

**ПОСТОЯНЕН ЕЛЕКТРИЧЕН  
ТОК.**

**ВИДОВЕ ТОКОВЕ.**

**ГОЛЕМИНА И ПЛЪТНОСТ НА  
ТОКА.**

**ЗАКОНИ НА ОМ И КИРХОФ.**

**РАБОТА И МОЩНОСТ НА  
ПОСТОЯННИЯ ТОК.**

**ЗАКОН НА ДЖАУЛ-ЛЕНЦ.**

# I. ЕЛЕКТРИЧЕН ТОК

1.Определение: **Всяко насочено движение на електрични заряди наричаме ЕЛЕКТРИЧЕН ТОК.**

2.Видове токове: спрямо относителното движение на токовете носители и средата говорим за:

**а/ ток проводимост:** Свободните токовете носители се движат в неподвижна среда.

**б/ конвекционален ток:** Зарядите в средата са неподвижни спрямо средата, а средата извършва механично преместване в пространството.

**в/ поляризационен ток:** Той се наблюдава в диелектрици поставени във външно електрично поле. Това по същество е движение на свързани заряди, което се изразява в преместване на ефективните положителни и отрицателни центрове на неполярните молекули при електронната поляризация, в завъртане на електричните диполи по направление на полето при ориентационна поляризация, взаимно отместване на подрешетките на положителните и отрицателните заряди в един йонен кристал. Това преместване се извършва в рамките на разстояния сравними с константата на кристалната решетка.

3.Класификация на тока на проводимост в зависимост от видовете свободни токови носители:

**а/ток в метали:** свободните токови носители са електроните. Те се движат свободно и хаотично в метала образувайки т.нар. електронен газ, който играе съществена роля при формирането на металната връзка.

**б/ ток в полупроводници:** Свободните токови носители са електроните в зоната на проводимост и дупките (положително заредените вакантни места на електроните).

**в/ ток в електролити:** В разтвори на соли основи и киселини поради електролитната дисоциация последните се разпадат (дисоциират) на положителни и отрицателни йони, които се движат свободно и хаотично в електролита. Тук тока пренася маса.

**г/ ток в газове:** газовете са добри изолатори и в тях няма свободни токови носители. Необходима е причина създаваща и поддържаща свободни токови носители, която наричаме **ЙОНИЗИРАЩА ПРИЧИНА**. Това са ултравиолетови лъчи, Рентгенови лъчи, Гама лъчи, Високо енергетични елементарни частици и загряване на газа. При действие на йонизиращата причина от неутрална молекула или се избива електрон, който движейки се в газа се присъединява към неутрална молекула и образува отрицателен йон.

**д/ ток във вакуум:** Липсват токови носители и трябва да бъдат създадени. Това става посредством термоелектронна емисия (отделяне на електрони от метал при неговото загряване) или външен фотоефект (отделяне на електрони от метал при облъчване на последния със светлина). Токът във вакуум няма съпротивление и електронните потоци могат лесно да се управляват от електрични и магнитни полета.

4. Основни свойства на електричния ток:

**1/ Създава около себе си магнитно поле.**

**2/ Има химични проявление при електролитите** т.нар. електролиза.

**3/ Има топлинно действие:** на насоченото движение на зарядите се противопоставя топлинното движение на частиците в средата. Електроните из-

вършвайки удари със частиците от средата отдават част от своята енергия, която се превръща във вътрешна енергия на средата и се отделя топлина.

## 5. Условия за ток на проводимост:

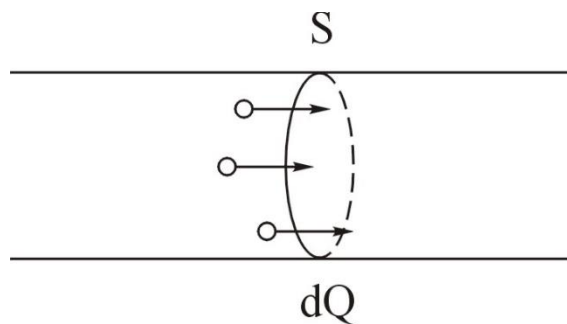
1/ да има в средата свободни токове носители.

2/ да има създадено електрично поле с интензитет  $E$  и напрежение  $U$  между всеки две негови точки. Под действието на това поле на свободните токови носители действат Кулонови сили и те започват да се движат по посока на полето ако токовете носители са положителни и по посока обратна на полето ако са отрицателни.

3/ Трябва да имаме устройство което да поддържа наличието на свободни токови носители т.е. да поддържа потенциалната разлика между всеки две точки от средата. Такова устройство наричаме източник на ток или източник на електродвижещо напрежение (ЕДН)

## 6. Количествени характеристики на тока:

a/ **ГОЛЕМИНА ТОКА:** Това е количеството заряд преминал за единица време през сечението на проводника или средата.

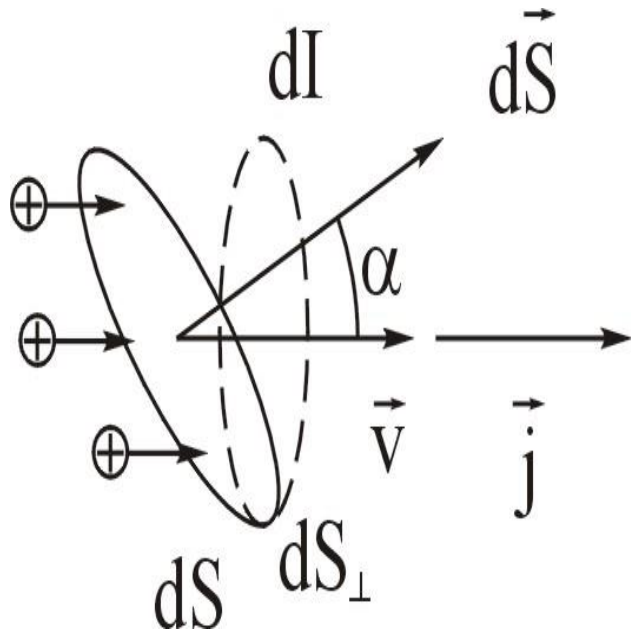


$$I = \frac{dQ}{dt} [A]$$

Големината на тока е скаларна величина и по конвенция се приема, че под положителна посока на тока приемаме посоката на движение на положителните заряди. Единицата за

големина на тока е “ампер”. 1А е големината на тока ако през сечението на проводника за 1s е преминал заряд с големина 1С.

**б/ ПЛЪТНОСТ НА ТОКА:** това е количеството заряд което е протекло за единица време праз единица напречно сечение разположено перпендикулярно на движението на токовите носители.



$$j = \frac{dQ}{dt dS_{\perp}} = \frac{dQ}{dt dS \cos \alpha} \left[ \frac{A}{m^2} \right]$$

Ако с аксиалния вектор  $dS$  ориентиране повърхността и със  $\alpha$  означим ъгъла между посоката на тока и нормалата към площта  $dS$  за големината на тока  $dI$  имаме:

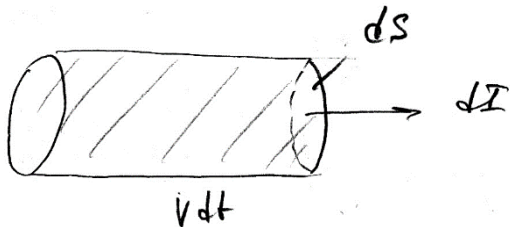
$$dI = j dS \cos \alpha = \vec{j} \cdot d\vec{S}$$

Т.е. плътността на тока е векторна величина, посоката на която се определя от посоката на движението (скоростта) на положителните токови носители.

За големината на тока през произволно сечение можем да запишем.

$$I = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S}$$

Плътноста на тока може да се дефинира и така: Нека определим какво е количеството ток, който за време  $dt$  минава през сечение  $dS$ . Нека с  $v$  да означим средната скоростта на токовите носители. Това са всички



заредени частици, които се намират в обем с основа  $dS$  височинана  $vdt$ . Този обем има големина  $vdt dS$ . Ако с  $N$  начим промяна на токовите носители в обема на целия проводник то броя на токовите носители  $dN$  които ще се намират в този обем е:

$$dN = N \frac{vdt dS}{V} = n v dt dS$$

Тогава за количеството заряд преминал през това сечение имаме:

$$dQ = q dN = q n v dt dS \rightarrow j = \frac{dQ}{dt dS} = q n v$$

Във векторна форма за плътността на тока имаме:

$$\vec{j} = q n \vec{v}$$

Т.е. плътността на тока е произведение от средната скорост на токовите носители умножена по концентрацията  $n$  токовите носители и по стойността на заряда им.

За да протече електричен ток то трябва да имаме електрично поле т.е. плътността на тока ще зависи по-някакъв начин от интензитета на полето:

$$\vec{j} = \vec{j}(\vec{E})$$

При не големи стойности на интензитета на полето експериментално е доказано, че съществува линейна връзка между плътността на тока и интензитета на полето т.е.

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

**ТОВА НАРИЧАМЕ ЗАКОН НА ОМ ЗА ЧАСТ ОТ ВЕРИГАТА В ДИФЕРЕНЦИАЛНА ФОРМА.**

$\sigma$  наричане специфична проводимост и единиците в които се измерва е  $\Omega^{-1}\text{m}^{-1}$  и характеризира проводящите свойства на средата.

- Ако средата е изотропна и хомогенна то  $\sigma$  е скалар и плътността на тока и интензитета на полето са колинеарни.
- Ако средата е анизотропна то  $i$ -тата компонента на  $j$  зависи от всички компоненти на вектора на интензитета на електричното поле. Тогава  $j$  и  $E$  не са колинеарни т.е

$$j_i = \sigma_{ik} E_k$$

Специфичната проводимост е тензор от втори ранг който е симетричен и броя линейно независими компоненти се определя от точковата група на симетрия на кристала като компонентите му са реални числа.

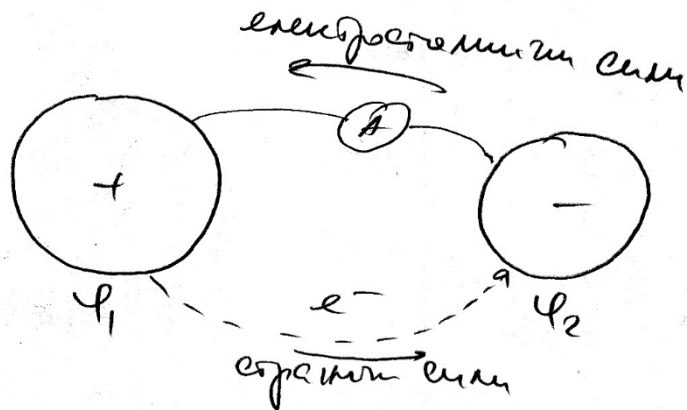
в/ Подвижност на токовете носители: От двата израза за плътността на тока ние можем да установим връзка между средната скорост на насоченото движение на токовете носители и причината пораждаща това движение интензитета на полето:

$$\left. \begin{aligned} \vec{j} &= \sigma \vec{E} \\ \vec{j} &= qn \vec{v} \end{aligned} \right\} \longrightarrow \vec{v} = \frac{\sigma}{qn} \vec{E} = \mu \vec{E}$$

Където: 
$$\mu = \frac{\sigma}{qn} \left[ \frac{m^2}{\Omega C} \right]$$

Величината  $\mu$  наричаме **подвижност** на токовете носители и определя бързодействието на интегралните схеми.

## 7. Източник на ток. Електродвижещо напрежение.



Нека си мислим две метални сфери заредени с противоположни заряди равни по големина. Нека свържем сферите с проводник. Поради потенциалната разлика между сферите през проводника ще започне насочено движение на електрони от отрицателно към положително заредената сфера. Този ток обаче бързо ще намалее във времето и когато потенциалите на двете сфери се изравнят то ток няма да протича.



За да може да протича постоянно електричен ток то е необходимо да имаме устройство, което постоянно на прехвърля електрони от положително заредената сфера към отрицателната като така поддържа постоянна потенциалната разлика. Това означава ние да извършваме работа срещу електричните сили, т.е. върху зарядите ще действат сили обратно насочени на електричните и ние ще ги наричаме **странични сили и ще ги бележим с  $F^*$** . Тези сили нямат електростатичен характер те имат механичен или химичен произход. За тях аналогично на интензитета на електричното поле ще дефинираме интензитет на страничните сили и ще бележим с  $E^*$  като ще е в сила равенството.

$$\vec{F}^* = q\vec{E}^*$$

Като работата която извършват страничните сили при пренасяне на единица заряд от положителния полюс към отрицателния полюс наричаме **Електро Движещо Напрежение - ЕДН**.

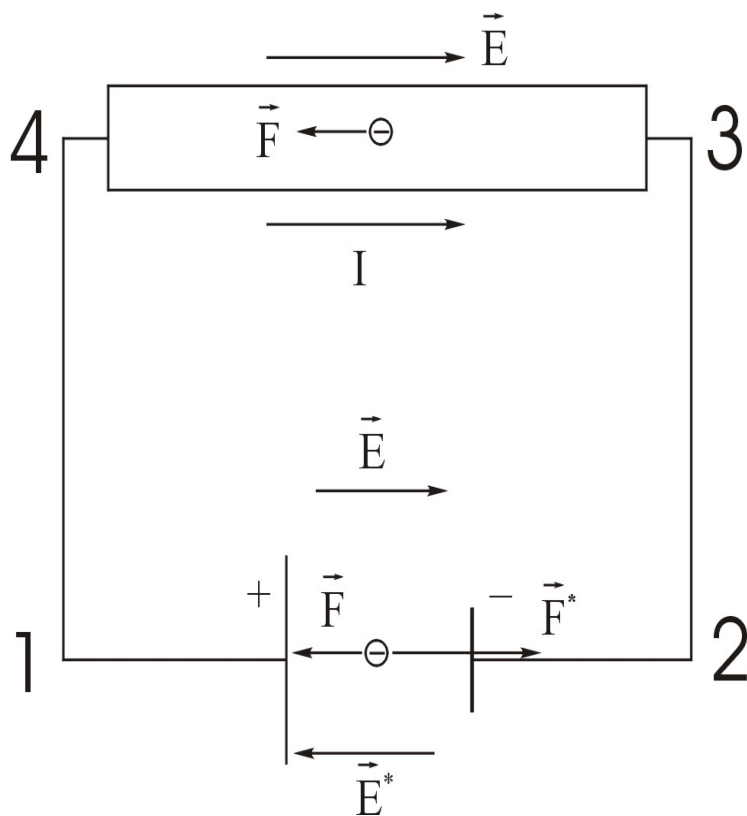
$$\mathcal{E} = \frac{A^*}{q}$$

Всяко устройство в което възникват странични сили наричаме **ИЗТОЧНИК НА ТОК ИЛИ ИЗТОЧНИК НА ЕДН**. ОСНОВНАТА МУ ЦЕЛ Е ДА ПОДДЪРЖА НЕПРЕКЪСНАТО ЕЛЕКТРИЧНОТО ПОЛЕ ИЛИ ЕЛЕКТРИЧНОТО НАПРЕЖЕНИЕ И ДА ЗАТВАРЯ ВЕРИГАТА. ТОЧКАТА В ИЗТОЧНИКА, КОЯТО ИМА НАЙ-ВИСОК ПОТЕНЦИАЛ НАРИЧАМЕ **ПОЛОЖИТЕЛЕН ПОЛЮС**, А ТАЗИ С НАЙ-НИСЪК ПОТЕНЦИАЛ **ОТРИЦАТЕЛЕН ПОЛЮС**.

Използвайки определението за работа на страничните сили можем да запишем:

$$A^* = \int_L \vec{F}^* \cdot d\vec{l} = q \int_L \vec{E}^* \cdot d\vec{l} = q\varepsilon$$

$$\varepsilon = \int_L \vec{E}^* \cdot d\vec{l}$$



а/ Електрическа верига: **СИСТЕМА ОТ КОНСУМАТОР, СВЪРЗВАЩИ ПРОВОДНИЦИ И ИЗТОЧНИК НА ЕДН НАРИЧАМЕ ЕЛЕКТРИЧСКА ВЕРИГА**. В нея може да протича ток само ако е **ЗАТВОРЕНА (НЕПРЕКЪСНАТО СВЪРЗАНА)**. Консуматора и проводниците между двата полюса наричаме **ВЪНШНА ЧАСТ НА ВЕРИГАТА**, а източника на ЕДН – **вътрешна част на веригата**.

б/ Хомогенен и нехомогенен участък от веригата.

1/ Участък от веригата (1-2), в който върху електричните заряди действат едновременно електростатични и странични сили наричаме **НЕХОМОГЕНЕН УЧАСТЪК**. За този участък ме:

$$\vec{F} + \vec{F}^* = q(\vec{E} + \vec{E}^*)$$

За работата която тези сили извършват за пренасяне на заряд от точка 1 до точка 2 имаме:

$$A_{12} = q \int_L (\vec{E} + \vec{E}^*) \cdot d\vec{l} = q \left( \int_L \vec{E} \cdot d\vec{l} + \int_L \vec{E}^* \cdot d\vec{l} \right)$$

$$A_{12} = q(\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon) = qU_{12}$$

Величина наричаме  $U_{12}$  наричаме пад на напрежението или просто напрежение в дадения участък от веригата.

$$U_{12} = (\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon)$$

2/ участък (3-4) от веригата, в който странични сили не действат т.е. нямаме включен източник на ЕДН наричаме хомогенен и за него е в сила

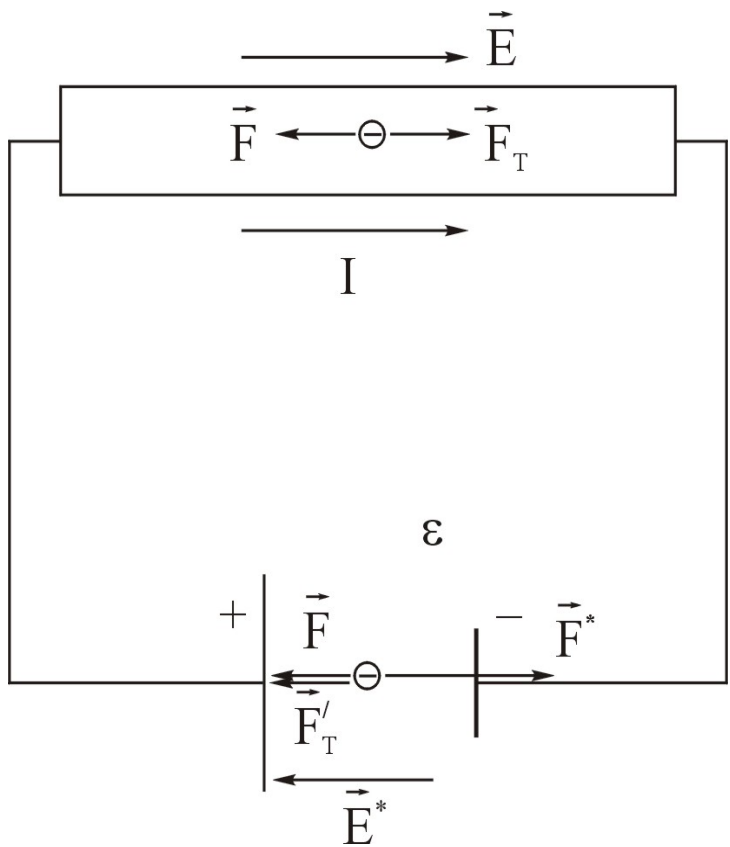
$$U_{34} = (\varphi_1 - \varphi_2)$$

Т.е. напрежението е равно на потенциалната разлика в краищата на хомогенния участък.

3/ За цялата верига имаме:

$$A = q \oint_L (\vec{E} + \vec{E}^*) \cdot d\vec{l} = q \left( \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} + \oint_L \vec{E}^* \cdot d\vec{l} \right) = q \oint_L \vec{E}^* \cdot d\vec{l} = q\varepsilon$$

## 8. Физични процеси във верига на постоянен постоянен ток.



а/ във външната част на веригата. Токът във веригата е постоянен, което означава че скоростта на насоченото движение на електроните е постоянна. Ударите на електроните в градивните частици на тялото може да се охарактеризира като сила на триене  $F_T$  обратно насочена на движението на електроните. Във външната част на веригата електростатичните сили извършват работа за преодоляване на силите на съпротивление:

$$\vec{F} = -\vec{F}_T$$

б/ Във вътрешната част на веригата: Страничните сили извършват работа срещу електричните сили  $F$  и силите на вътрешно съпротивление  $F'_T$  т.е:

$$\vec{F}^* = -(\vec{F}'_T + \vec{F})$$

в/ В цялата верига: Сумата от всички действащи сили е нула:

$$\vec{F}^* + \vec{F}'_T + \vec{F} + \vec{F}_T = \mathbf{0}$$

Доколкото електростатичните сили за консервативни и по затворения контур не вършат работа следва, че цялата работа извършена от страничните сили отива за преодоляване на външните и вътрешните сили на триене.

# II. ЗАКОНИ НА ОМ И КИРХОФ

1. Закон на Ом за част от веригата (за хомогенен участък):

а/ Диференциална форма: Както отбелязахме в проводника свободните електрони се движат под действието на електростатичното поле и при не много силни полета записахме:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

В практиката се използва реципрочната стойност на специфичната проводимост която наричаме специфично съпротивление.

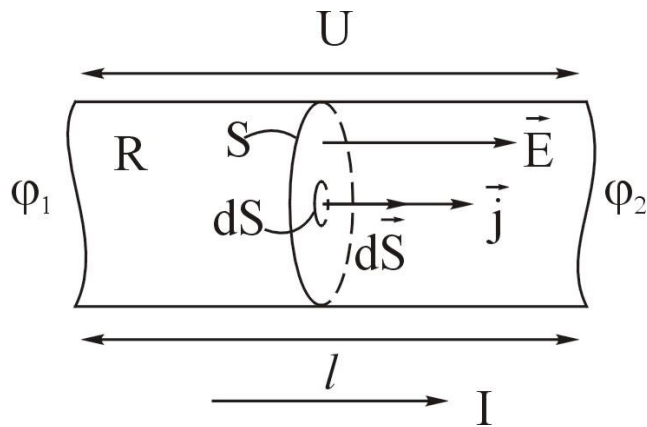
$$\rho = \frac{1}{\sigma} [\Omega.m]$$

Специфичното съпротивление характеризира способността на средата да се противопоставя на движението на електрони т.е. на протичане на ток. Енергията на насоченото движение на електроните т.е. енергията на електричното поле се превръща във вътрешна енергия на проводника и той започва да излъчва количество топлина. При металите опитно е установен следния закон за изменение на специфичното съпротивление от температурата:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t)$$

Където  $\rho_0$  определя специфичното съпротивление при  $t=0^\circ\text{C}$ .  
 $\alpha$  температурен коефициент на съпротивление.

б/ интегрална форма:



За големината на тока  $I$  протичащ през хомогенен участък имаме:

$$I = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = \int_S \sigma \vec{E} \cdot d\vec{S} =$$

$$= \int_S \sigma \frac{U}{l} dS = U \int_S \frac{1}{\rho l} dS = UG$$

Величината  $G$  наричаме проводимост и се дефинира с израза:

$$G = \int_S \frac{1}{\rho l} dS [Si]$$

Реципрочната стойност на  $G$  наричаме (активно) съпротивление и бележим с  $R$ . Ако напречното сечение на проводника не се променя по дължината на проводника имаме:

$$R = \frac{1}{G} = \frac{\rho l}{S} [\Omega]$$

Единицата за съпротивление е "ОМ". Съпротивлението на един проводник зависи от напречното му сечение и дължината. Съпротивлението нараства с нарастване на дължината на проводника и намаляване на неговото напречно сечение.

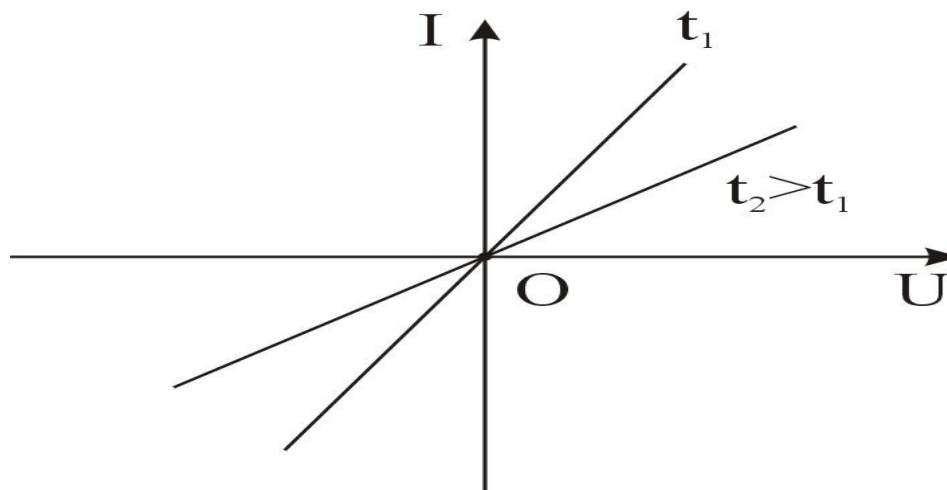
Ако напречното сечение на проводника се изменя по неговата дължина т.е  $S=S(l)$  за съпротивлението имаме:

$$R = \int_L \frac{\rho}{S(l)} dl$$

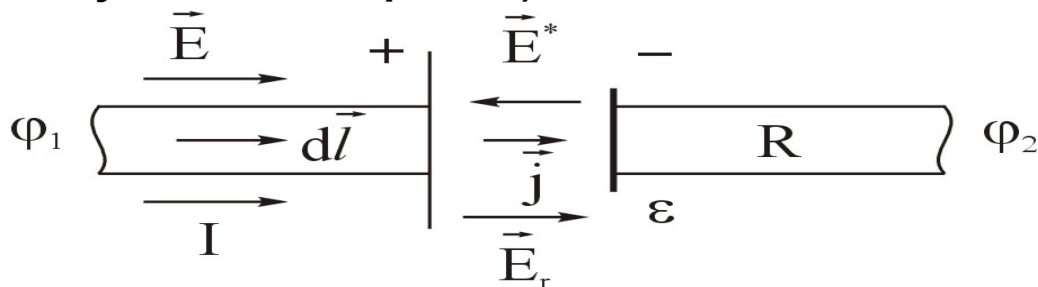
За закона на Ом за част от веригата получаваме:

$$I = \frac{U}{R}$$

Зависимостта на тока от напрежението в един хомогенен участък от веригата наричаме волт-амперна характеристика  $U=U(I)$



2. Закон на Ом за част от веригата в която има включен източник на ЕДН(за нехомогенен участък от веригата).



а/ диференциална форма: В тази част от веригата токовете носители се движат под действието на страничните сили с интензитет на полето  $E^*$  и електростатичните сили с интензитет на полето  $E$ . Тогава закона на Ом ЗА НЕГОМОГЕНЕН УЧАСТЪК ОТ ВЕРИГАТА има вида:

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{E}^*)$$

б/ интегрална форма: Нека интегрираме горното равенство по цялата дължина на проводника:

$$\int_L \vec{j} \cdot d\vec{l} = \int_L \sigma(\vec{E}^* + \vec{E}) \cdot d\vec{l} = \sigma \left( \int_L \vec{E}^* \cdot d\vec{l} + \int_L \vec{E} \cdot d\vec{l} \right)$$

$$= \frac{1}{\sigma} \int_L \vec{j} \cdot d\vec{l} = (\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon)$$



Обаче:

$$\frac{1}{\sigma_L} \int \vec{j} \cdot d\vec{l} = \frac{1}{\sigma_L} \int j dl \cos 0^\circ = \frac{1}{\sigma_L} \int \frac{I}{S} dl = I \int \frac{\rho}{S(l)} dl = IR_{12}$$

Сравнявайки последните два израза за **закона на Ом** получаваме:

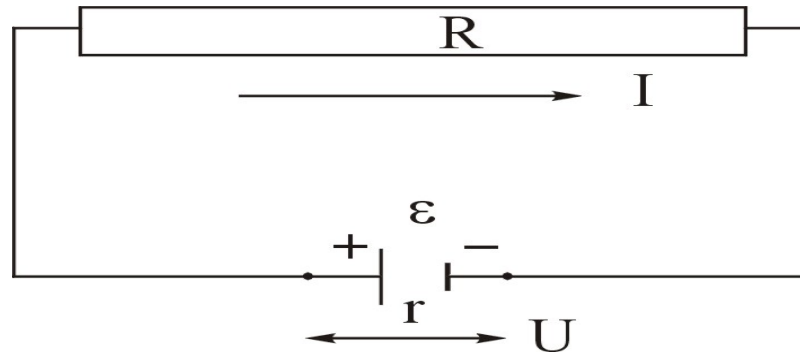
$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon}{R_{12}}$$

$R_{12}$  наричаме общо съпротивление на участъка: и то се явява сума от съпротивлението  $R$  на проводника и съпротивлението  $r$  на източника (вътрешно съпротивление).

$$R_{12} = R + r$$

**ГОЛЕМИНАТА НА ТОКА ПРОТИЧАЩ ПРЕЗ НЕХОМОГЕНЕН УЧАСТЪК ОТ ВЕРИГАТА Е РАВЕН НА СУМАТА ОТ ПОТЕНЦИАЛНАТА РАЗЛИКА  $\varphi_1 - \varphi_2$  И ЕДН  $\varepsilon$ , разделена на общото съпротивление  $R_{12}$ .**

### 3.Закон на Ом за цялата верига:



а/ дифференциална форма: За затворената електрическа верига циркулацията на интензитета на електростатичното поле е нула и тогава за дифференциалната форма на закона на Ом имаме.

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}^*$$

б/ интегрална форма: От закона на Ом за нехомогенен участък от веригата приложен към цялата верига където  $\varphi_1 = \varphi_2$  то за закона на Ом получаваме:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}$$

**Т.е ГОЛЕМИНАТА НА ТОКА В ЗАТВОРЕНА ВЕРИГА Е ПРОПОРЦИОНАЛНА НА ЕДН И ОБРАТНОПРОПОРЦИОНАЛНА НА СУМАТА ОТ ВЪНШНОТО И ВЪТРЕШНОТО СЪПРОТИЧЛЕНИЕ.**

в/следствия от закона на Ом за цялата верига:

1/при включен товар пада на напрежението в краищата на източника е по малък от ЕДН т.е  $U < \varepsilon$ , защото:

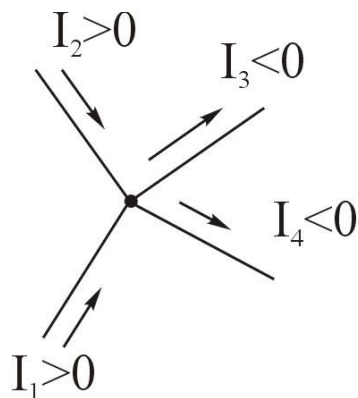
$$IR + Ir = \varepsilon \rightarrow IR = \varepsilon - Ir \rightarrow U = \varepsilon - Ir$$

2/Ако веригата е отворена т.е  $I=0$  тогава имаме  $U=\varepsilon$  т.е ЕДН е равно на напрежението  $U$  върху клемите на източника.

3/Ако  $R=0$  т.е клемите са свързани накъсо то: ще протече максимален ток и ще имаме:

$$I_{\max} = \frac{\varepsilon}{r}$$

4. Закони на Кирхоф. Използват се за изследване на сложни разклонени токови вериги и са следствие от закона за запазване на електричния заряд

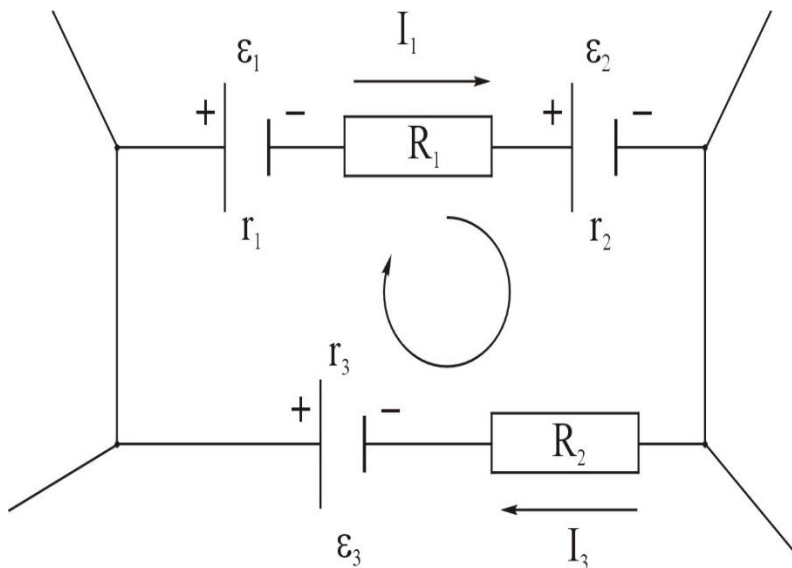


**а/възлова точка:** това е точка от веригата където събират повече от два проводника. В тази точка не могат да се натрупват електрични заряди.

**б/ПЪРВИ ЗАКОН НА КИРХОФ:** Алгебричната сума на всички токове влизащи в или излизащи от една възлова точка е нула т.е:

$$I = \sum_i I_i = 0$$

като токовете които влизат във възловата точка се вземат със знак + а тези които излизат със знак -.



**в/ ВТОРИ ЗАКОН НА КИРХОФ:** За всеки произволно избран затворен контур в една разклонена верига от проводници алгебричната сума от произведенията на големините на токовете  $I_i$  и съпротивленията  $R_i$  на съответните участъци на веригата е равна на алгебричната сума от ЕДН  $\varepsilon_k$  включени в контура т.е:

$$\sum_i I_i R_i = \sum_i \varepsilon_i$$

**г/ Правила при съставяне на уравненията:**

1/Избира се посока на обикаляне на контура

2/Ако посоката на тока в даден участък съвпада със избраната посока на обикаляне на контура тока се взема със знак + ако е в обратна посока със знак -.

3/Пред ЕДН се поставя знак + ако при обхождането на контура се преминава праз източника от отрицателната към положителната клемма, ако е обратно със знак -.

Ако приложим горните правила за начертания контур имаме:

$$I_1(R_1 + r_1 + r_2) + I_3(R_3 + r_3) = \varepsilon_3 - \varepsilon_1 - \varepsilon_2$$

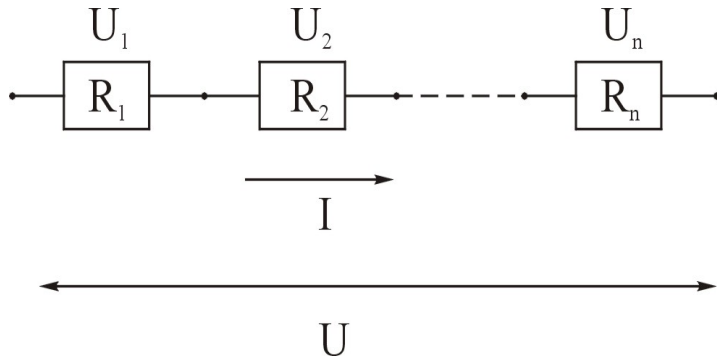
## 5. Последователно и успоредно свързване на съпротивления:

а/последователно свързване на съпротивления: При този начин на свързване

токът през съпротивленията е един и същ т.е:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_3$$

докато общото напрежение е сума от напреженията върху всяко съпротивление т.е



$$U = \sum_{i=1}^n U_i$$

Като използваме закона на Ом за хомогенен участък от веригата имаме:

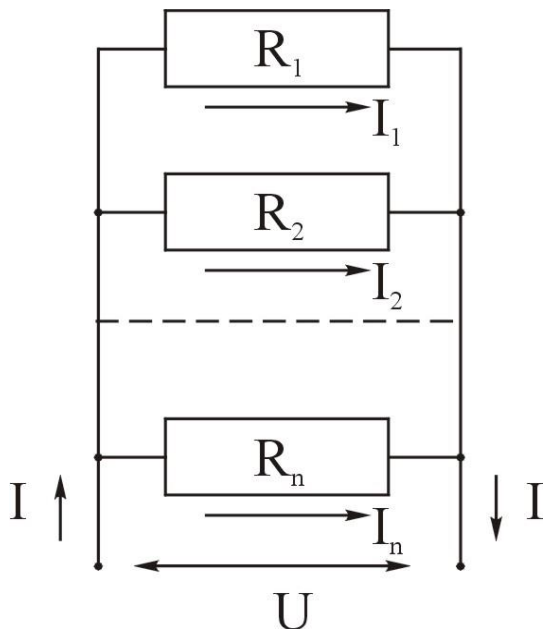
$$U = IR_{eff} = \sum_{i=1}^n U_i = \sum_{i=1}^n I_i R_i = I \sum_{i=1}^n R_i$$

Тогава получаваме:

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

**Т.е ефективното съпротивление нараства и то е сума от успоредно свързаните съпротивления**

**б/успоредно свързани проводници:** При този начин на свързване напрежението в краищата на всяко съпротивление е едно и също, а общия ток е сума от токовете през отделните съпротивления т.е:



**Тогава получаваме:**

$$I = \sum_{i=1}^n I_i$$

Като използваме закона на Ом за хомогенен участък от веригата имаме:

$$I = \frac{U}{R_{eff}} = \sum_{i=1}^n \frac{U_i}{R_i} = U \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$$

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

**Т.е реципрочната стойност на ефективното съпротивление е сумата от реципрочните стойности на съпротивленията които са свързани успоредно.**

# III. РАБОТА И МОЩНОСТ НА ПОСТОЯННИЯ ТОК

## РАБОТА

1. За хомогенен участък: Работа върши електростатичната сила при пренасяне на заряди през проводника. За работа  $A$  получихме  $A=QU=IU\Delta t$ . Като използваме закона на Ом  $U=IR$  имаме:

$$A = IU\Delta t = \frac{U^2}{R} \Delta t = I^2 R \Delta t$$

2. За нехомогенен участък от веригата:

$$\begin{aligned} A &= I(\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon)\Delta t = I^2(R + r)\Delta t = \\ &= \frac{(\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon)^2}{R + r} \Delta t \end{aligned}$$

3. За цялата верига:  $\varphi_1 = \varphi_2$  и тогава:

$$A^* = Q\varepsilon = I\varepsilon\Delta t = I^2(R + r)\Delta t = \frac{\varepsilon^2}{R + r} \Delta t$$

## МОЩНОСТ:

- Определение: Работата извършена за единица време:

$$P = \frac{A}{\Delta t}$$

1. За хомогенен участък:

$$P = IU = \frac{U^2}{R} = I^2 R$$

2. За нехомогенен участък от веригата:

$$\begin{aligned} P &= (\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon)I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2 + \varepsilon)^2}{R + r} = \\ &= I^2(R + r) \end{aligned}$$

3. За цялата верига:

$$P = I\varepsilon = \frac{\varepsilon^2}{R + r} = I^2(R + r)$$

# IV. ЗАКОН НА ДЖАУЛ-ЛЕНЦ

При протичане на ток по проводник под действието на силите на триене става превръщане на електрическата енергия във вътрешна енергия на средата. Средата повишава температурата си и отделя количество топлина  $Q$ .

Законът на Джаул-Ленц гласи, че мярка за отделеното количество топлина е работа която се извършва от електростатичните сили при протичане на тока:

$$Q_T = A$$

Тогава:

$$Q_T = IU\Delta t = \frac{U^2}{R} \Delta t = I^2 U \Delta t$$

Ако тока се изменя с времето имаме:

$$Q_T = \int_0^t RI^2(t) dt$$

Записан в диференциална форма закона на Джаул-Ленц има вида:

$$dQ_T = I^2 dR dt$$



Обаче:

$$\left. \begin{aligned} dR &= \frac{\rho dl}{S} \\ I^2 &= (jS)^2 \end{aligned} \right| \longrightarrow dQ_T = \frac{\rho dl}{S} \cdot (jS)^2 dt = \rho j^2 S dl dt = \rho j^2 dV dt$$

Величината:

$$w = \frac{dQ_T}{dV dt} = \rho j^2$$

**Плътност на топлинната мощност на тока.**

Закона на Джаул-Ленц в диференциална форма има вида:

$$dQ_T = w dV dt$$

За произволен проводник в общия случай имаме:

$$Q_T = \int_0^{\Delta t} \int_V w dV dt$$