



МЕДИЦИНСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ПЛОВДИВ
ФАКУЛТЕТ „Фармация“
ЦЕНТЪР ЗА ДИСТАНЦИОННО ОБУЧЕНИЕ

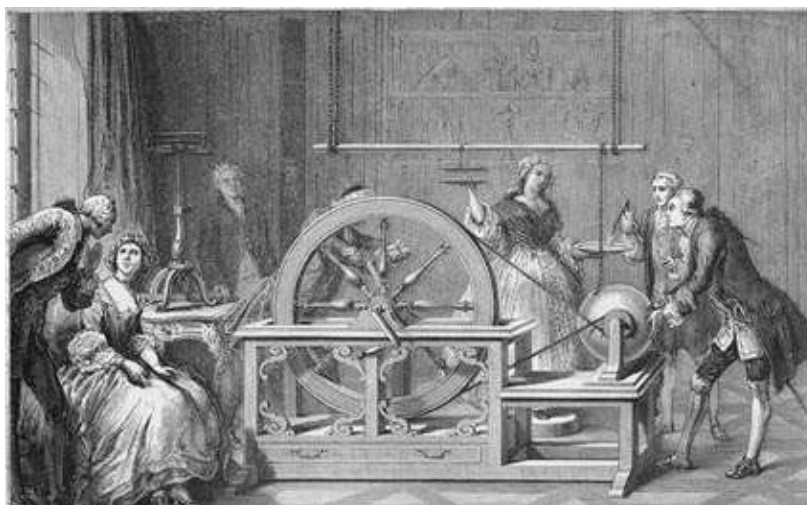
Лекция №6 *Медицинска физика*

Електрическо поле и ток. Постоянен и променлив ток. Биологични ефекти на електрическите токове. Приложения на постоянния ток в медицината (галванизация, лекарствена и диагностична електрофореза, франклинизация, аеройонофореза). Терапевтични приложения на синусовия променлив ток - модулирани интерферентни токове, диатермия и електрохирургия (диатермокоагулация и диатермотомия). Медицински приложения на импулсните токове за диагностика, стимулация, анестезия и терапия.

проф. Константин Балашев, д.х.н.

ЕЛЕКТРИЧНИ ПОЛЕТА И ТОКОВЕ

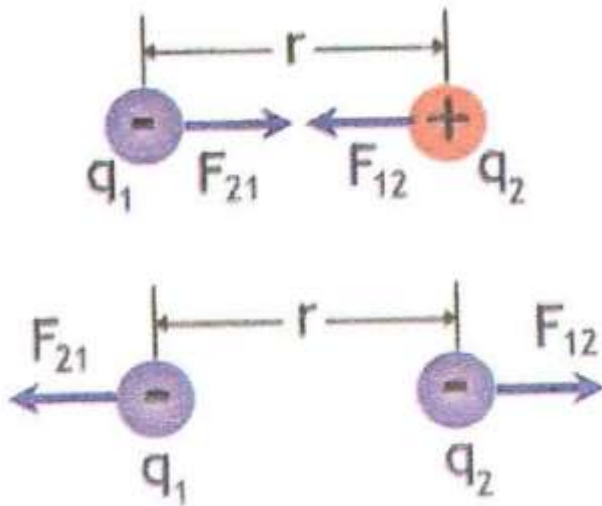
ЕЛЕКТРИЧЕСТВО



„Електричество" е общ термин, обхващащ много явления, които зависят от присъствието и движението на електрични товари. Електрическите явления се изследват още от древността, но до XVIII век няма особен- напредък. Първите практически приложения на електричния ток за промишлена и битова употреба се появява едва в края на XIX век. От тогава насам бързото разширяване на електрическите технологии трансформира индустрията и обществото.

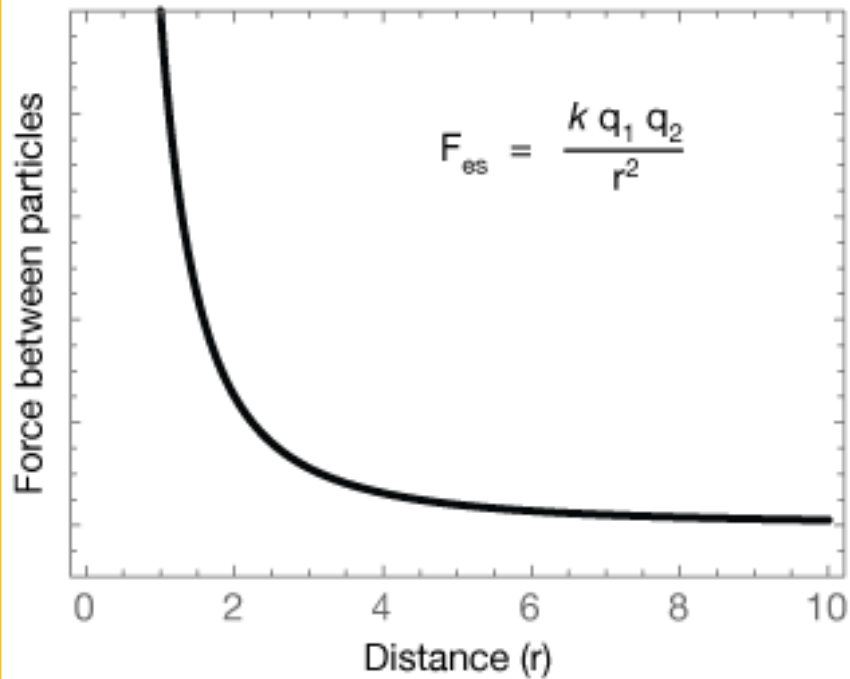
Взаимодействия между електрични товари

Електричеството има корпускулярна природа. Най-малката неделима порция електричество съществуваща в природата, се нарича **елементарен електричен товар**. Стойността на електричните заряди се измерва в единици **Кулон [C]**. Абсолютната стойност на елементарния електричен товар е $1,6 \times 10^{13} \text{ C}$.



В природата съществуват два вида електрични товари, условно наречени **положителни** и **отрицателни**. Така например електроните притежават един елементарен отрицателен електрически товар, а позитроните един елементарен положителен.

Електрическите товари взаимодействат помежду си- едноименните се отблъскват, а разноименните- привличат.



Големината на силата на взаимодействие F между два товара q_1 и q_2 разположени на разстояние r един от друг, се определя от **закона на Кулон**:

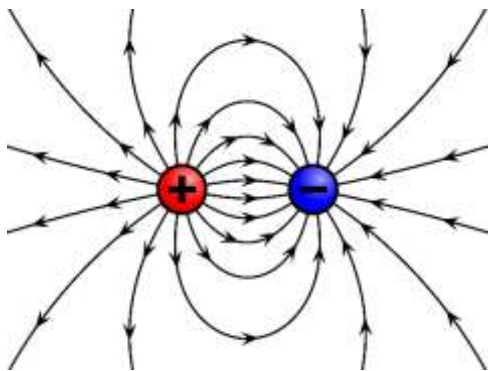
$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon r^2}$$

ϵ е диелектричната проницаемост на средата, в която се намират товарите. Във вакуум $\epsilon = \epsilon_0 = 1$, а за всяка друга среда е по-голяма (*например* за водата $\epsilon = 81$). Това означава, че в материална среда електрическите сили на взаимодействия са ϵ пъти по-малки, отколкото във вакуум. Силата намалява обратно пропорционално на квадрата на разстоянието между товарите r .

Електростатично поле

Взаимодействието между електрическите товари се осъществява благодарение на електрическите сили, които действат в пространството около всеки един от тях. С други думи, тези взаимодействия се осъществяват посредством пространството.

Пространството не е просто пасивна среда за телата. То активно участва в техните действия. Състоянието и свойствата на пространството се определят от разположените в него тела, а от своя страна пространството въздейства върху тези тела. Специфичното състояние и свойства на пространството, обусловени от разположените в него тела се означават най-общо с термина "**поле**".



Всеки електричен товар създава в пространството около себе си **електрично поле**. Това поле съществува независимо от това дали в него има разположен друг товар или не. Ако в него се въведе друг товар, това позволява само да се установи наличието на поле, тъй като във всяка точка от полето действа **електрическа сила**. Когато електричният товар е неподвижен, полето се нарича **електростатично**.

Всяко електрично поле се характеризира качествено и количествено с величините *интензитет* и *потенциал*. **Интензитетът E** в дадена точка от полето е равен на силата F , с която то действа върху намиращ се в **единичен положителен** товар;

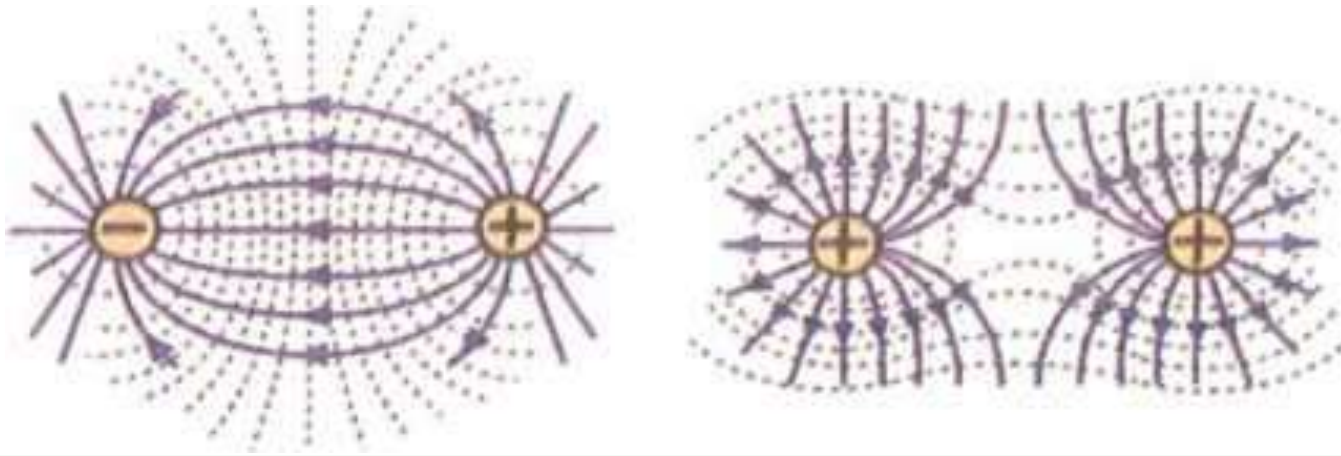
$$E = \frac{F}{q}$$

Интензитетът се измерва в единици **Нютон/Кулон** [N/C].

Потенциалът φ в дадена точка от полето характеризира потенциалната енергия, която притежава единичен положителен товар, разположен в тази точка. Тази енергия е равна на работата, която ще се извърши при придвижването на единичен положителен товар от безкрайност до тази точка.

$$\varphi = \frac{A}{q} = \frac{Fx}{q} = Ex$$

Потенциалът се измерва в единици **Волт** [V].



Стойностите на интензитета и потенциала в различни точки на полето се илюстрират най-просто с помощта на *силови линии* и *еквипотенциални повърхности*. Еквипотенциална повърхнина се нарича множеството от точки в пространството, в които потенциала на електричното поле има една и съща стойност. **Силовите** линии са линии, във всяка точка на които векторът на интензитета на електричното поле лежи върху **допирателната** им.

Посоката на интензитета на електричното поле се изобразява със стрелки, а за големината на му се съди по гъстотата на силовите линии. Силовите линии се сгъстяват около точките с по-голям интензитет и се разреждат около точки с по-малък интензитет.

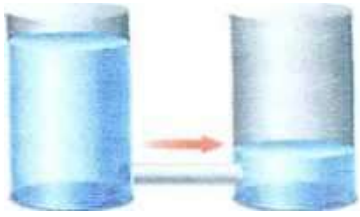
Електрическо напрежение, ток, съпротивление, проводимост

Отношението на потенциалната разлика $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ между две точки от пространството с координати x_1 и x_2 и разстоянието $\Delta x = x_1 - x_2$ между тези точки, представлява **потенциален градиент**: $\text{grad}\varphi = \frac{\Delta\varphi}{\Delta x}$. Той е мярка за разликата в потенциалните енергии между тези точки и движи електрични товари. Потенциалният градиент е движеща сила за протичане на електричен ток. Насоченото движение на електрични товари се нарича **електричен ток**. Големината на тока I е равна на количеството електричество Q , протекло за единица време t или

$$I = \frac{Q}{t}$$

Силата на тока се измерва в **Амperi [A]**.

Електрическият ток е поток от заредени частици (електрони, йони) от област **с по-висок** към област **с по-нисък потенциал**. Токът намалява потенциалните разлики.



разлики в налягането
предизвикват
флуиден поток



разлики в електричния
потенциал предизвикват
електричен ток

Има аналогия между електричния ток и флуидния поток.

Градиентът на хидростатичното налягане и електрическият потенциален градиент действат аналогично:

Електричните товари текат от място с по-високо "електрическо налягане" към място с по-ниско.

Потенциалната разлика между две точки от електрическо поле се нарича **електрическо напрежение**. Отбелязва се с U : $U = \varphi_1 - \varphi_2$ и се измерва в единици **Волт [V]**.

Напрежението също отразява разликите в електричната потенциална енергия в различни точки. То обуславя възможност на полето да извърши **работа A** , като придвижи електричен товар A :

$$A = qU$$

Работата се измерва в единици **електрон – Волт [eV]**.

Когато токът протича не във вакуум, а във вещество, неговата големина зависи не само от напрежението, но и от **съпротивлението** R , което частиците на това вещество оказват върху движението на електричните товари. Колкото по-малко е съпротивлението, толкова по-голяма е **проводимостта** G на веществото: $G = \frac{1}{R}$ - Съпротивлението се измерва в единици Ом $[Q]$, а проводимостта в Сименс $[Q^{-1}]$.

Силата на електрическия ток е пропорционална на напрежението. **Плътноста на тока** $i = \frac{I}{S}$ (силата на тока, който протича през единица площ) в много случаи е по-важна, защото обуславя в най-голяма степен биологичния му ефект.

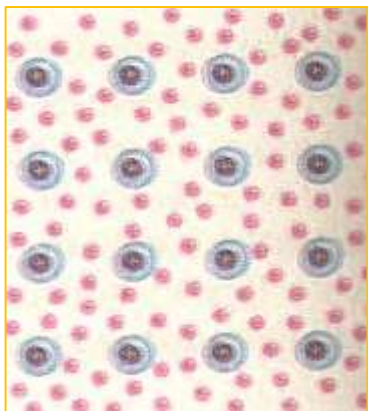
В зависимост от електрическата си проводимост веществата могат да бъдат отнесени към 3 основна групи: **проводници**, **полупроводници** и **изолатори** (**диелектрици**). Добри проводници на електрическия ток са главно **металите** (**проводници от I род**) и **електролитите** (**проводници от II род**). Газовете при нормални условия са диелектрици- не провеждат електричен ток. Проводимостта на полупроводниците има по-сложен характер, при определени условия имат характеристики на метали, а при други на изолатори.

За да тече електричен ток е необходимо да бъдат изпълнени две условия: *да има свободни електрични товари* и *да съществува сила, създаваща и поддържаща тяхното насочено движение.*

В зависимост от начина, по който протича, електрическият ток бива постоянен и променлив. Постоянният ток *има постоянна посока и големина*, и протича непрекъснато с течение на времето. Променлив ток е този, който също протича непрекъснато с течение на времето, *но има променлива големина и/или посока*. Импулсен ток също е променлив ток, който може да има променлива големина и/или посока, *но протича с прекъсване* във времето. Променливите токове могат да имат неперодичен и периодичен характер. От основните **видове** променлив периодичен ток в медицината по-широко приложение намират импулсните и синусови токове.

ПОСТОЯНЕН ТОК

Постоянен ток през метали



Металите имат кристален строеж. Атомите в тях са разположени в кристална решетка от метален тип. При изграждането ѝ най-слабо свързаните валентни електрони от атомите на метала се откъсват и стават свободни отрицателни заряди. Във възлите на кристалната решетка се разполагат положителните метални йони, а около тях - свободните електрони, които свързват тези йони в обща структура. Ето защо проводимостта на металите е електронна.

Свободните обобществени електрони (наричани още "електронен газ") се движат хаотично с твърде високи скорости, като често се сблъскват с йоните на кристалната решетка, изменяйки по този начин посоката на своето движение. Поради това, в отсъствие на електрическо поле, движението им хаотичен, характер. Ако обаче металът се намира в електрическо поле, т.е. съществува потенциална разлика, към това хаотично движение се наслагва още и насочено движение, в посока, определена от интензитета на полето.

Закони на Ом

Посоката и големината на постоянния ток не се променят във времето. Големината му е пропорционална на обуславящото го напрежение и зависи от съпротивлението на веществото, през което преминава.



Още през 1826 г. немският физик Георг Ом е установил, че силата на тока I , протичащ през даден участък от проводник, зависи не само от напрежението U , приложено към този участък, но и от съпротивлението му (**Закон на Ом за участък от електрическа верига**):

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

Законът на Ом е частен случай на закона на Онзагер (тъй като проводимостта $G = \frac{1}{R}$, то $I = GU$).

При протичането на ток през металите, движението на електроните се затруднява от положителните йони във възлите на кристалната решетка. Това обуславя съпротивлението R , което проводникът оказва на протичащия ток.

Ом е установил също, че съпротивлението R , което има хомогенен цилиндричен проводник с дължина L и площ на напречното сечение S , е:

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

където ρ е специфично съпротивление, което не зависи от геометричните размери на проводника, а само от вида на веществото му. Вместо ρ може да се използва специфичната проводимост $\sigma = 1/\rho$. Чрез нея този закон на Ом се представя по следния начин:

$$G = \frac{\sigma L}{S}.$$

Специфичната проводимост на различните вещества се определя от:

- вида на веществото- атомно-молекулния му строеж и вида кристална решетка- йонна, ковалентна, молекулна или метална;
- наличието и концентрацията на други вещества- примеси, които обуславят структурни нехомогенности и дефекти на кристалната решетка, затрудняващи протичането на тока;
- температурата- увеличава се амплитудата на трептене на йоните около равновесното им положение във възлите на кристалната решетка, което затруднява протичането на тока.

При протичането на ток през металите електроните се удрят интензивно в положителните йони на металната решетка. Това отнема част от тяхната енергия и я превръща в топлинна. Количеството на тази **топлина Q** се определя по **закона на Джаул-Ленц** от големините на приложеното напрежение U и протичащия ток I , както и от времето t , за което той протича:

$$Q = UIt$$

Но $U = IR$, следователно $Q = I^2Rt$ т.е. топлината, отделена в проводник, по който тече ток, е равна на произведението от квадрата на тока, съпротивлението на проводника и времето за

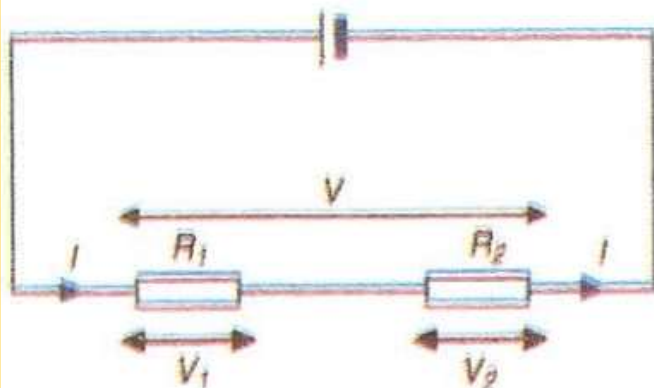
Мощността W (енергията, отдавана за единица време във веществото) при протичане на постоянен електричен ток с големина I , вследствие на приложено напрежение U е: $W = UI$. Измерва се в единици **Ват $[W]$** .

А общата **енергия E** , която от електрическа се превръща в друг вид (топлинна, механична, светлинна, химична) за време t е:

$$E = Wt = UIt = I^2Rt$$

Може да се измерва във $[W \times s]$, $[kW \times h]$, $[J]$, $[cal]$.

Токът тече в електрически вериги, през консуматори с различно съпротивление. В една верига те могат да бъдат свързани *последователно*, *успоредно* или *в комбинации* от двата варианта. Как може да се определят стойностите на напрежението, тока и съпротивлението при последователно и успоредно свързани консуматори?



При последователно свързани консуматори

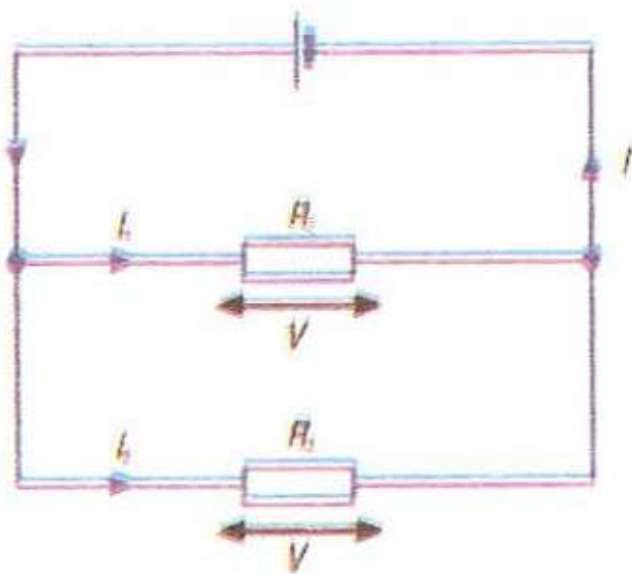
напрежението в краищата им е сума от напреженията върху всеки проводник:

$$U = U_1 + U_2$$

По закона на Ом за част от веригата:

$$U_1 = R_1 I; U_2 = R_2 I; U = RI$$

R е пълното съпротивление на веригата, а I общият ток, който тече през веригата. Следователно, $R_1 I + R_2 I = RI$. От това следва, че общото съпротивление на последователно свързани консуматори е сума от съпротивленията на всеки от тях: $R_1 + R_2 = R$.



При успоредно свързани консуматори през веригата тече общ ток

$$I = I_1 + I_2$$

По закона на Ом $U = R_1 I_1; = R_2 I_2; U = RI$

откъдето получаваме, че

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; I_2 = \frac{U}{R_2}; I = \frac{U}{R} \Rightarrow \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = \frac{U}{R}$$

От **това** следва, че при успоредно съединени проводници реципрочната стойност на общото им съпротивление е сума от реципрочните стойности на съпротивленията на всеки от тях:

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

Проводимост на биологични тъкани и течности

Установено е, че при прилагане на постоянно напрежение, силата на протичащия през живата тъкан ток не остава постоянна. В началото тя непрекъснато намалява и едва след известно време постепенно се установява на постоянно ниво. Това привидно отклонение от закона на Ом е обусловено от *явленията на поляризация*.

Биологичните системи са сложни обекти. Те проявяват свойства както на проводници, така и на диелектрици. Проводимостта им се обуславя от наличието на свободни йони в клетките и тъканите, а диелектричните им свойства - от структурните им особености и явленията на поляризация. Те притежават за разлика от електролитите не само свободни, но и свързани електрически товари.

Под действието на външно поле свободните товари могат свободно да се придвижват на големи разстояния. Свързаните товари обаче имат ограничена свобода за движение - те могат да се придвижват само в твърде ограничени пространствени граници.

При прилагане на електрично поле върху биологична система свързаните електрични товари в нея се отместват на някакво разстояние един от друг, а молекули, които са електрични диполи, се ориентират по посока на полето. Така възниква нарастващо до някаква стойност електрично поле с противоположна посока. То намалява действието на външно приложеното поле и по този начин намалява силата на протичащия през нея ток.

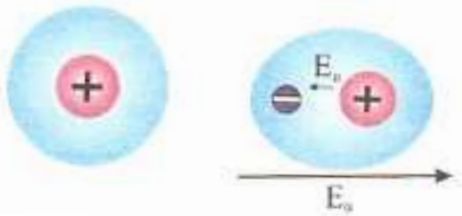
Това допълнително електрическо напрежение $U_p(t)$, наречено още **поляризационно напрежение**, е функция на времето. В този случай реално законът на Ом придобива вида:

$$I(t) = \frac{U - U_p(t)}{R}$$

(а не $I = \frac{U}{R} = \text{const}$)

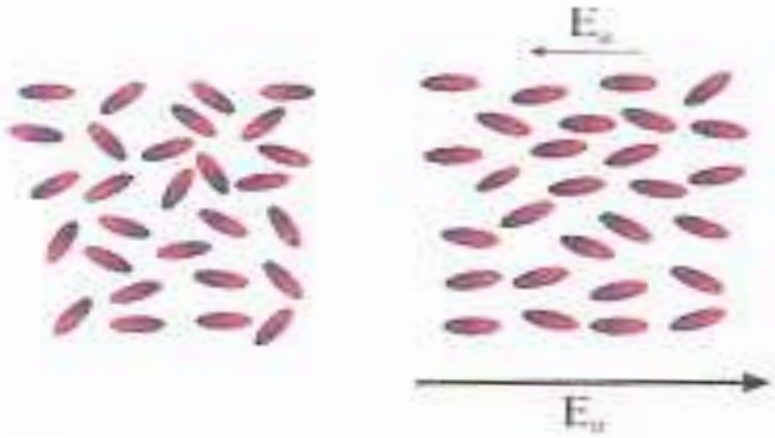
Как може да се обясни възникването на поляризационното напрежение?

Процесът на преместване на свързани товари под действието на външно електрическо поле E_o в резултат на което се образува ново електрическо поле E_p насочено против външното, се нарича *поляризация*. Поляризацията може да се осъществява по няколко различни механизма и в зависимост от това бива:

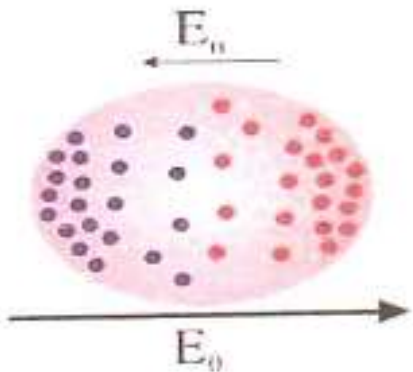


Електронна (дължи се на отместване на електронните орбитали спрямо положително заредените ядра в атомите и йоните).

Йонна (отместване на йони спрямо кристалната решетка);



Диполни (ориентирани на диполни полярни молекули в съответствие с външното поле).



Макроструктурна (придвижване на свободни йони, съдържащи се в проводящите зони, в пределите на тези зони до достигане на слоеве с ниска проводимост, в резултат на което се образуват макроструктури с диполни свойства).

Във всички изброени случаи преместването на свързани електрически заряди води до пространствено разделяне на разноименни електрически товари и до образуване на електрическо поле, действащо в обратна посока на приложеното отвън.

БИОЛОГИЧНИ ЕФЕКТИ НА ЕЛЕКТРИЧЕСКИЯ ТОК

Биологични ефекти на постоянния ток

Човешкият организъм в значителна степен се състои от биологични течности, а те са електролити, съдържащи голямо количество йони, които участват в обменните процеси. Под влиянието на външно постоянно електрическо поле тези йони се задвижват със съответна скорост в съответна посока, т.е. протича постоянен ток. Преминаването му се съпътства от редица процеси - електрофореза, електролиза, електроосмоза, образуване на топлина, поляризация.

Биологичните ефекти на електричния ток в най-голяма степен зависят от *плътността на тока*. Тя е големината на тока, протичащ през единица площ, напречна на посоката му ($i = \frac{I}{S}$).

Постоянният ток преминава през структури с най-ниско съпротивление- нервни влакна, кръвоносни -- лимфни съдове, междуклетъчни пространства. Най-висока проводимост имат ликвора и кръвната плазма. На телесните мазнини тя е около 10 пъти по-ниска, на сухата кожа -100 000, а на костите -10 000 000 пъти.

Първичното биологично действие на постоянния ток е свързано с движение на йони, с тяхното разделяне и промяна на концентрацията им в различни участъци на клетките и тъканите. Тези ефекти се използват за терапевтични цели, тъй като повлияват обменните процеси в биологичните тъкани. Могат да се придвижват и недисоциирани молекули, притежаващи частични електрични товари (електрофореза).

Ефектите от преминаване на електричество през тялото зависят от плътността на тока, но и от фактор-- като влажност на кожата, площ и разположение на областта на контакт, продължителност на контакта. Общият диапазон от ефекти включва меко изтръпване, спазъм на мускулите, парализа на дихателните органи, увреждания на централната нервна система, загуба на съзнание, изгаряния и дори смърт (при напрежения 500 - 1 000 волта и ток 1-2 ампера). Непосредствената причина за смъртта най-често е спиране на сърцето.

СИНУСОВ ПРОМЕНЛИВ ТОК

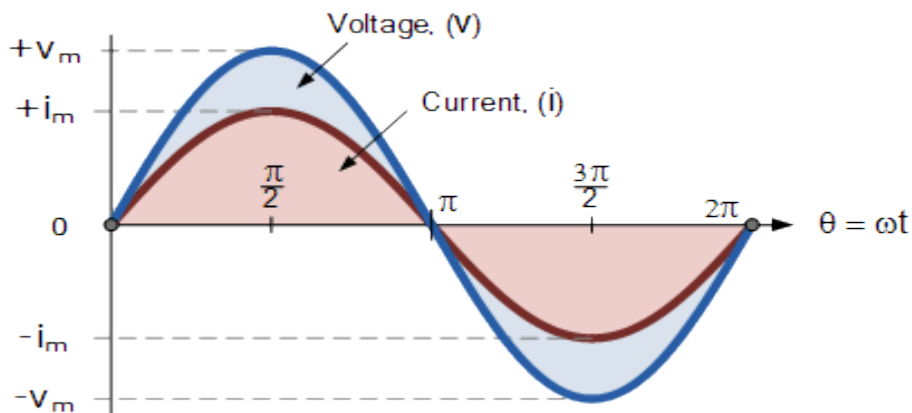
Променливият ток е електрически ток, който променя своята големина и/или посока. Той може да има постоянна посока, но променяща се големина, постоянна големина, но променяща се посока, а също така - променящи се и големина, и посока.

Има различни видове променлив ток, но два са основните вида променлив ток - *синусов и импулсен*.

Най-широко разпространение поради начина на получаването му е намерил *т.нар. синусов променлив ток*, т.е. променлив ток, чиято амплитуда се изменя във времето по синусов закон:

$$I(t) = I_0 \sin(2\pi \nu t + \alpha),$$

където $I(t)$ е моментната стойност на тока, I_0 - максималната му амплитудна стойност, ν - честотата, а α - начална фаза.



Този ток е обусловен от приложено променливо напрежение, изменящо се по аналогичен закон:

$$U(t) = U_0 \sin(\omega t + \beta)$$

$U(t)$ е моментната стойност на напрежението, U_0 - максималната му амплитуда, $\omega = 2\pi\nu$ - ъгловата скорост, β - началната фаза

Нито моментните, нито максималните амплитудни стойности на променливия ток и напрежение дават представа за реалните енергийни ефекти от неговото протичане. Затова се използват т.нар. **ефективни стойности**:

$$U_{eff} = 0,7U_0 ; I_{eff} = 0,7I_0$$

Променлив ток с ефективна стойност I_{eff} има енергийния ефект на постоянен ток със същата големина.

Максималната мощност W_{max} и енергията E на променливия ток се определят по същите формули, като за постоянния ток, но с ефективните стойности на тока и напрежението:

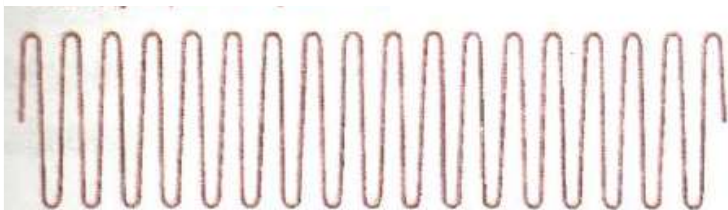
$$W_{max} = I_{eff}U_{eff} = 0,49 U_0I_0, \quad E = Wt$$

Например, отделената при протичане на постоянен ток през един нагревател топлина съгласно закона на Джаул-Ленц е $Q = UIt$. За да се получи при протичане на променлив ток същото количество топлина, трябва приложеното към него променливо напрежение да е с ефективна стойност U_{eff} (т.е. с амплитуда $U_0 = \frac{U}{0.7} = 1,41 U$) и да преминава през него променлив ток с ефективна стойност I_{eff} (т.е. с амплитуда $I_0 = \frac{I}{0.7} = 1,41 I$).

С други думи законът на Джаул-Ленц при променлив ток ще има вида:

$$Q = I_{eff}U_{eff}t$$

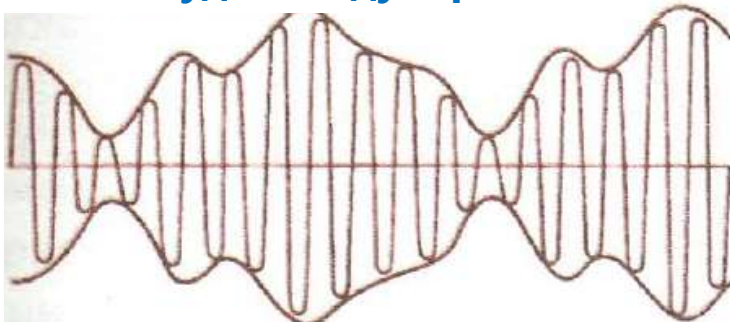
Немодулиран синусов ток



Форма на модулация



Амплитудно модулиран ток



Амплитудна и честотна модулация. Амплитудата и честотата на променливите токове могат да бъдат постоянни, но и модулирани, т.е. да се изменят по някакъв закон. Във връзка с това се различават амплитудно и честотно модулирани токове.



Честотно модулиран ток