

Електричен ток – големина, плътност и посока. Условия за протичане на постоянен електричен ток. Странични сили. Електродвижещо напрежение. Напрежение. Закон на Ом за еднороден и нееднороден участък от електрична верига. Електрично съпротивление на проводниците

Електричен ток – големина, плътност и посока. Условия за протичане на постоянен електричен ток

Електричен ток наричаме всяко насочено движение на електрични заряди. В проводниците се осъществява насочено движение на свободни електрични заряди, което се нарича ток на проводимост – напр. в металните проводници това са свободните електрони, в електролитите са положителни и отрицателни йони, в газовете насочено се движат йони и електрони.

Акумулатор, волтова дъга, мълния ...

Следователно, за да протича електричен ток трябва да има наличие на свободни заряди и причина, поради която тези заряди да се движат насочено (заредените частици, както и всички други частици, изграждащи веществото, се намират в непрекъснато движение, но то е хаотично – топлинно движение).

Основните характеристики на електричния ток са посока, големина и плътност. За посока на електричния ток се приема посоката, в която се движат положителните електрични заряди. В металните проводници се движат електрони, които имат отрицателен заряд и следователно се движат в посока, обратна на посоката на тока. Големината на тока I е скаларна физична величина, която се определя от количеството електричен заряд dq , преминаващо през сечението на даден проводник за единица време:

$$(1) I = \frac{dq}{dt}.$$

Мерната единица за големина на тока ампер [A] е една от основните единици в система SI. От (1) можем да изразим и мерната единица за електричен заряд кулон [C] чрез основните единици в SI – $1C=1A.1s$.

Понякога е удобно да използваме векторна величина за описание на електричния ток. Затова за характеризиране на електричния ток се въвежда още величината плътност на тока $\vec{j}$ – векторна физична величина, която се определя от големината на тока, преминаващ през единица площ от напречното сечение S на даден проводник. Големината на $\vec{j}$ се определя от:

$$(2) j = \frac{dI}{dS},$$

а посоката на вектора $\vec{j}$ съвпада с посоката на тока. Мерната единица за плътност на тока е ампер на квадратен метър [A/m²].

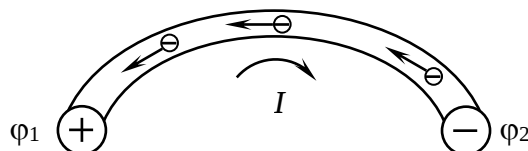
В този раздел ще разглеждаме само постоянен електричен ток. Ако големината и посоката на тока с течение на времето се запазват постоянни, токът се нарича постоянен. Тогава (1) и (2) могат да се запишат:

$$I = \frac{q}{t} = \text{const}, q = It$$

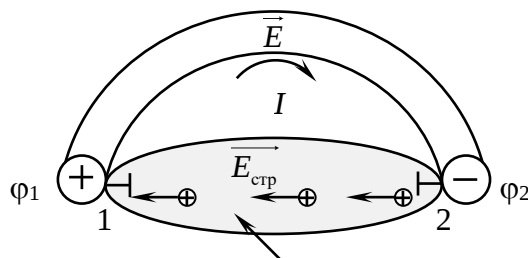
и

$$j = \frac{I}{S}, I = jS.$$

Нека сега да определим какви условия трябва да са изпълнени за да протича постоянен електричен ток в един проводник. Ако имаме две заредени с противоположни заряди тела (фиг. 1) и ги свържем с метален проводник, през него ще протече ток. Електроните в проводника ще се придвижат в посока на положително зареденото тяло, но токът няма да е постоянен – големината му ще намалява до изравняване на потенциалите на двете заредени тела и тогава токът ще се прекрати. Следователно, трябва да осигурим постоянна потенциална разлика между краищата на проводника, т.е. да осигурим постоянен интензитет на полето вътре в проводника. За да се запази тази потенциална разлика при постоянен интензитет трябва да преместваме обратно зарядите



фиг. 1



Източник на електрична енергия

фиг. 2

(ще приемем за опростяване на разглеждането, че те са положителни, за да съвпадат посоката на движението им и посоката на тока) в началното им положение, в противен случай те ще се натрупват върху едното тяло. Следователно веригата трябва да бъде затворена (фиг. 2). Това обаче не е достатъчно за да преместим зарядите – те не могат да се движат в посока обратна на полето само под действие на електростатичните сили т.е. в част от веригата трябва да действат и други, неелектростатични сили. Те трябва да извършват работа против електростатичните сили – да движат положителните заряди към положителния полюс, а следователно да внасят допълнителна енергия. Т.е. между точките **1** и **2** трябва да има включен източник на електрична енергия. Така получаваме трите условия за протичане на постоянен ток:

- интензитетът $\vec{E}$ на полето в проводника трябва да бъде различен от нула и постоянен с течение на времето;
- веригата на постоянния електричен ток трябва да бъде затворена;
- в някой участък от затворената верига на свободните електрични заряди, освен кулоновите (електростатичните) сили, е необходимо да действат и други, неелектростатични сили, които се наричат странични.

Странични сили. Електродвижещо напрежение. Напрежение

Ще разгледаме по-подробно страничните сили и начинът, по който те осъществяват протичането на постоянен ток. Както казахме по-горе страничните сили могат да се създават чрез източници на електрична енергия (гальванични елементи, акумулатори, генератори и др.). Тъй като те действат на електричните заряди можем да предположим, че те също създават някакво електрично поле (неелектростатично) и можем да въведем характеристика на това поле – интензитет на полето на страничните сили $\vec{E}_{\text{стр}}$. Следователно, **страничните сили са сили с неелектростатичен произход, които създават електрично поле и пренасят заряд в източника на електрична енергия в посока, обратна на посоката на електростатичното поле.** Тогава големината на страничните сили ще се дава със зависимост, подобна на тази, която получихме за Кулоновите (електростатични) сили ($\vec{F} = q\vec{E}$):

$$\vec{F}_{\text{стр}} = q\vec{E}_{\text{стр}}.$$

Работата на електростатичните сили за пренасяне на единица положителен заряд между две точки от полето е равна на взетата със знак минус разлика между потенциалите на двете точки:

$$\frac{A}{q} = \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{r} = -(\varphi_2 - \varphi_1) = -\Delta\varphi_{12}.$$

Нека да пресметнем работата на страничните сили вътре в източника (фиг. 2) за пренасяне на положителния електричен заряд q :

$$dA_{\text{стр}} = \vec{F}_{\text{стр}} \cdot d\vec{r} = q\vec{E}_{\text{стр}} \cdot d\vec{r}$$

$$A_{\text{стр}} = \int_2^1 dA_{\text{стр}} = q \int_2^1 \vec{E}_{\text{стр}} \cdot d\vec{r}$$

$$\frac{A_{\text{стр}}}{q} = \int_2^1 \vec{E}_{\text{стр}} \cdot d\vec{r} = \mathcal{E}_{12}.$$

Величината $\mathcal{E}_{12}$ се нарича електродвижещо напрежение (ЕДН) на източника и представлява **работата, извършена от страничните сили, за пренасяне на единица положителен заряд вътре в източника на електрична енергия.** Затова тези източници се наричат също и източници на ЕДН. Вижда се, че мерната единица за ЕДН е същата както за потенциална разлика и потенциал – волт [V].

Ако в някакъв участък 1–2 от електрична верига действат и Кулонови и странични сили, общата работа A_{12} за пренасяне на единица положителен заряд от т. **1** до т. **2** ще бъде сума от работите, извършени от двата вида сили:

$$\frac{A_{12}}{q} = \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{r} + \int_1^2 \vec{E}_{\text{стр}} \cdot d\vec{r} = -\Delta\varphi_{12} + \mathcal{E}_{12} = U_{12}$$

Величината U_{12} , която се определя от общата работа на Кулоновите и страничните сили за пренасяне на единица положителен заряд от т. **1** до т. **2** се нарича **напрежение (или пад на напрежението) между точките 1 и 2.** Понятието напрежение е обобщение на понятието потенциална разлика. Ако в дадения

участък 1–2 от електричната верига няма включено електродвижещо напрежение ($\mathcal{E}_{12}=0$), напрежението U_{12} в краищата му е равно на взетата със знак минус разлика от потенциалите в точките 1 и 2:

$$U_{12} = -\Delta\varphi_{12} = -(\varphi_2 - \varphi_1) = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Мерната единица за напрежение също е волт [V].

Закон на Ом за еднороден и нееднороден участък от електрична верига. Електрично съпротивление на проводниците

Досега въведохме две основни величини, характеризиращи постоянния ток – големина на тока и напрежение. Немският физик Г. Ом е установил експериментално връзката между тях при протичане на ток в метални проводници. Оказало се, че **големината на протичащия по проводника ток I е правопрпорционална на приложеното в краищата му напрежение U** (фиг. 3):

$$I = GU,$$

като коефициентът G не зависи от приложеното напрежение (за метални проводници) и е наречен проводимост на дадения проводник. Величината, обратна на G е наречена електрично съпротивление R . Така законът на Ом придобива познатия ни вид:

$$(3) I = \frac{U}{R}.$$

Експерименталната зависимост (3) може да бъде получена и теоретично от най-общи физични съображения. Ще изведем формулата на няколко етапа. Първо ще разгледаме най-простия случай на еднороден участък от електрична верига, т.е. такава част от веригата, в която няма включено ЕДН – проводник с дължина l и постоянно сечение S (фиг. 4). Тогава напрежението между краищата 1 и 2 на проводника е равно на потенциалната разлика:

$$(4) U_{12} = -\Delta\varphi_{12} = \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{r} = \int_1^2 E dr.$$

Нека да се опитаме да намерим връзка между напрежението (4) и големината на тока I , който тече през проводника. Големината на тока се определя от заряда, преминал през сечението S (фиг. 4) за единица време $I=q/t$. Зарядът q , преминал през сечението S за време t , е равен на броя N на електроните преминали през това сечение умножен по големината на заряда на електрона e :

$$q = Ne = nVe = nSxe = nSvte$$

$$I = \frac{q}{t} = nevS,$$

където n е концентрацията на свободните електрони (броят в единица обем), v е средната им скорост на насочено движение, а $V=xS$ е обемът, в който се намират зарядите, които могат да преминат през това сечение. Този обем зависи от разстоянието x , което могат да изминат електроните за време t , а следователно и от скоростта им – $x=vt$. Скоростта v зависи от интензитета на полето E – $v=kE$. Тогава получаваме:

$$(5) I = nekES.$$

Ако използваме връзката между големината и плътността на тока ($j=I/S$) ще получим:

$$j = nev$$

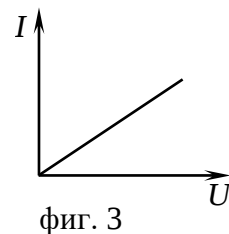
$$j = nekE = \sigma E,$$

където $\sigma=nek$ е коефициент, който не зависи от интензитета на полето и се нарича специфична проводимост на веществото, от което е направен проводникът. Мерната единица е сименс на метър [S/m]. Като имаме предвид, че векторите $\vec{j}$ и $\vec{E}$ са еднопосочни можем да запишем:

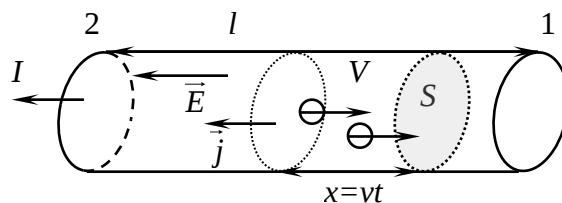
$$(6) \vec{j} = \sigma \vec{E}.$$

Това равенство (6) изразява закона на Ом в диференциална форма. В този вид законът се използва най-често в електротехниката. Ако изразим интензитета E на полето от (5) и го заместим в (4) можем да получим и закона на Ом за тази еднородна част от електричната верига, която разглеждаме, в познатата ни интегрална форма (3):

$$E = \frac{I}{nekS} = \frac{I}{\sigma S}$$



фиг. 3



фиг. 4

$$(7) U_{12} = \int_1^2 \frac{I}{\sigma S} dr = I \int_1^2 \frac{dr}{\sigma S} = IR_{12}, \quad I = \frac{U_{12}}{R_{12}}.$$

Величината $R_{12} = \int_1^2 \frac{dr}{\sigma S}$ наричаме електрично съпротивление на проводника в участъка 1–2. В

разглеждания случай (метален проводник с постоянно сечение S , чиято специфична проводимост σ е постоянна величина) можем да запишем:

$$R = \int_1^2 \frac{dr}{\sigma S} = \frac{1}{\sigma S} \int_1^2 dr = \frac{1}{\sigma} \frac{l}{S}$$

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

т.е. стигаме до познатата ни формула за съпротивлението, известна още като втори закон на Ом. Мерната единица за съпротивление е ом $[\Omega]$. Величината $\rho = 1/\sigma$ се нарича специфично електрично съпротивление и зависи само от веществото, от което е направен проводникът. Измерва се в ом по метър $[\Omega \cdot m]$. Виждаме, че съпротивлението на металните проводници не зависи от тока и напрежението, а само от размерите на проводника и веществото, от което е направен.

Експериментално е установено, че за голяма част от металите и техните сплави зависимостта на съпротивлението R от температурата t (в $^{\circ}C$) в широк температурен интервал е линейна:

$$R(t) = R_0 (1 + \alpha t),$$

където R_0 е съпротивлението на проводника при $0^{\circ}C$, а α се нарича температурен коефициент на съпротивлението и се измерва в K^{-1} . Следователно електричното съпротивление на металните проводници зависи и от температурата.

Крушка с нагреваема жичка, нагревател ...

Тъй като (5) е записано за еднородна част от веригата, напрежението $U_{12} = -\Delta\phi_{12}$. Така получаваме законът на Ом за еднородната част 1–2 от веригата:

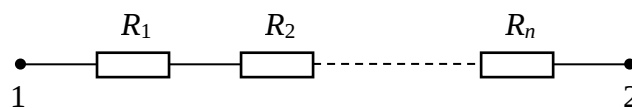
$$I = \frac{U_{12}}{R_{12}} = \frac{-\Delta\phi_{12}}{R_{12}}.$$

Има два основни способа за свързване на съпротивления (консуматори) в дадена част от електрична верига – последователно и успоредно. При последователно свързване (фиг. 5) токът през всички консуматори трябва да е еднакъв (следствие от закона за запазване на електричния заряд), а общото напрежение е сума от падовете на напреженията върху всеки консуматор (напрежението е свързано с работата за пренасяне на заряда). Тогава, като приложим (7) за отделните консуматори и за целия участък 1–2, получаваме:

$$U_i = IR_i \quad U_{12} = IR_{12}$$

$$U_{12} = \sum_{i=1}^n U_i = I \sum_{i=1}^n R_i = IR_{12}$$

$$R_{12} = \sum_{i=1}^n R_i,$$



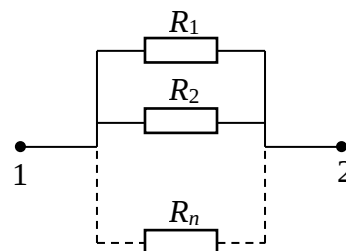
фиг. 5

т.е. общото (еквивалентното) съпротивление R_{12} на всички консуматори в участъка 1–2 е сума от съпротивленията R_i на отделните консуматори.

Ако консуматорите са свързани успоредно (фиг. 6), напреженията върху всички консуматори са равни на общото напрежение (всички са между точките 1 и 2), а общият ток е сума от токовете през отделните консуматори (ЗЗЕЗ). Тогава като приложим пак (7) за отделните консуматори и за целия участък получаваме:

$$I_i = \frac{U_{12}}{R_i} \quad I = \frac{U_{12}}{R_{12}}$$

$$I = \sum_{i=1}^n I_i = U_{12} \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} = U_{12} \frac{1}{R_{12}}$$



фиг. 6

$$\frac{1}{R_{12}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i},$$

т.е. реципрочната стойност на общото (еквивалентното) съпротивление е сума от реципрочните стойности на съпротивленията на отделните консуматори.

Свързване в битовата мрежа, претоварване на мрежата ...

Ако в дадения участък **1–2** от веригата имаме включено и ЕДН $\mathcal{E}_{12}$ (такъв участък се нарича нееднороден), напрежението $U_{12} = -\Delta\varphi_{12} + \mathcal{E}_{12}$ и **законът на Ом за нееднородна част от веригата ще бъде:**

$$I = \frac{-\Delta\varphi_{12} + \mathcal{E}_{12}}{R_{12} + r},$$

където R_{12} е еквивалентното съпротивление на всички консуматори в участъка **1–2**, а r е вътрешното съпротивление на източника.

Вътрешно съпротивление ...