Сл. 5.18 Отпор на одделни делови на човечкото тело

Ако електричниот напон дејствува помеѓу две точки на телото, тогаш на отпорот на телото треба да се додаде отпорот на кожата. Овој

отпор е поголем од отпорот на другите делови, но ако кожата е влажна или испотена, тој отпор значително се намалува.



Далноводите се под многу висок напон, па допирањето на делови од таква инсталација е речиси секогаш фатално. Кај тие инсталации допирот не мора да е непосреден, бидејќи ако во близина на таквиот спроводник се најде човекот може да прескокне искра на растојанија од десетици сантиметри. Затоа водовите кај далноводите се поставени на изолациони држачи, подигнати на височина од десетици метри, и се еден од друг на растојание од повеќе метри. Таквите далноводи обично се далеку од населени места и на нив постои знак за предупредување (слика).

Она што го оштетува телото на човекот е течењето струја. Особено е опасно дејството на струјата врз срцевиот мускул. Во табелава се дадени влијанијата на струјата врз човечкиот организам.

Јачина на струја	Дејство врз човечкиот организам
0,5 mA	најмала јачина на струја која човек може да ја почувствува во вид на боцкање
5 mA	се чувствува болка
10 mA	струјата предизвикува грчење на мускулите кое го отежнува дишењето
100 mA	струјата е смртоносна

Се смета дека струја посилна од 10 mA може да предизвика трајно оштетување на организмот. При течење на струја низ телото на човекот, се ослободува големо количество топлина, па настануваат изгореници. Меѓутоа, опасноста е значително поголема ако струјата протече низ срцето или неговата близина. Тогаш доаѓа до нагло грчење на срцевиот мускул, до негово оштетување или смрт. Грчењето на мускулите на унесреќениот е причина што најчесто тој сам не може да се ослободи од допрениот спроводник. Затоа, при пружање помош мора многу да се внимава и спасителот да не стане жртва. **Пред сè треба да се исклучи доводот на струја**, а потоа да му се пружи помош на унесреќениот.

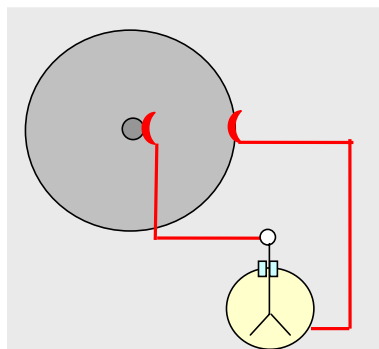
За заштита од струен удар треба да се раководиме според следниве правила:

1. никогаши да не се вршаат промени на свешилки, или поправки на некои електрични уреди при вклучен напон;
2. при составување на струјни кола, никогаши да не се користаат спроводници со оштетени изолации;

3. при прежорувањето на осигурачието на електричните струја, илне да се заменат со соодветни за проишаната јачина на струја;
 4. сите апарати со поголема моќност треба проишно да се заземјени;
 5. учениците во училиштата, или студентите во лабораторија можат да вршат експерименти или мерења по правило под ниски напон. Во студентските лаборатории се можни користења и на повисоки напони, при што треба многу внимание. Секоја шема се вклучува дури погаш ојкако ќе ја провери наставникот (асистентот). Секоја промена на шемата се врши само при исклучен извор на напон!

ПРАШАЊА И ПРОБЛЕМИ

1. Метален ненаелектризиран диск (слика 5.19) е доведен во состојба на брза ротација, така што истиот може да се смета како “центрифуга за електроните”. Помеѓу централниот дел и периферијата на дискот се појавува потенцијална разлика. Каков е знакот на таа разлика на потенцијалот? Ако двата краја се поврзат со многу чувствителен галванометар, во која насока ќе тече струјата низ него?



Сл. 5.19

Одговор:

На периферијата на дискот при ротација се натрупуваат електрони. Така се јавува потенцијална разлика, така што главата на електрометарот е на позитивен а телото негативен потенцијал.

Ако се вклучи осетлив галванометар, тој би регистрирал струја што тече од централниот дел кон периферијата.

(Напомена: полнежот кој се добива при брза ротација е многу мал, такашто струјата би била многу слаба)

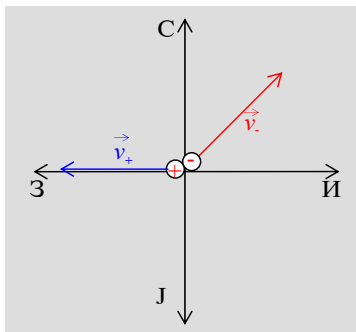
2. Кој спроводник претставува поголем отпор за постојана струја: бакарна цилиндрична прачка или бакарна цевка чиј што надворешен дијаметар има еднаква големина како и прачката. Должината на двата елемента е еднаква.

3. При вклучување на обичната електрична светилка со метално влакно, големината на јачината на струјата во првиот момент се разликува од јачината на струјата по воспоставувањето на светењето на светилката? Каква е оваа промена и како може да се објасни?

Пример задачи

4. Во насока кон запад со брзина $v = 10^5$ m/s се движат позитивно наелектризиран јони со концентрација $5 \cdot 10^8$ јони на метар кубен. Во истото подрачје, во насока североисток со брзина 10^8 m/s се движат електрони со густина 10^{17} на метар кубен. (Ваква ситуација е, се разбира, само

претпоставена). Која е насоката на векторот на густината на струјата и колкава е неговата големина?



Сл. 5.20

Решение:

За решавање на оваа задача ќе ја искористиме релацијата (5.7) :

$$\vec{j} = Q_+ n^+ \vec{v}_+ + Q_- n^- \vec{v}_-$$

а брзините на јоните и електроните се насочени како што е прикажано на сликата 5.20.

При тоа треба да знаеме дека $Q_+ = 2e$, а $Q_- = -e$, па ќе биде:

$$\vec{j} = 2e n^+ \vec{v}_+ - e n^- \vec{v}_- \quad (*)$$

Ако равенката (*) се quadriра, ќе се добие:

$$j^2 = 4e^2 (n^+ v_+)^2 + e^2 (n^- v_-)^2 - 4e^2 n^+ n^- v_+ v_- \cos(v_+, v_-)$$

$$j^2 = e^2 \left[4(n^+ v_+)^2 + (n^- v_-)^2 - 4n^+ n^- v_+ v_- \cos 135^\circ \right].$$

Бидејќи $\cos 135^\circ = -\cos 45^\circ = -\sqrt{2}/2$ тогаш:

$$j^2 = e^2 \left[4(n^+ v_+)^2 + (n^- v_-)^2 + 4 \frac{\sqrt{2}}{2} n^+ n^- v_+ v_- \right]$$

$$j = 1,6 \cdot 10^{-19} \sqrt{20 \cdot 10^{12} \cdot 10^{10} + 10^{34} \cdot 10^{12} + 2\sqrt{2} \cdot 10^5 \cdot 10^6 \cdot 5 \cdot 10^6 \cdot 10^{17}} \approx 1,6 \cdot 10^4 \frac{\text{A}}{\text{m}^2}$$

Се гледа дека главен придонес во струјата даваат електроните. Според тоа и прарецот на векторот на брзината има насока:

$$\vec{j} = \vec{j}_- = -e n^- \vec{v}_-$$

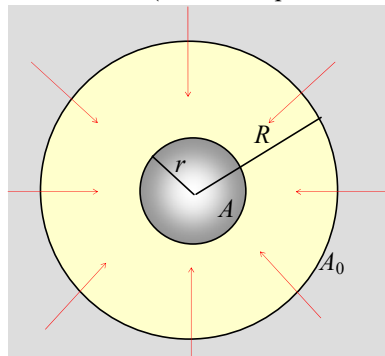
обратна од брзината на електроните, значи кон југозапад.

5. Густината на струјата на позитивни честици низ сферна површина со радиус $R = 8 \text{ cm}$ е $j_0 = 5 \cdot 10^{-7} \text{ A/m}^2$ која има насока кон центарот на сферата. (Ваква струја тешко дека би можела да се реализира, но претпоставете дека е можна). Внатре во центарот на шупливата сферна површина е сместена метална топка со радиус $r = 2 \text{ cm}$. По колкаво време металната топка ќе се наелектризира така што меѓу сферите ќе се создаде поле со јачина $E = 3 \cdot 10^6 \text{ V/m}$ (поле на пробив во воздух).

Решение:

Вкупната струја што поминува низ површината A_0 (слика 5.21) е истата таа која што поминува низ површината A . Согласно равенката на континуитет, струјата е:

$$I = \frac{dQ}{dt} = - \oint_{A_0} \vec{j}_0 d\vec{A}_0.$$



Сл. 5.21

Бидејќи $\vec{j}_0$ има спротивен знак со векторот на површина $d\vec{A}_0$ ќе биде:

$$I = \frac{dQ}{dt} = \vec{j}_0 \oint_{A_0} d\vec{A}_0 = \vec{j}_0 \cdot \vec{A}_0 = 4\pi R^2 \vec{j}_0.$$

При течење на оваа струја доаѓа до натрупување на полнежи на површината A , па ќе се создаде електрично поле чија што големина е определена со:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}.$$

Времето за коешто ова поле ќе се создаде, може да се најде од релацијата:

$$I = \frac{dQ}{dt}.$$

Бидејќи j е со константна големина :

$$I = \frac{Q}{t} = 4\pi R^2 j_0 \quad \Rightarrow \quad t = \frac{Q}{4\pi R^2 j_0}$$

со внесување на вредностите за Q , добиени од равенката за полето:

$Q = 4\pi\epsilon_0 r^2 E$, се добива:

$$t = \frac{Q}{4\pi R^2 j_0} = \frac{4\pi\epsilon_0 r^2 E}{4\pi R^2 j_0} = \epsilon_0 \left(\frac{r}{R}\right)^2 \frac{E}{j_0} = 8,86 \cdot 10^{-12} \left(\frac{2}{8}\right)^2 \frac{2 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^{-7}} = 3,32 \text{ s}.$$

6. Отпорот на еден спроводник е $R = 0,1 \, \Omega$, неговата должина е $l = 1 \text{ m}$, а напречен пресек, $A = 1 \text{ mm}^2$. Најдете го специфичниот електричен отпор ρ на материјалот од кој е направен спроводникот.

Решение:

Според Омовиот закон за електричен отпор:

$$\rho = \frac{R \cdot A}{l} = \frac{0,1 \cdot 10^{-6}}{1} = 10^{-7} \, \Omega \cdot \text{m}$$

7. Два цилиндрични спроводника се направени од ист материјал. Колку пати се разликуваат нивните отпори, ако вториот спроводник има два пати поголема маса и три пати помала должина?

Решение :

Согласно Омовиот закон за отпор:

$$R_1 = \rho \frac{l_1}{A_1} \quad R_2 = \rho \frac{l_2}{A_2}$$

Маса на секој од спроводниците е:

$$m_1 = d \cdot l_1 A_1 \qquad m_2 = d \cdot l_2 A_2,$$

каде што со d ја означивме густината на материјалот . Пресеците:

$$A_1 = \frac{m_1}{d \cdot l_1} \qquad A_2 = \frac{m_2}{d \cdot l_2}.$$

Отпорите:

$$R_1 = \rho \frac{l_1}{A_1} = \rho \cdot d \frac{l_1^2}{m_1} \qquad R_2 = \rho \frac{l_2}{A_2} = \rho \cdot d \frac{l_2^2}{m_2}.$$

Ако овие две равенки се поделат и се внесат условите на задачата се добива:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{l_1^2 m_2}{l_2^2 m_1} = \frac{(3l_2)^2 2m_1}{l_2^2 m_1} = 18.$$

8. Колку ќе се промени отпорот R на телефонската жица при премин лето-зима ако таа е направена од железо со напречен пресек $A = 10 \text{ mm}^2$, а должината и е 100 km. Температурата лето-зима се менува во интервал од $t_{\text{zime}} = -30^\circ \text{C}$ до $t_{\text{lete}} = +30^\circ \text{C}$.

Специфичниот отпор на железото е $\rho = 0,087 \text{ }\mu\Omega\cdot\text{m}$. Температурен коефициент на железото е $\alpha = 6 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Решение:

Согласно релацијата (5.25), за отпорот важи:

$$R_{\text{lete}} = R_0 (1 + \alpha t_{\text{lete}}) \qquad R_{\text{zime}} = R_0 (1 + \alpha t_{\text{zime}})$$

$$\Delta R = R_{\text{lete}} - R_{\text{zime}} = R_0 \alpha (t_{\text{lete}} - t_{\text{zime}})$$

$$R_0 = \rho \frac{l}{A} \qquad \Delta R = \rho \frac{l}{A} \alpha \Delta t = 313,2 \text{ }\Omega$$