

Д-р ВЕСНА ЧЕШЕЛКОСКА, дипл. ел.инж.  
Д-р МИРКА ПОПНИКОЛОВА-РАДЕВСКА, дипл. ел.инж.

# ЕЛЕКТРОТЕХНИКА И ЕЛЕКТРОНИКА

IV ГОДИНА  
ГРАФИЧКА СТРУКА  
ГРАФИЧКИ ТЕХНИЧАР

**АВТОРИ:**

Д-р ВЕСНА ЧЕШЕЛКОСКА, дипл. ел.инж.

Д-р МИРКА ПОПНИКОЛОВА-РАДЕВСКА, дипл. ел.инж.

**РЕЦЕНЗЕНТИ:**

Д-р ЦВЕТА МАРТИНОВСКА, претседател

ЗОРАН НЕШЕВСКИ, член

ДЕЈАН АНТОНОВСКИ, член

**ЛЕКТОР:**

Проф. Д-р. ТРАЈКО ОГНЕНОВСКИ

**Компјутерска обработка:**

Д-р Весна Чешелкоска

Д-р Мирка Попниколова-Радевска

М-р Благоја Арапиноски

**Издавач:** Министерство за образование и наука за Република Македонија

**Печати:** Графички центар доел, Скопје

Со Одлука за одобрување на учебник по предметот Електротехника и електроника за четврта година, Струка; графичка; профил; графички техничар бр.22-1263/1 од 13.07.2011 донесена од Национална комисија за учебници.

CIP - Каталогизација во публикација

Национална и универзитетска библиотека "Св.Климент Охридски" , Скопје

АВТОР: Чешелкоска, Весна - автор

ОДГОВОРНОСТ: Попниколова-Радевска, Мирка - автор

НАСЛОВ: Електротехника и електроника : IV година графичка струка : графички техничар

ИМПРЕСУМ: Скопје : Министерство за образование и наука на Република Македонија, 2011

ФИЗИЧКИ ОПИС: 156 стр. : граф. прикази ; 24 см

ISBN: 978-608-226-293-2

УДК: 537(075.3), 621.38(075.3)

ВИД ГРАЃА: монографска публикација, текстуална граѓа, печатена

ИЗДАВАЊЕТО СЕ ПРЕДВИДУВА: 07.11.2011

COBISS.MK-ID: 89106954

## ПРЕДГОВОР

Во овој учебник се обработени делови од електротехниката и електрониката за кои учениците имаат незнатни предзнаење добиени во основното образование, во рамките на наставниот предмет физика. Напишан е според наставната програма по предметот Електротехника и електроника за четврта година на графичката струка, за образовниот профил графички техничар.

Имајќи предвид дека ова е предмет со кој учениците од овој образовен профил треба да стекнат одредени знаења од областа на електротехниката и електрониката, кои не се базични за нивниот профил, сметавме дека треба да посветиме посебно внимание при подготовката на овој учебник.

Учебникот е направен да го обединува традиционалниот со современиот пристап. Од една страна се надеваме дека заради неговата техничка подготовка ќе предизвика интерес кај учениците со својот изглед, а од друга страна ќе го задржи нивното внимание со содржините.

Учебникот е поделен на тематски целини, кои понатаму се делат на помали теми.

Главни тематски целини се: Општи поими од електротехниката, Електростатика, Еднонасочни струи, Наизменични струи, Структура и електрични особини на материјата, Полупроводнички диоди, Транзистори и тиристоры и Фотоелектрични елементи. Скоро во секоја тема има воведен дел каде во куси црти се објаснува проблематиката која следи понатаму во текстот. Дефинициите и поимите кои се поважни за совладување на материјалот, потенцирани се во текстот со друга боја. Ова е направено со цел текстот да биде попрегледен и да овозможува брзо снаоѓање во него.

Имајќи предвид фактот дека стекнувањето на нови знаења не значи само да се разберат и запомнат одредени појави и закони, туку треба да се знаат и да се применуваат, после секоја помала тема, а некаде и по поголема тема, дадени се прашања за повторување и утврдување на материјалот, како и одреден број на едноставни задачи. За секоја задача се дадени точни решенија, што на учениците се надеваме ќе им даде повратна информација за разбирањето на материјалот. Презентирани се и комплетно решени примери меѓу задачите.

При опишување на појавите водено е сметка за возраста на учениците за кои е наменет учебникот, како и за нивните предзнаења од областа на физиката. При изложувањето на материјата користен е соодветен математички апарат за квантитативна анализа на појавите кој одговара на нивото на предзнаењата на учениците по предметот математика.



## 1. ОПШТИ ПОИМИ ВО ЕЛЕКТРОТЕХНИКАТА

### 1.1. ИСТОРИСКИ ПОЧЕТОЦИ

Првите сознанија за електричните појави датираат уште од античко време. Во 600 година п.н.е., грчкиот филозоф Талес од Милет забележал дека ако килибарот се протрие со волнена ткаенина и килибарот и ткаенината добиваат особина да привлекуваат лесни предмети, како на пример влакненца, дрвени струготини и др.

Дваесет века подоцна, англискиот лекар и физичар Вилијам Џилберт утврдил дека со протривање, стекнуваат особина да привлекуваат ситни и лесни предмети и други тела, како ебонит, стакло, кожа и др. Ваквите тела се наречени **електризирани**, според грчкиот збор "ηλεκτρον" (електрон), што значи килибар.

Со проучување на заемното дејство на електризираните тела, се констатирало дека некои од нив меѓусебе се привлекуваат, а некои се одбиваат. Заклучок бил дека по пат на триење телата се електризираат со два вида на електрицитет. Поимите **позитивен** и **негативен** електрицитет ги вовел американскиот печатар, научник и филозоф Бенџамин Франклин.

Сè до појавата на електронската теорија, електричните појави биле објаснувани со претпоставката за постоење на **електрични флуиди**. Флуидите биле сметани како посебни супстанции (различни од обичната материја), што континуирано го исполнуваат просторот. Постоеле две теории за флуидите. Според едната се сметало дека постојат два вида флуиди и во зависност од тоа кој флуид преовладува, телото е позитивно, или негативно електризирано. Според другата теорија, постои само еден флуид кој насекаде е рамномерно распореден. Ако, кај електризираните тела постои повеќе или помалку флуид од колку што е нормално, тие се електризирани позитивно или негативно.

Според современата физика, електризирањето на телата и појавата на нивно привлекување или одбивање се објаснува со помош на заемното дејствување на двете постојани атомски честички: електроните и протоните.

Натамошниот развој на науката за електричните појави бил многу брз. Кон крајот на 18 век, експериментално е откриен законот за силата меѓу две електризирани тела, а во првата половина на 19 век биле откриени сите позначајни закони кои претставуваат основа на современата електротехника.

Магнетните појави во најелементарна форма, како и електричните, биле познати уште во Стара Грција, кога е забележано дека парчиња од железната руда **магнетит** привлекуваат поситни железни делови. Оваа појава е наречена магнетизам, според градот Магнезиј во Мала Азија во чија близина имало наоѓалишта од споменатата руда. Парчињата од магнетната руда се **природни магнети**. Подоцна забележано е дека железните предмети кога ќе се донесат во близина на природните магнети стануваат **магнетизирани** и наречени се **вештачки магнети**. Кај природните и вештачките магнети

постојат две зони во близина на кои магнетните својства се најизразени и тоа се **магнетните полови**. Разноимените полови се привлекуваат, а истоимените се одбиваат.

Долго се сметало дека не постои поврзаност меѓу електричните и магнетните појави.

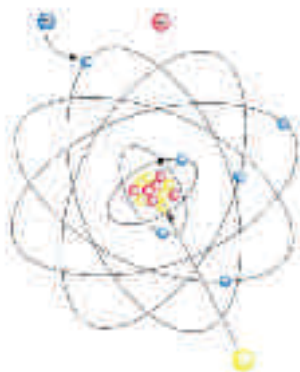
Низа сјајни откритија во првата половина на 19 век се значајни за утврдувањето на нераскинливата поврзаност на електричните и магнетните појави. Меѓу нив е откритието на данскиот физичар Ерстед (1820 година) за дејството на механичка сила врз магнетната игла која се наоѓа во близина на проводник низ кој тече струја и откритието на францускиот физичар Ампер (1820 година) за постоење на електромагнетна сила меѓу два проводници низ кои тече електрична струја.

Во 1864 година, англискиот физичар Максвел ја поставил теоријата за електричното и магнетното поле како посебна форма на едно единствено електромагнетно поле. Неговите заклучоци се темелат на резултатите од експериментите кои ги правел Фарадеј 1831 година и законот за електромагнетната индукција. Максвел, 1864 година, по теоретски пат го предвидел постоењето на електромагнетните бранови, што експериментално е потврдено од Херц, 1888 година.

## 1.2. СТРУКТУРА НА МАТЕРИЈАТА

Според поставките на молекуларната физика, материјата е составена од **молекули**, како најситни делови на соединенијата, а молекулите се состојат од **атоми**, кои се најситни делови на хемиските елементи. Зборот **атом** потекнува од грчкиот збор "atomos" што значи неделив. Но, атомот не е неделива честичка, туку има сложена структура. Основните честички од кои се составени атомите се: **протоните**, **неутроните** и **електроните**. Откриени се и други елементарни честички, кои постојат само привремено и не влегуваат во составот на материјата.

Според Боровиот модел кој 1913 година го предложил Нилс Бор, атомите се состојат од **атомско јадро** сместено во центарот на атомот и **електронска обвивка** (сл.1.2.1). Протоните и неутроните го сочинуваат атомското јадро. **Електронската обвивка** ја сочинуваат електроните кои со голема брзина кружат околу јадрото по кружни и елиптични патеки по повеќе слоеви. Електроните се вртат и околу својата оска и ваквата ротација е наречена **спин**.



Сл.1.2.1. Структура на атомот.

Во нормални услови, бројот на електроните во електронската обвивка е еднаков на бројот на протоните во јадрото и еднаков на редниот број на елементот  $Z$ . Масата на електронот изнесува  $9,11 \cdot 10^{-31}$  kg, а масата на протонот и масата на неутронот се приближно еднакви и изнесуваат  $1,67 \cdot 10^{-27}$  kg. Масата на јадрото на атомот се добива ако се соберат масите на сите неутрони и протони во него. **Вкупната маса** на атомот се наоѓа во неговото јадро.

Радиусот на електронот изнесува  $3 \cdot 10^{-15}$  m, а радиусот на јадрото изнесува  $5 \cdot 10^{-15}$  m, што значи дека се приближно исти. Радиусот на атомот е околу 20000 пати поголем од радиусот на јадрото. Според тоа ако јадрото се замисли како топка со радиус од 0,5 m, последниот електрон би кружел на растојание од 10 km од центарот на јадрото.

Според податоците за димензиите и масата на атомот, може да се согледа дека атомот во најголемиот негов дел нема елементарни честички и се вика **вакуум**.

Наједноставна структура има атомот на водород H. Тој се состои од еден протон во јадрото и еден електрон кој кружи околу јадрото. Најсложена градба има атомот на ураниумот чие јадро се состои од 92 протони и 146 неутрони. По вештачки пат создадени се неколку елементи со посложени атоми тнр. **трансурани елементи**.

### 1.3. ЕЛЕКТРИЧНИ СВОЈСТВА НА МАТЕРИЈАТА

**Елементарен електричен полнеж** е најмалата количина електрицитет, која натаму не може да се дели и се означува со буквата  $e$ .

Единицата за количина на електрицитет, во меѓународниот систем на единици SI, се вика **кулон (C)**.

Елементарниот електричен полнеж е многу мал во однос на единицата кулон и изнесува:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} . \quad (1.3.1)$$

Еден кулон содржи околу  $6,25 \cdot 10^{18}$  елементарни полнежи.

Електронот е носител на **негативен елементарен електричен полнеж**:

$$Q_e = -e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} , \quad (1.3.2)$$

а протонот е носител на **позитивен елементарен електричен полнеж**:

$$Q_p = e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} . \quad (1.3.3)$$

Неутроните се електрично неутрални.

Врз основа на структурата на атомот и електричните особини на елементарните честички, произлегува дека атомот, во нормални услови, содржи исто количество на позитивен и негативен електричен полнеж и според тоа е електрично неутрален.

Ако на било кој начин од атомот се одведе еден или повеќе електрони, остатокот на атомот ќе се однесува како позитивна честичка која се нарекува **позитивен јон**. Ако пак на атомот му се доведе еден или повеќе електрони, ќе преовладее негативниот електрицитет и тој ќе се однесува како негативна честичка- **негативен јон (сл.1.3.1)**.

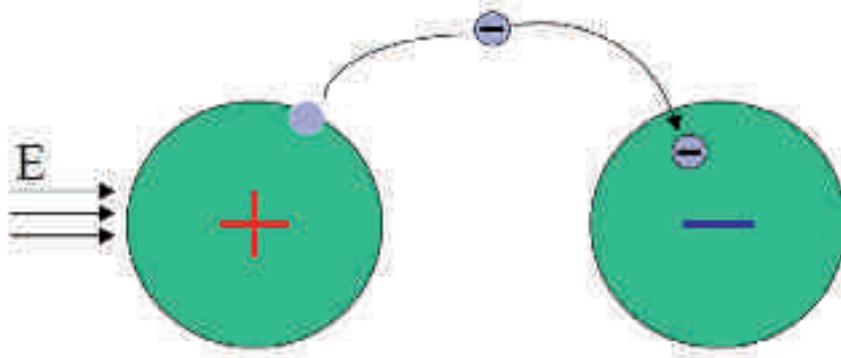
Од структурата на материјата дознаваме дека електроните во атомот кружат околу јадрото. На нив дејствува центрифугална сила, под чие дејство електроните би одлетале и би го напуштиле јадрото. На оваа сила ѝ се спротивставува привлечната сила кон јадрото, која всушност е **електрична сила**, со која заемно се привлекуваат негативните електрони и

позитивните протони од јадрото. Електричните сили постојат уште во самиот атом и имаат голема улога во градбата на материјата. Појавите, сврзани со електричните сили, поопширно ќе бидат проучени подоцна.

Бројот на атомите во единица волумен кај телата е многу голем и кај цврстите и течните тела изнесува  $10^{23}$  атоми во  $\text{cm}^3$ . Дознавме дека во нормални услови, телото е електрично неутрално, затоа што негативниот и позитивниот електрицитет меѓу себе се еднакви и се поништуваат. Ако од било кои причини кај телото преовладува бројот на протони, тоа ќе биде **позитивно**, а ако преовладуваат електроните ќе биде **негативно**. Количината на електрицитет со која е електризирано телото  $Q$ , зависи од разликата на бројот на протони и електрони на телото  $N$  и изнесува:

$$Q = \pm Ne, \quad (1.3.4)$$

каде  $e$  е елементарен електричен полнеж.



Сл.1. 3.1. Позитивни и негативни јони.

Еден од основните принципи поврзан со електризираните тела е **принципот за зачувување на електрицитетот**. Според овој принцип, во еден изолиран или затворен систем (во општ случај и во целата природа), збирот на позитивните и негативните електрични полнежи е еднаков на нула.

На пр. стаклото и кожата со која со протрива, може да се третираат како еден затворен систем. Ако пред да се протријат, тие биле електрички неутрални, после триењето ќе бидат електризирани со исти количини електрицитет, но со спротивни знаци што значи дека вкупниот електрицитет и пред и по триењето останал ист и еднаков на нула. Според овој принцип електрицитетот не може ниту да се создаде, ниту да исчезне, туку може да дојде само до негова прераспределба меѓу телата или на самото тело.

#### 1.4. ПРОВОДНИЦИ И ИЗОЛАТОРИ

Материјалите во електротехниката, според нивните електрични својства се делат на две основни групи: **проводници и изолатори**.

**Проводници** се материјали кои содржат голем број слободни електрични полнежи: електрони или позитивни и негативни јони.



Најважни проводници се металите (алуминиум, бакар, сребро..) и кај нив електроните од последната лушпа се многу слабо врзани за својот атом, така да постои постојано движење на овие електрони од еден до друг атом. Овие електрони се нарекуваат **валентни електрони**. Тие можат слободно да се движат во внатрешноста на телото, но во нормални услови немаат доволно енергија да ја преминат површината и да го напуштат телото.

Течните проводници се нарекуваат **електролити** и кај нив слободни електрични полнежи се јоните на кои се разложуваат молекулите на солите, киселините или базите.

**Изолаторите** се материјали кои не содржат слободни електрични полнежи. Кај нив електроните се "врзани" за сопствените атоми и тие можат да се поместат под дејство на сила во границите на атомот (молекулата). Во групата на изолатори припаѓаат: воздух, хартија, парафин, дрво, стакло, гума, дестилирана вода и др.

Во природата не постои материјал кој е идеален изолатор. Кај реалните изолатори, секогаш има одреден број слободни електрични полнежи, но нивниот број е толку мал што може да се занемари. **Идеален изолатор е вакуумот.**

**Полупроводниците** ја сочинуваат третата група на материјали и кај нив бројот на слободни полнежи е многу помал отколку кај проводниците, но е поголем од кај изолаторите.

### Прашања

1. Каква е структурата на јадрото според Боровиот модел?
2. Каде е сместена вкупната маса на атомот?
3. Што е елементарен електричен полнеж?
4. Колку изнесува електричниот полнеж на електронот, а колку на протонот?
5. Како се добива позитивен, а како негативен јон?
6. Што е разликата меѓу проводниците и изолаторите?
7. Кој е идеален изолатор?

### 1.5. СИСТЕМ НА МЕРНИ ЕДИНИЦИ

**Физичката величина** се дефинира како особина на некоја појава, тело или супстанца која може да се разликува квалитативно (според нејзината природа) и да се одреди квантитативно (нејзината големина, количество).

Физичките величини можат да се мерат. **Мерењето е множество на експериментални постапки кои имаат за цел одредување на вредноста на една физичка големина.** Вредноста на мерената величина добиена со мерење се нарекува **резултат на мерењето.**

Секоја физичка величина се изразува со бројната вредност и ознаката за соодветната мерна единица. Мерната единица е усвоена со договор и се користи за квантитативно одредување на некоја физичка величина со иста димензија. Ознаката на мерната единица е договорен симбол кој ја означува мерната единица (пример: 3V, 2A).

Меѓународниот систем на мерни единици SI е составен од основни, дополнителни и изведени единици.

Основните единици се дефинирани според најсовремените достигнувања во науката. Постојат, според овој систем, седум основни единици: за должина метар (m), за време секунда (s), за маса килограм (kg), за јачина на електрична струја ампер (A), за температура келвин (K), за јачина на светлината кандела (cd) и за количество материја мол (mol).

Дополнителни единици се: за агол во рамнина, радијан (rad) и за просторен агол,стерадијан (sr).

Изведените единици се добиваат од основните со користење соодветни математички операции. Голем дел од изведените единици имаат посебно име и ознака и со нивна примена се изразуваат други изведени единици, што е многу поедноставно отколку кога би се користеле основните единици. Еден пример за изведена единица е единицата за сила. Таа има посебно име њутн и ознака N. Оваа единица се добива според вториот Њутнов закон и е изразена преку основните единици за маса, должина и време, па  $1N=1kgm/s^2$ .

Во SI системот, една од седумте основни единици е јачината на електричната струја. Таа е одредена со дефиницијата: ампер е јачина на постојана електрична струја, која при протекување низ два прави бескрајно долги паралелни проводници, со занемарлив пресек, поставени во вакуум на растојание од еден метар, меѓу двата проводници создава сила од  $2 \cdot 10^{-7}$  N на секој метар должина.

Единиците за другите физички величини што се користат во електротехниката се изведени. На пр. јачина на електрично поле (V/m), количина на електрицитет (C) и др. Тие ќе бидат дадени при дефинирање на поедините електрични и магнетни величини.

За да се мери некоја големина, треба таа да се спореди со усвоената мерна единица за таа големина. Мерењата ќе бидат поточни ако мерната единица е утврдена со поголема точност. Единиците мора да бидат што е можно попрецизно дефинирани и да не се менуваат во текот на времето. Врз основа на дефинициите во SI системот, мерните единици се материјализираат и тие се наречени еталони.

## 1.5. ГРЕШКИ ПРИ МЕРЕЊЕТО

Мерењето на физичките величини се прави со мерни инструменти. Тие се направи конструирани за да овозможуваат едноставно добивање на резултат од мерењето. За мерење на електричните големини се користат електрични мерни инструменти. Со инструментите се врши директно мерење на соодветната физичка величина.

Во зависност од големината што се мери, постојат инструменти за мерење на јачина на струјата - амперметри, за мерење на напон - волтметри, за моќност - ватметри, за отпор - омметри и др. Постојат и инструменти кои едновременно можат да мерат повеќе различни величини наречени универзални инструменти.

Се користат аналогни и дигитални инструменти за мерење. Инструментите чиј резултат од мерењето се добива со отчитување на отклонот на стрелката се познати како аналогни. Овие инструменти имаат подвижен дел на кој е прицврстена материјална стрелка. Работата на овие инструменти се базира на различните дејства на струјата: електромагнетно, електродинамичко, индукционо, термичко и др. На пр. електромагнетното дејство на струјата и постојаниот магнет овозможуваат отклон на подвижниот

дел на инструментот (и стрелката заедно со него) низ кој тече струја и поставен е во магнетно поле.

**Дигиталните мерни инструменти** се електронски мерни уреди и резултатот на измерената величина се добива на екран (дисплеј) директно во бројка. Дигиталните инструменти немаат подвижни делови, не постои триење, ниту инертност на мерниот механизам, а при отчитувањето на резултатот неможе да се направи грешка од оној кој го користи инструментот. Мерниот податок од овие инструменти може да се донесе во компјутер и дополнително да се користи и обработува, а може со тие податоци преку компјутерот и да се управува со некој процес.

При мерењето на некоја физичка величина не е можно да се добие нејзината точна вредност. Тоа е поради несовршеноста на мерните инструменти и поради грешките што ги прави лицето кое ги врши мерењата. За да се добие што е можно поточна вредност при мерењето треба да се користат соодветни мерни постапки, најсоодветен инструмент, а лицето кое ги врши мерењата да има соодветни познавања од мерна техника.

Причините што се наведени погоре доведуваат до тоа резултатот при мерењето да се разликува од точната вредност на мерената физичка величина и ова отстапување се нарекува **грешка при мерењето**.

**Апсолутната грешка** е изразена во единици на мерената величина и е дадена со изразот:

$$\Delta x = x - x_0, \quad (1.5.1)$$

каде  $x$  е вредноста на мерената величина добиена при мерењето, а  $x_0$  е точната вредност на мерената величина.

Таа не дава претстава за големината на грешката. Ако апсолутната грешка е на пр. 0,1V, не е исто дали оваа грешка се јавува при мерење на напон од 10V или 100V. Во првиот случај се работи за многу голема грешка, а во вториот за помала грешка.

**Релативната грешка** се дефинира како однос на апсолутната грешка на мерењето и точната вредност на мерената величина:

$$g = \frac{\Delta x}{x_0} = \frac{x - x_0}{x_0}. \quad (1.5.2)$$

Релативната грешка обично се изразува во проценти и се нарекува **процентуална**:

$$g\% = \frac{x - x_0}{x_0} 100\%. \quad (1.5.3)$$

Релативната грешка целосно ја карактеризира точноста на мерењето. Грешките можат да бидат позитивни и негативни, во зависност од вредностите за  $x$  и  $x_0$ .

Апсолутната и релативната грешка во пракса се одредуваат приближно, бидејќи точната вредност на мерената величина  $x_0$  е идеален поим и таа не може да биде позната.

Како вредност за споредување при одредување на грешките се зема некоја договорена точна вредност добиена со најточна метода и најпрецизни инструменти, или пак аритметичката средина на серија мерења на таа физичка величина.

### Прашања

1. Што е физичка величина?
2. Што е мерење на некоја физичка величина?
3. Што е мерење на некоја физичка величина?
4. Какви единици го сочинуваат меѓународниот систем на мерни единици?
5. Кои се основни мерни единици?
6. Како се добиваат изведените мерни единици?
7. Што се еталони?
8. Какви мерни инструменти постојат?
9. Што е разликата меѓу аналогните и дигиталните мерни инструменти?
10. Зошто се јавува грешка при мерењето?
11. Како е дефинирана апсолутна грешка и дали таа дава претстава за точноста на мерењето?
12. Како е дефинирана релативната грешка?
13. Како најчесто таа се изразува?

### Задачи

1. При мерење на јачината на електричната струја, амперметарот покажал вредност 2,5A. Точната (вистинската) вредност на мерената струја е 2,55A. Колку изнесува апсолутната, релативната и процентуалната грешка на мерењето?

Решение:

$$\text{Апсолутна грешка } e: \Delta x = x - x_0 = 2,5 - 2,55 = -0,05 \text{ A} .$$

$$\text{Релативната грешка } e: g = \frac{x - x_0}{x_0} = \frac{\Delta x}{x_0} = \frac{-0,05}{2,55} = -0,019 .$$

$$\text{Процентуалната грешка } e: g\% = \frac{x - x_0}{x_0} 100\% = g 100\% = -0,019 \cdot 100\% = -1,9\% .$$

2. При мерење на отпорот на еден отпорник добиената вредност е 48,6 kΩ. Ако истиот отпорник се мери со многу прецизна метода, се добива вредност од 50,087 kΩ. Да се одреди апсолутната и релативната грешка при првото мерење, ако се земе дека второто мерење е извршено без грешка. (Одговор:  $\Delta x = x - x_0 = -1,478 \text{ k}\Omega$ ,  $g\% = -2,97\%$ )

**ЗАПОМНИ:**

1. Според поставките на молекуларната физика, материјата е составена од молекули, како најситни делови на соединенијата, а молекулите се состојат од атоми, кои се најситни делови на хемиските елементи.

2. Елементарен електричен полнеж е најмалата количина електрицитет, која натаму неможе да се дели и се означува со буквата  $e$ .

3. Проводници се оние материјали кои содржат голем број слободни електрични полнежи: електрони или позитивни и негативни јони. Изолаторите се материјали кои не содржат слободни електрични полнежи. Полупроводниците ја сочинуваат третата група на материјали и кај нив бројот на слободни полнежи е многу помал отколку кај проводниците, но е поголем од кај изолаторите.

4. Мерењето е множество на експериментални постапки кои имаат за цел одредување на вредноста на една физичка големина. Вредноста на мерената величина добиена со мерење се нарекува резултат на мерењето.

5. Основните единици, се дефинирани според најсовремените достигнувања во науката. Според овој систем, постојат седум основни единици: за должина метар (m), за време секунда (s), за маса килограм (kg), за јачина на електрична струја ампер (A), за температура келвин (K), за јачина на светлината кандела (cd) и за количество материја мол (mol).

6. Мерењето на физичките величини се прави со мерни инструменти. Тоа се направи конструирани така да овозможуваат едноставно добивање на резултат од мерењето. Се користат аналогни и дигитални инструменти за мерење.

7. Причините што се наведени погоре доведуваат до тоа резултатот при мерењето да се разликува од точната вредност на мерената физичка величина и ова отстапување се нарекува грешка при мерењето.



## 2. ЕЛЕКТРОСТАТИКА

Електростатика е дел од електротехниката која ги проучува појавите поврзани со електричните полнежи кои мируваат, силите со кои тие заемно дејствуваат, како и физичките процеси во просторот околу нив.

### 2.1. КУЛОНОВ ЗАКОН

Кулоновиот закон (1785 год) ја опишува силата меѓу две електризирани тела кои имаат мали димензии во однос на нивното меѓусебно растојание и таквите тела се наречени **точкести електрични полнежи**. Во своите експерименти, Кулон, ја мерел силата на заемно механичко дејство меѓу две електризирани тела со помош на прецизна торзиона вага. Притоа ги менувал количините на електрицитет на телата и нивното меѓусебно растојание. Количините на електрицитет ги менувал на тој начин што наелектризирано топче го допирал со ненаелектризирано топче со исти димензии. Ако топчињата се со исти димензии, почетниот електрицитет ќе се распредели на половина на двете топчиња. Со разелектризирање на едното топче и повторно допирање со другото наелектризирано топче, електрицитетот на топчињата се сведува на четвртина од првобитната наелектризираност итн. Добиените заклучоци од експериментите Кулон ги формулирал во закон, познат како **Кулонов закон** и математички ги запишал.

Силата е векторска големина, одредена со интензитет, правец и насока. Силата како вектор се означува со  $\vec{F}$ , а нејзиниот интензитет со  $F$ .

Според Кулоновиот закон, интензитетот на електростатичката сила  $F$ , со која заемно дејствуваат два точкести електрични полнежи е пропорционален со производот на нивните полнежи  $Q_1$  и  $Q_2$  и обратно пропорционален со квадратот на нивното меѓусебно растојание  $r$ . Силата дејствува по правецот што минува низ полнежите и има карактер на привлекување ако полнежите се разноимени (едниот позитивен, другиот негативен) и карактер на одбивање, ако полнежите се истоимени (двата позитивни или двата негативни)(сл. 2.1.1).

Кулоновиот закон може да се запише со следната формула:

$$F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}, \quad (2.1.1)$$

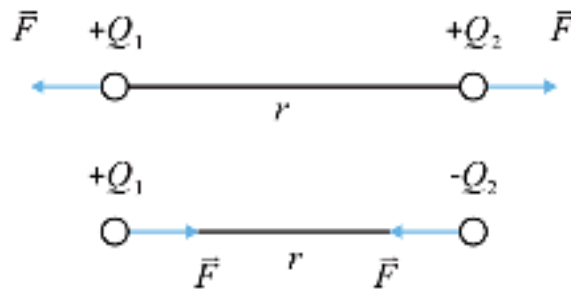
каде  $k$  е константа на пропорционалноста. Константата на пропорционалноста зависи од системот на мерни единици и од средината во која се наоѓаат точкестите полнежи.

Во SI системот на мерни единици, за полнежи сместени во вакуум, вредноста на таа константа е  $k_0$  и изнесува:

$$k_0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2}, \quad (2.1.2)$$

каде  $\epsilon_0$  е диелектрична константа на вакуумот и има вредност:

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}, \quad (2.1.3)$$



Сл. 2.1.1. Електростатичка сила меѓу два полнежи

### Прашања:

1. Како гласи Кулоновиот закон?
2. Дали силата е привлечна или одбивна ако полнежите се истоимени?
3. Што е  $\epsilon_0$  и колку изнесува нејзината вредност?
4. Ако растојанието меѓу два точкести полнежи се намали два пати, како ќе се промени интензитетот на силата помеѓу нив?

### Задачи:

1. Одреди го интензитетот на силата со која си заемодејствуваат два точкести полнежи  $Q_1 = 2 \cdot 10^{-9} \text{ C}$  и  $Q_2 = 1 \cdot 10^{-9} \text{ C}$  поставени на растојание  $r = 1 \text{ m}$ , во вакуум?

Решение: Интензитетот на силата со која си заемодејствуваат два точкести полнежи е:

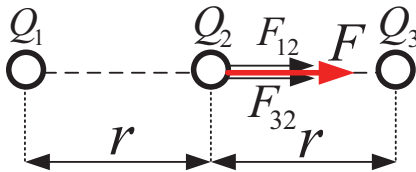
$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{2 \cdot 10^{-9} \cdot 1 \cdot 10^{-9}}{1^2} = 18 \cdot 10^{-9} \text{ N}$$

2. Две топчиња наелектризирани со исто количество електричество поставени се во вакуум на растојание  $r = 1 \text{ cm}$ . Интензитетот на привлечната електростатичка сила што се јавува меѓу нив е  $F = 9 \cdot 10^{-9} \text{ N}$ . Колку изнесува количеството електрицитет на полнежите? (Одговор:  $Q = 0,1 \cdot 10^{-12} \text{ C}$ ).



3. Три точкисти полнежи наелектризирани се со исто количество на електрицитет  $Q_1 = Q_2 = -Q_3 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ C}$  и поставени се во воздух, како на сликата подолу. Да се одреди интензитетот на силата која дејствува на вториот полнеж!

Решение: Најпрво треба да се одреди силата со која полнежот  $Q_1$ , како и полнежот  $Q_3$  дејствуваат врз полнежот  $Q_2$ . Потоа овие две сили треба да се векторски да се соберат за да се одреди вкупната сила што дејствува на вториот полнеж (принцип на суперпозиција).



Полнежот  $Q_1$  дејствува на полнежот  $Q_2$  со сила на одбивање  $F_{12}$ :

$$F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{4 \cdot 10^{-7} \cdot 4 \cdot 10^{-7}}{0,04^2} = 0,9 \text{ N}.$$

Силата со која полнежот  $Q_3$  дејствува на полнежот  $Q_1$  е привлечна, бидејќи полнежите се разноимени и има интензитет:

$$F_{32} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_3 Q_2}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{4 \cdot 10^{-7} \cdot 4 \cdot 10^{-7}}{0,04^2} = 0,9 \text{ N}.$$

Како што се гледа на горната слика силите  $F_{12}$  и  $F_{32}$  се колинеарни вектори и тие се во иста насока. Интензитетот на резултантната сила е збир од нивните интензитети и таа е насочена кон полнежот  $Q_3$ :

$$F = F_{12} + F_{32} = 1,8 \text{ N}.$$

## 2.2. ЕЛЕКТРОСТАТИЧКО ПОЛЕ

При проучување на силите на меѓусебното дејство на електризираните тела, се поставува прашањето каква е природата на тие сили и како тие се пренесуваат од тело на тело без некоја видлива материјална врска меѓу овие тела.

За да се одговори на ова прашање, во рамките на електростатиката, воведен е поимот на физичко **електрично поле**, кое ги опкружува сите електризирани тела и со чија помош се пренесуваат силите на меѓусебно дејство. Полето се сфаќа како една посебна физичка, енергетски "напегната" состојба во просторот каде се одигруваат материјалните процеси. Полето има материјална природа.

**Електростатичкото поле** кое ќе се проучува во рамките на електростатиката, е наједноставен случај на електрично поле, што го создаваат и со кое се опкружени полнежите кои мируваат.

Како и другите полиња и електростатичкото поле не може да се види. Може да се видат само неговите ефекти.

Експерименталната проверка за постоење на електрично поле во некоја точка се состои од поставување на **пробен електричен полнеж** во таа точка. Ако на пробниот полнеж дејствува некоја сила од електрична природа, во таа точка постои електрично поле. **Пробниот полнеж** е мало електризирано тело (точкест полнеж), со мала количина на

позитивен електрицитет  $Q_0$ . Неговиот електрицитет треба да биде мал за да не предизвика промена на полето што се испитува. Според тоа, може да се прошири дефиницијата за електростатичкото поле.

**Електростатичкото поле** е посебна физичка состојба на просторот околу мирните електрични полнежи и тоа дејствува со сила на други полнежи што ќе се внесат во него.

Електростатичкото поле **не дејствува со сила врз полнежот што го создава**, туку само врз други полнежи кои ќе се внесат во просторот каде што постои полето.

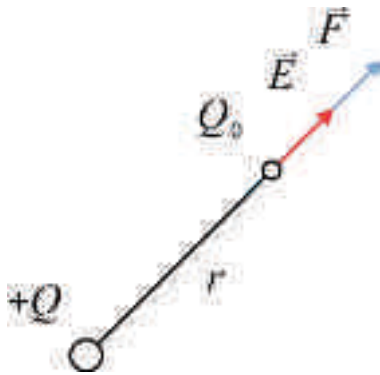
Електростатичкото поле квантитативно се опишува со векторот на јачина на електричното поле  $\vec{E}$ .

Интензитетот на векторот на јачината на електричното поле во дадена точка (сл. 2.2.1) се дефинира како количник од силата  $F$  со која полето во таа точка дејствува врз пробниот полнеж и количината на електрицитетот  $Q_0$  на пробниот полнеж:

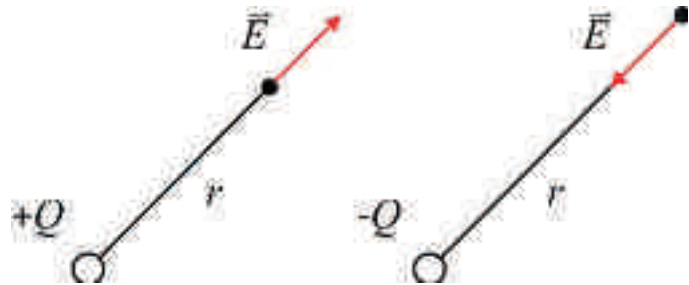
$$E = \frac{F}{Q_0}. \quad (2.2.1)$$

Правецот и насоката на овој вектор се поклопуваат со правецот и насоката на силата со која полето дејствува на позитивен пробен полнеж (сл.1.3.1). Ако доведениот полнеж е негативен тогаш, силата има обратна насока од полето.

Единицата за јачината на електричното поле е **волт врз метар** (V/m).



Сл. 2.2.1. Јачина на електростатичко поле од точкест полнеж.



Сл. 2.2.2. Насока на векторот на јачина на електростатичко поле на точкест полнеж.

Како пример, а и како многу важен теоретски случај, ќе го одредиме **полето на еден осамен точкест полнеж**  $Q$ . Ова е лесно да се направи со помош на Кулоновиот закон и дефиниционата равенка (2.1.1). Ако во дадена точка која се наоѓа на растојание  $r$  од полнежот  $Q$  се донесе позитивен пробен електричен полнеж  $Q_0$ , врз него ќе дејствува сила (сл. 2.2.1):

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{QQ_0}{r^2}. \quad (2.2.2)$$

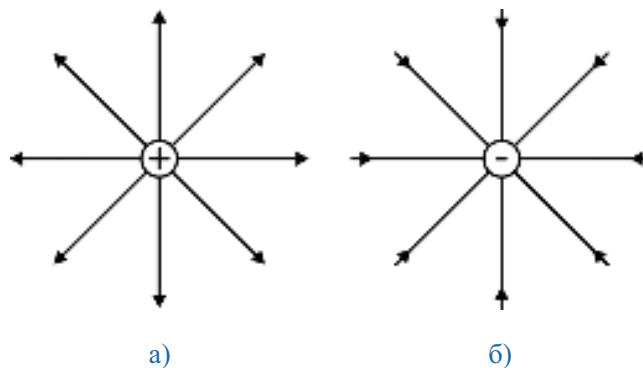
Интензитетот на векторот на јачината на електричното поле од полнежот  $Q$  е:

$$E = \frac{F}{Q_0} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}. \quad (2.2.3)$$

Интензитетот на јачината на електричното поле  $E$  е пропорционален на полнежот  $Q$ , а обратно пропорционален на квадратот на растојанието  $r$ . Тоа значи дека ако се оддалечуваме од електричниот полнеж, интензитетот на полето се намалува. Правецот на векторот на јачината на полето се поклопува со правата што минува низ точката каде што е сместен полнежот и точката каде се бара полето. Насоката на векторот е од полнежот кон просторот, ако полнежот е позитивен и од просторот кон полнежот, ако полнежот е негативен (сл.2.2.2).

Електричното поле може сликовито да се претстави со помош на таканаречните **линии на векторот на јачината на електричното поле** или **силови линии**. Овие линии ги вовел Фарадеј во своите експериментални испитувања.

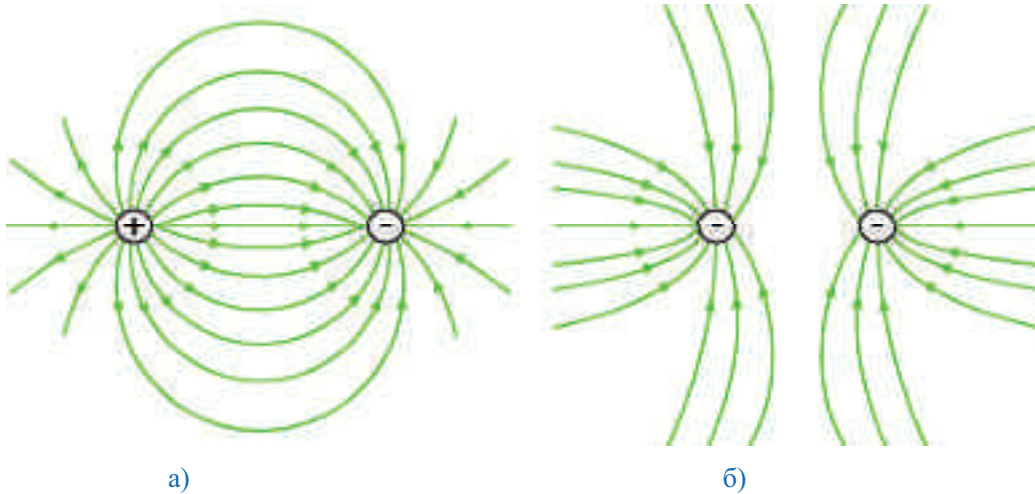
Силовите линии започнуваат на позитивните полнежи (**извори**) и завршуваат на негативните електрични полнежи (**понори**) и не се сечат меѓу себе. Целиот простор околу полнежите е исполнет со силови линии и густината на силовите линии е мерка за јачината на полето. Поголема густина на силовите линии одговара на поголема јачина на електричното поле. Сите нацртани линии на полето заедно го сочинуваат **спектарот на линиите**.



Сл. 2.2.3. Линии на векторот на електричното поле за осамен точкест полнеж.

Спектрите на линии на јачината на полето за осамен позитивен и осамен негативен точкест полнеж прикажани се на сл. 2.2.3. Линиите на полето се радијални и насочени од полнежот кон просторот за позитивен осамен полнеж (сл.2.2.3.а), а линиите на полето се радијални и насочени од просторот кон полнежот за негативен осамен полнеж (сл.2.2.3.б). Полето на осамен точкест полнеж се нарекува **радијално електрично поле**.

На сл. 2.2.4.а се претставени силовите линии на електричното поле од еден позитивен и еден негативен електричен полнеж, а на сл. 2.2.4.б силовите линии на полето од два негативни електрични полнежи.



Сл.2.2.4. Линии на векторот на електричното поле од два точкести полнежи

### Прашања

1. Како се дефинира електростатичкото поле?
2. Како се потврдува присуството на електростатичкото поле во даден простор?
3. Како се дефинира интензитетот на векторот на јачината на електричното поле во дадена точка?
4. Какви се правецот и насоката на векторот на јачината на електричното поле?
5. Која е единицата за јачината на електричното поле?
6. Дали интензитетот на векторот на јачината на електрично поле е пропорционален на полнежот што го создава полето?
7. Како ќе се промени интензитетот на векторот на јачината на електричното поле на исто растојание од еден електричен полнеж, ако неговата наелектризираност се зголеми двапати?
8. Што покажува поголема густина на силовите линии?
9. Какви се линиите на полето на позитивен точкест полнеж и каде почнуваат, а каде завршуваат?

### Задачи:

1. Да се одреди интензитетот на векторот на јачината на електричното поле што го создава точкест полнеж електризиран со количество електрицитет  $Q=1 \cdot 10^{-9}$  C во точка на растојание  $r=4,2$  cm!

Решение: Интензитетот на векторот на јачината на електричното поле е:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2} = 9 \cdot 10^9 \frac{1 \cdot 10^{-9}}{(4,2 \cdot 10^{-2})^2} = 500 \text{ V/m} .$$

2. На точкест полнеж, наелектризиран со количество на електрицитет  $Q = 2 \cdot 10^{-6}$  C и внесен во електростатичко поле, дејствува електростатичка сила  $F = 0,6$  mN. Да се пресмета интензитетот на векторот на јачината на електростатичкото поле во точката во која е внесен полнежот? (Одговор:  $E = 0,3$  kV/m).

### 2.3. ЕЛЕКТРИЧЕН ПОТЕНЦИЈАЛ И НАПОН

Ако даден електричен полнеж се поместува низ електричното поле, електростатичките сили ќе вршат врз него работа која, за разлика од силата, е скаларна големина. Со помош на работата ќе дефинираме една нова величина **електричен потенцијал**, која може да го одреди полето во сите негови точки.

Ќе набљудуваме осамен точкест полнеж (сл.2.3.1). Во неговата околина се создава електрично поле во кое внесуваме позитивен пробен електричен полнеж  $Q_0$  од некоја референтна точка  $R$  која е избрана бесконечно далеку, во точката  $M$ . Притоа, мораме да извршиме одредена работа за да ги совладаме силите на полето што дејствуваат врз пробниот полнеж. За сметка на извршената работа од надворешните сили, пробниот полнеж во точката  $M$  ќе има одредена потенцијална енергија.

Ако истиот полнеж се помести од точката  $M$  во точката  $R$ , тогаш работа вршат силите на електричното поле, па потенцијалната енергија што ја имал полнежот во точката  $M$  ќе се намалува.

Електричниот потенцијалот  $V$  на било која точка  $M$  во полето се дефинира како количник од работата што ја вршат силите на полето, при преместување на позитивен пробен полнеж  $Q_0$  од точката  $M$  до референтната точка  $R$ , и електрицитетот на полнежот  $Q_0$ :

$$V = \frac{A}{Q_0}. \quad (2.3.1)$$

Единицата за електричен потенцијал е **волт (V)**.

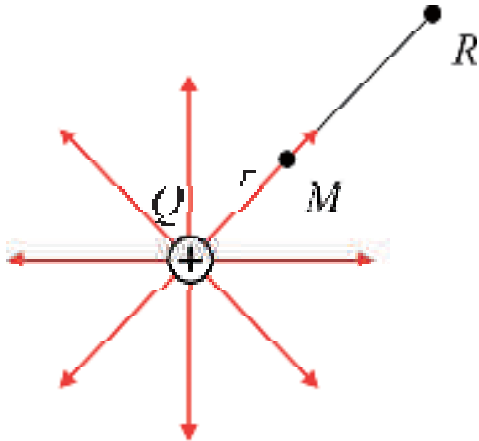
Референтната точка  $R$  е точка на нулти потенцијал. Таа може да се избере произволно. Најчесто се избира во бесконечност ако електризираните тела имаат конечни димензии. Во пракса, како референтна точка се зема површината на земјата.

Електричниот потенцијал на полето што го создава точкест полнеж  $Q$  во точката  $M$  во однос на референтна точка избрана во бесконечност (сл. 2.3.1) може да се одреди со следниот израз:

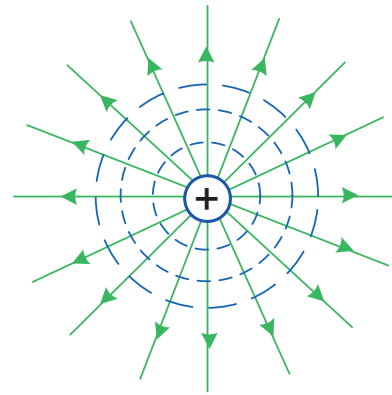
$$V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}, \quad (2.3.2)$$

каде  $r$  е растојание од полнежот до точката во која се бара потенцијалот.

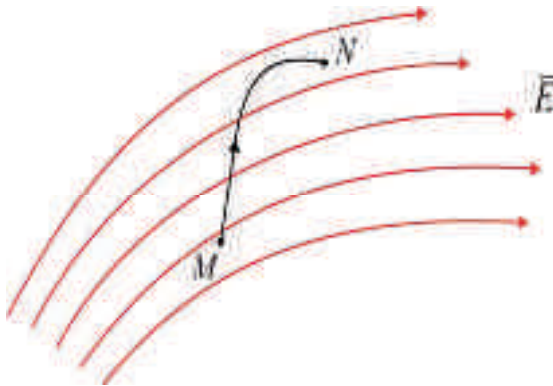
Површини во полето чии точки имаат иста вредност за потенцијалот се наречени **еквипотенцијални површини**.



Сл. 2.3.1. Електричен потенцијал.



Сл. 2.3.2. Еквипотенцијални површини.



Сл.2.4.3. Електричен напон.

Од равенката за потенцијал на осамен точкест полнеж (2.3.2) се добива дека електричниот потенцијал има иста вредност во сите точки кои се наоѓаат на исто растојание  $r$  од полнежот. Тоа значи дека еквипотенцијалните површини се сферни површини со центри во точката каде е сместен точкестиот полнеж (сл. 2.3.2).

Електричниот напон  $U$  на некоја точка  $M$  во однос на друга точка  $N$  се дефинира како разлика на потенцијалот во точката  $M$  и потенцијалот во точката  $N$  (сл. 2.3.3):

$$U_{MN} = V_M - V_N. \quad (2.3.3)$$

Единицата за електричен напон е волт (V).

Сите точки од една еквипотенцијална површина имаат ист напон во однос на било која точка од друга еквипотенцијална површина.

### Прашања

1. Како се дефинира потенцијалот во било која точка на електростатичкото поле?
2. Како зависи потенцијалот на точкестиот полнеж во дадена точка од растојанието на точката од полнежот?
3. Како се дефинира електричен напон меѓу две точки?

4. Што се еквипотенцијални површини?

5. Колкав напон постои меѓу две точки на една еквипотенцијална површина?

### Задачи

1. Да се одреди потенцијалот на растојание  $r=1\text{m}$  од точкест полнеж  $Q=1\cdot 10^{-9}\text{C}$ ?

Решение: Електричниот потенцијал е:

$$V = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} = 9 \cdot 10^9 \frac{1 \cdot 10^{-9}}{1} = 9\text{V}$$

2. Да се одреди напонот меѓу две точки во електрично поле кои се наоѓаат на потенцијали  $V_1=40\text{V}$  и  $V_2=20\text{V}$ ?

Решение: Напонот меѓу точките е:

$$U = V_1 - V_2 = 40 - 20 = 20\text{V}.$$

3. Електричните потенцијали на два проводника изолирани од земјата, во однос на земјата се:  $V_1 = 50\text{V}$  и  $V_2 = -20\text{V}$ . Колкава работа ќе извршат електростатичките сили за да пренесат пробен електричен полнеж со количество електрицитет  $Q = 1 \cdot 10^{-6}\text{C}$  од едниот на другиот проводник!

Решение: Електричниот напон меѓу двата проводници е:

$$U = V_1 - V_2 = 50 - (-20) = 70\text{V}.$$

Бидејќи напонот може да се изрази преку работата слично како и потенцијалот (1.4.1), за извршената работа се добива:

$$A = QU = 70 \cdot 1 \cdot 10^{-6} = 70\mu\text{J}.$$

## 2.4. ДИЕЛЕКТРИЦИ И НИВНИ СВОЈСТВА

Материјалите во електротехниката, според нивните електрични својства се делат на две основни групи: **проводници и изолатори (диелектрици)**. Постои и трета група на материјали наречени **полупроводници** за кои ќе стане збор подоцна.

**Проводници** се материјали кои содржат голем број слободни електрични полнежи. Најважни проводници се металите: алуминиум, бакар, сребро и др.

**Изоляторите (диелектриците)** се материјали кои не содржат слободни електрични полнежи. Кај реалните изолатори постои и еден мал број на слободни електрични полнежи, но тој може да се занемари. Идеален изолатор е вакуумот. Сувиот воздух исто така се приближува кон идеален изолатор. Во добри изолатори се вбројуваат и ебонитот, парафинот, порцеланот, стаклото, лискунот, гумата, различни видови хартија, масло и др.

Кај диелектриците елементарните електрични полнежи се "врзани" во границите на молекулите и атомите. Кога диелектрикот ќе се доведе во надворешно електрично поле, врз полнежите дејствува сила и тоа врз позитивните (атомските јадра) дејствува во насока на полето, а врз електроните во обратна насока. Под дејство на оваа сила доаѓа до поместување на полнежите во границите на атомите и молекулите. **Оваа појава на**



поместување на полнежите на диелектриците под дејство на надворешно поле, се нарекува поларизација на диелектрикот.

Кај некои диелектрици по престанокот на дејството на надворешното електрично поле, престанува процесот на поларизацијата. Таквите диелектрици се наречени неполярни диелектрици.

Покрај неполярните диелектрици, постојат и поларни диелектрици.

Присуството на диелектрикот го менува интензитетот на векторот на јачината на електричното поле. Ако со  $E_0$  се означи интензитетот на полето што го создава точкест полнеж  $Q$  поставен во вакуум, на растојание  $r$ , а со  $E$  интензитетот на полето од истиот точкест полнеж, на истото растојание, но сега поставен во диелектрична средина, нивниот однос ќе биде константен. Овој однос ги карактеризира електричните особини на диелектрикот и се нарекува релативна диелектрична пропустливост или релативна диелектрична константа:

$$\varepsilon_r = \frac{E_0}{E}. \quad (2.4.1)$$

Релативната диелектрична константа има вредност поголема од единица за сите видови на изолациони материјали и е без димензии. На пр. за дестилирана вода вредноста на релативната диелектрична константа е 81, за пертинакс околу 5, сува хартија од 1,8-2,6, тефлон 2,1 и тн.

Друга важна карактеристика на диелектриците е електричната цврстина (издржливост на диелектрикот). При нормални услови, диелектриците имаат сосема мал број на слободни полнежи и практички се однесуваат како идеални изолатори. Кога јачината на полето ќе достигне одредена вредност, бројот на слободните електрони нагло се зголемува и диелектрикот станува проводник. Оваа појава е наречена електрично пробивање на диелектрикот. Јачината на полето при која доаѓа до електрично пробивање на диелектрикот се вика електрична цврстина и се означува со  $E_c$ . Се мери во исти единици како и јачината на полето, но во пракса обично се изразува во (kV/cm) или (kV/mm). На пример електричната цврстина на воздухот е 30 (kV/cm), а за трансформаторското масло 50-180 (kV/cm). За сигурен режим на работа на електричните направи, јачината на полето во изолаторите треба да биде неколку пати помала од електричната цврстина.

Кај некои диелектрици, поларизацијата не се губи моментално по престанокот на дејството на електричното поле, туку диелектрикот останува делумно поларизиран подолго време. Заостанатата поларизација создава потешкотии во текстилната индустрија, при производство на синтетички ткаенини.

Ако диелектрикот се наоѓа во наизменично променливо електрично поле, поместувањето на полнежите ќе се одвива наизменично и ќе предизвика загревање на диелектрикот. При повисоки фреквенции на наизменичното поле и загревањето е поголемо. Оваа појава е наречена дијатермија и наоѓа примена во загревањето и сушењето на влажни материјали, за забрзување на хемиски рекации, во медицината и др.



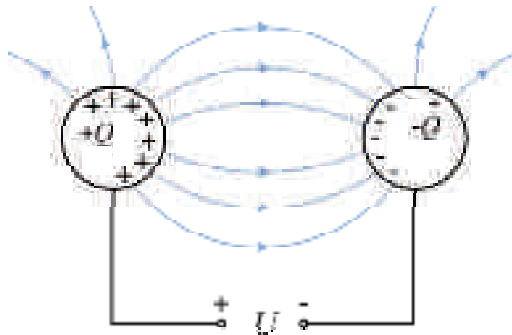
Некои диелектрици (некои видови на восок, полистирол, ебонит и др.) ја имаат следната особина: ако, додека се во растопена состојба, се внесат во јако електрично поле и се остават да се изладат и стврднат во полето, ќе останат поларизирани и по престанокот на дејството на полето. Вака добиените поларизирани диелектрици се наречени **електрети**.

### Прашања

1. Што се проводници, а што изолатори (диелектрици)?
2. Која појава се нарекува поларизација на диелектрикот?
4. Што е релативна диелектрична константа и колкава вредност има?
5. Што е електрична цврстина на диелектрикот?
6. Која појава е наречена дијатермија?
7. Што се електрети?

## 2.5. КОНДЕНЗАТОРИ И ЕЛЕКТРИЧЕН КАПАЦИТЕТ

**Кондензаторот** претставува систем од две меѓусебно изолирани проводни тела, со било каков облик и големина, електризирани со исти по износ, но спротивни по предзнак полнежи  $+Q$  и  $-Q$ . Проводните тела се нарекуваат **електроди**. Полнежите се распределени по површина на проводните тела и создаваат електрично поле, чии силиви линии почнуваат од површината на позитивното и завршуваат на површината на негативното тело (сл.2.5.1). Меѓу електродите ќе постои напон  $U$ .



Сл. 2.5.1. Кондензатор.



Сл. 2.5.2. Симбол за електричен кондензатор.

Ако кондензаторот се оптоварува со различни количини на електрицитет и ако се мери напонот меѓу електродите, ќе се забележи дека напонот е пропорционален со количината на електрицитет. Константата на пропорционалност  $C$  се нарекува **капацитет на кондензаторот** и дадена е со изразот:

$$C = \frac{Q}{U}. \quad (2.5.1)$$

Капацитетот на кондензаторот се дефинира како количник од полнежот  $Q$  на позитивната електрода и напонот  $U$  на позитивната во однос на негативната електрода.

Ако кондензатор со капацитет  $C$  се приклучи на напон  $U$ , тогаш тој ќе се наполни со полнеж  $Q = CU$ . При ист приклучен напон  $U$ , кондензаторот кој има поголем капацитет во себе ќе прими поголем полнеж  $Q$ . Одовде може да се разбере зошто константата  $C$  е наречена електричен капацитет.

Единицата за електричен капацитет е **фарад** (F). Фарадот е многу голема единица за практична примена, затоа се користат помали единици од неа: микрофарад ( $1\mu\text{F}=10^{-6}\text{ F}$ ), нанофарад ( $1\text{nF}=10^{-9}\text{ F}$ ) и пикофарад ( $1\text{pF}=10^{-12}\text{ F}$ ).

Во електричните шеми, кондензаторот се означува со симболот претставен на сл. 2.5.2.

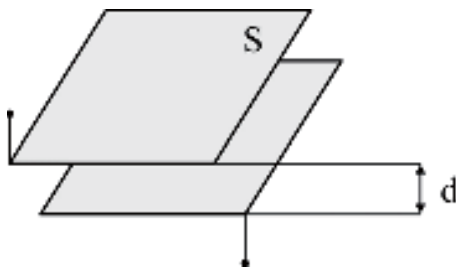
Според обликот на електродите, кондензаторите може да се поделат на плочести, сферни, цилиндрични и др.

**Плочест кондензатор е наједноставен тип на кондензатор.** Се состои од две меѓусебно паралелни метални плочи со исти површини  $S$ , поставени на растојание  $d$ . Просторот меѓу плочите може да биде исполнет со воздух или диелектрик (сл. 2.5.3).

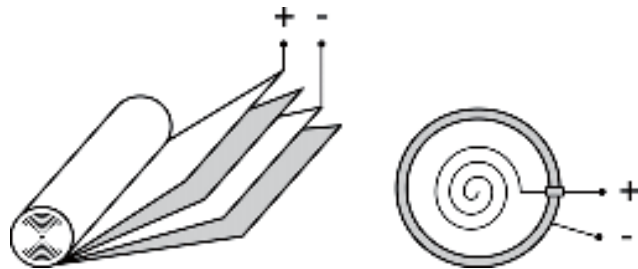
Капацитетот на плочест кондензатор исполнет со воздух може да се одреди со следниот израз:

$$C = \frac{Q}{U} = \varepsilon_0 \frac{S}{d}, \quad (2.5.2)$$

каде  $\varepsilon_0$  е диелектрична константа на вакуумот и изнесува  $8,85 \cdot 10^{-12}$  (F/m). Основна мерна единица е фарад по метар.



Сл. 2.5.3. Плочест кондензатор.



Сл. 2.5.4 Една изведба на кондензатор.

Капацитетот на плочестиот кондензатор е пропорционален на површината на плочите, а обратно пропорционален на растојанието меѓу плочите. Значи капацитивноста на кондензаторот зависи од неговите димензии и од средината меѓу плочите на кондензаторот.

Ако кондензаторот се исполни со диелектрик, тогаш неговиот капацитет ќе се зголеми и ќе изнесува:

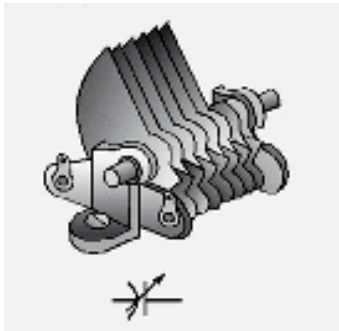
$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d} = \varepsilon \frac{S}{d}, \quad (2.5.3)$$

каде  $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$  е диелектрична константа.

Постојат различни изведби на плочести кондензатори.

За да се добие поголема капацитет на кондензаторот потребно е електродите да имаат голема површина  $S$ . Релативно голема површина, а со тоа и голем капацитет се постигнува кај кондензаторите на сл. 2.5.4. Електродите се две долги ленти од алуминиумска фолија меѓусебно изолирани со изолациони ленти и намотани во облик на ролна. Нивната капацитивност изнесува од 10 pF до 100  $\mu$ F.

**Електролитските кондензатори** имаат голем капацитет. Кај нив изолациониот слој се формира по хемиски пат и претставува оксиден слој со многу мала дебелина нанесен на површината на едната електрода направена од алуминиумската фолија. Другата електрода е електролитски раствор. При користење на електролитските кондензатори, треба да се води грижа за тоа која електрода е позитивна, а која негативна, за да не дојде до оштетување на кондензаторот. Поради тоа нивните електроди се обележуваат при нивната изработка.



Сл. 2.5.5. Променлив воздушен кондензатор со симболот за графичко обележување.

Посебен вид на плочест кондензатор е **променливиот воздушен кондензатор** (сл.2.5.5). Тој се применува во радиотехниката. Се состои од две групи на метални плочи. Едната група ја сочинуваат неподвижната електрода, а другата група плочи е монтирана на заедничка осовина и ја сочинуваат подвижната електрода. Со промена на меѓусебната положба на електродите, се менува активната површина  $S$ , а со тоа и капацитетот на кондензаторот.

### Прашања

1. Што претставува кондензаторот?
2. Како се дефинира капацитетот на кондензаторот?
3. Како се пресметува капацитетот на плочест воздушен кондензатор?
4. Што ќе се случи со неговиот капацитет, ако кондензаторот се наполни со диелектрик?
5. Каде се користи променливиот воздушен кондензатор и како е направен?

### Задачи

1. Плочест воздушен кондензатор со површина на плочите  $S = 400 \text{ cm}^2$  и меѓусебно растојание  $d = 5 \text{ mm}$ , приклучен е на напон  $U = 100 \text{ V}$ . Да се одреди капацитетот и полнежот на кондензаторот? (Одговор:  $C = 70,8 \text{ pF}$ ,  $Q = 7,08 \cdot 10^{-9} \text{ C}$ ).

Решение: Капацитетот на кондензаторот е:

$$C = \varepsilon_0 \frac{S}{d} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{400 \cdot 10^{-4}}{5 \cdot 10^{-3}} = 70,8 \text{ pF}.$$

Полнежот на плочите на кондензаторот изнесува:

$$Q = CU = 70,8 \cdot 10^{-12} \cdot 100 = 7,08 \cdot 10^{-9} \text{ C}.$$

2. Колкава треба да биде дебелината на диелектрикот од парафин со релативна диелектрична константа  $\varepsilon_r = 3,6$  за да кондензаторот со површина на неговите плочи  $S = 30 \cdot 500 \text{ mm}^2$  има капацитет  $C = 477 \text{ pF}$  ?

Решение: Од изразот за капацитетот на плочест кондензатор  $C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d}$ , за дебелината на диелектрикот се добива:

$$d = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{C} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,6 \cdot 30 \cdot 500 \cdot 10^{-6}}{477 \cdot 10^{-12}} = 1 \text{ mm}.$$

3. Колкава површина треба да имаат листовите од лискун со дебелина  $d = 0,2 \text{ mm}$ , за да се добие плочест кондензатор со капацитет  $C = 2 \text{ } \mu\text{F}$ . (Одговор:  $S = 6,95 \text{ m}^2$ ).

4. Кондензатор поставен во празен сад (воздух) има капацитет  $C_0 = 5 \text{ nF}$ . Колку ќе изнесува неговиот капацитет ако во садот се налее трансформаторско масло со релативна диелектрична константа  $\varepsilon_r = 2,5$  ? (Одговор:  $C = 12,5 \text{ nF}$ ).

## 2.6. ПОВРЗУВАЊЕ НА КОНДЕНЗАТОРИ

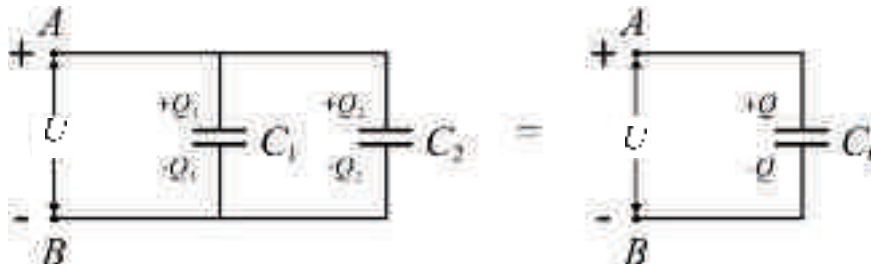
Во пракса често се среќаваат групи на кондензатори поврзани на различни начини. Најважни видови на врски меѓу кондензаторите се **паралелна**, **сериска (редна)** и **комбинирана врска**. Ова обично се практикува кога недостасува кондензатор со потребен капацитет. Кога група на кондензатори е поврзана меѓу два извода, таа може да се надомести со еден **еквивалентен кондензатор со еквивалентен капацитет**.

### 2.6.1. Паралелна врска на кондензатори

На сл. 2.6.1 е прикажана паралелна врска на два кондензатори приклучени меѓу точките А и В. Напоните на двата кондензатори со капацитети  $C_1$  и  $C_2$  се исти и еднакви на приклучниот напон:  $U_1 = U_2 = U$ . Кондензаторите ќе се наполнат со различни полнежи  $Q_1$  и  $Q_2$ , кои се дадени со равенките:

$$Q_1 = C_1 U \quad (2.6.1)$$

и 
$$Q_2 = C_2 U. \quad (2.6.2)$$



Сл. 2.6.1. Паралелна врска на кондензатори.

Во процесот на оптоварувањето на кондензаторите низ точките  $A$  и  $B$  поминува вкупен позитивен полнеж  $Q$  кој е збир од полнежите  $Q_1$  и  $Q_2$  на секој од кондензаторите:

$$Q = Q_1 + Q_2. \quad (2.6.3)$$

Заменувајќи ги равенките (2.6.1) и (2.6.2) во равенката (2.6.3), се добива:

$$Q = Q_1 + Q_2 = C_1 U + C_2 U = (C_1 + C_2) U. \quad (2.6.4)$$

Двата паралелно врзани кондензатори можат да се заменат со еден еквивалентен кондензатор приклучен на напон  $U$  и оптоварен со електричен полнеж  $Q$ , чиј капацитет е:

$$C = \frac{Q}{U} = C_1 + C_2. \quad (2.6.5)$$

Капацитетот на еквивалентниот кондензатор со кој ги заменуваме двата паралелно поврзани кондензатори е еднаков на збирот од нивните капацитети.

За  $n$  паралелно поврзани кондензатори, еквивалентниот капацитет ќе биде збир од капацитети на поедините кондензатори:

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n. \quad (2.6.6)$$

### 2.6.2. Сериска (редна) врска на кондензатори

На сл. 2.6.2 е прикажана сериска врска на два кондензатори со капацитети  $C_1$  и  $C_2$  приклучени на напон  $U$ . При редно поврзани кондензатори, истите, секогаш се електризираат со исто количество електрицитет:

$$Q_1 = Q_2 = Q. \quad (2.6.7)$$

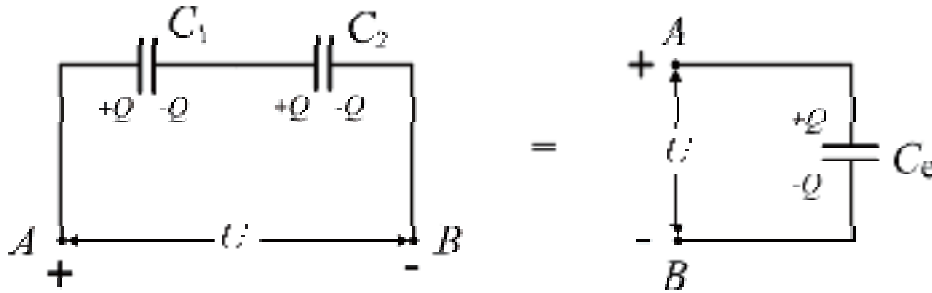
Напоните на кондензаторите ќе зависат од нивните капацитети:

$$U_1 = \frac{Q}{C_1} \quad (2.6.8)$$

и 
$$U_2 = \frac{Q}{C_2}, \quad (2.6.9)$$

а вкупниот напон ќе биде еднаков на приклучниот напон на сериската врска:

$$U = U_1 + U_2 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} = Q \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right). \quad (2.6.10)$$



Сл. 2.6.2. Сериска врска на кондензатори.

Делејќи ја горната равенка со  $Q$ , се добива:

$$\frac{U}{Q} = \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) = \frac{1}{C}. \quad (2.6.11)$$

Добивме, дека при сериска врска на кондензатори, реципрочната вредност од еквивалентниот капацитет е збир од реципрочните вредности на поедините капацитети.

Последниот израз може да се запише и во следниот облик:

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}. \quad (2.6.12)$$

За  $n$  сериски поврзани кондензатори, еквивалентниот капацитет ќе биде даден со изразот:

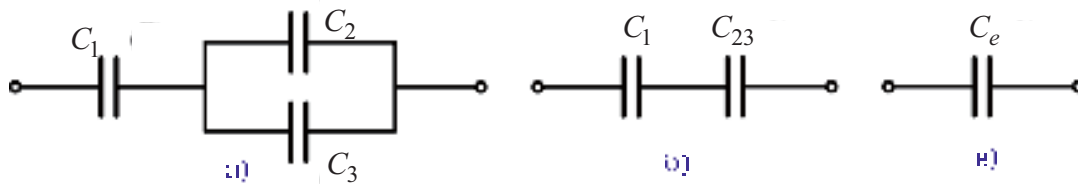
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}. \quad (2.6.13)$$

### 2.6.3. Комбинирана врска на кондензатори

Комбинираната врска на кондензаторите претставува комбинација од паралелно и сериско поврзување на кондензатори. Ќе разгледаме еден таков пример.

Во примерот претставен на сл. 2.6.3.а, дадени се три кондензатори со капацитети  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$  поврзани како на сликата. Кондензаторите  $C_2$  и  $C_3$  се поврзани паралелно, па нивниот еквивалентен капацитет е:

$$C_{23} = C_2 + C_3. \quad (2.6.14)$$



Сл. 2.6.3. Комбинирана врска на кондензатори.

Овој еквивалентен кондензатор е поврзан со кондензаторот  $C_1$  во серија (сл.2.6.3.б), и за вкупниот еквивалентен капацитет  $C$  (сл.2.6.3.в) се добива:

$$C = \frac{C_1 C_{23}}{C_1 + C_{23}}. \quad (2.6.15)$$

Ако во последниот израз се замени изразот (2.6.14), вкупниот еквивалентен капацитет е даден со следниот израз:

$$C = \frac{C_1(C_2 + C_3)}{C_1 + C_2 + C_3}. \quad (2.6.16)$$

### Прашања

1. Како се одредува еквивалентниот капацитет на два сериски поврзани кондензатори?
2. Како се одредува еквивалентниот капацитет на  $n$  сериски поврзани кондензатори?
3. Како се одредува еквивалентниот капацитет на два паралелно поврзани кондензатори?
4. Како се одредува еквивалентниот капацитет на  $n$  паралелно поврзани кондензатори?

### Задачи

1. Одреди го еквивалентниот капацитет на два сериски поврзани кондензатори со капацитети  $C_1 = 2 \mu\text{F}$  и  $C_2 = 4 \mu\text{F}$  ?

Решение: Еквивалентниот капацитет е:

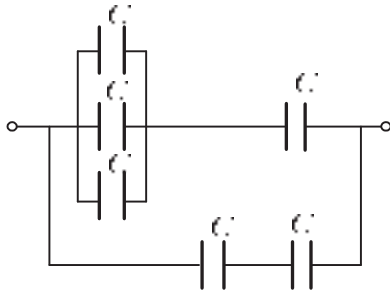
$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{2 \cdot 4}{2 + 4} = \frac{8}{6} = 1,33 \mu\text{F}$$

2. Колкав е еквивалентниот капацитет на кондензаторите од претходната задача ако тие се поврзат паралелно?

Решение: Еквивалентниот капацитет е:

$$C = C_1 + C_2 = 2 + 4 = 6 \mu\text{F} .$$

3. Да се пресмета еквивалентната капацитивност на групата кондензатори прикажани на сл. 2.6.4 ,  $C = 1 \mu\text{F}$  .



Сл. 2.6.4

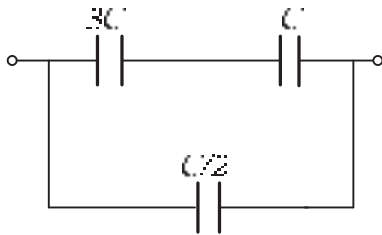
Решение:

Трите паралелно поврзани кондензатори можат да се претстават со еден кондензатор со капацитет  $3C = 3 \mu\text{F}$  .

Двата сериски поврзани кондензатори можат да се претстават со еден кондензатор со капацитет:

$$\frac{CC}{C+C} = \frac{C}{2} = 0,5 \mu\text{F} .$$

После извршеното еквивалентирање се добива поедноставена шема дадена на сл.2.6.5.

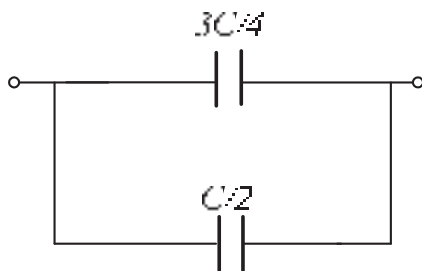


Сл.2.6.5.

Сериски поврзаните кондензатори со капацитет  $3C$  и  $C$  ќе се претстават со кондензатор со капацитет:

$$\frac{3C \cdot C}{3C + C} = \frac{3C^2}{4C} = \frac{3C}{4} = 0,75 \mu\text{F} ,$$

па ќе се добие шемата на сл.2.6.6.



Сл. 2.6.6.

Кондензаторите со капацитет  $3C/4$  и  $C/2$  се поврзани паралелно и ќе се еквивалентираат со еден кондензатор со капацитет:

$$C_e = 3C/4 + C/2 = 5C/4 = 1,25 \mu\text{F} .$$

Тоа е еквивалентниот капацитет на целата група кондензатори.

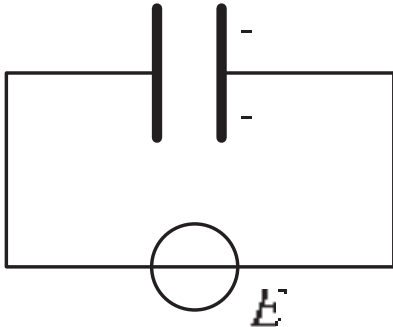
## 2.7. ЕНЕРГИЈА НА ЕЛЕКТРОСТАТИЧКОТО ПОЛЕ

Секое електростатичко поле содржи одредена количина на енергија која е еднаква на работата извршена при неговото воспоставување.

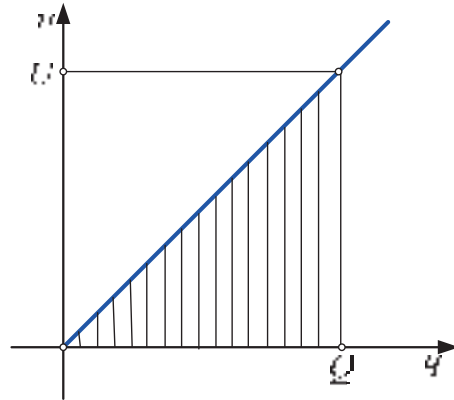
Ќе го набљудуваме процесот на воспоставување на електростатичкото поле во еден кондензатор. Кондензаторот може да се наполни ако се приклучи на извор на електрична струја, на пример батерија. Во текот на полнењето (оптоварувањето) на некој кондензатор, елементарни електрични полнежи се пренесуваат од едната негова електрода на другата со помош на извор на електрична струја. Во текот на полнењето на кондензаторот, изворот на електрична струја врши работа, совладувајќи ги електростатичките сили на полето меѓу



електродите. Оваа работа се претвора во потенцијална енергија на полето и се нарекува енергија на електростатичкото поле или електростатичка енергија.



Сл. 2.7.1. Полнење на кондензатор.



Сл.2.7.2. Линеарна зависност на напонот од полнежот на електродите.

Кондензаторот на сл. 2.7.1, во почетокот бил неоптоварен. Тогаш напонот меѓу електродите е еднаков на нула. Кога од втората електрода се преместуваат позитивни полнежи на првата електрода, тогаш првата електрода ќе се електризира позитивно, а втората негативно, со исти но спротивни по знак полнежи. Меѓу електродите ќе се создаде електрично поле и ќе постои потенцијална разлика, напон. Ако се зголемува полнежот со кој се оптоварени електродите на кондензаторот, ќе се зголемува и напонот меѓу нив. Ако во даден момент полнежот на позитивната електрода е  $q$ , напонот меѓу електродите ќе биде  $u = \frac{q}{C}$ . Линеарната зависност меѓу напонот и полнежот е дадена на сл. 2.7.2.

При пренесување на мал позитивен полнеж  $\Delta q$  од негативната на позитивната електрода, треба да се совладаат силите на електростатичкото поле. При тоа полето врши работа врз полнежот  $\Delta A$  која е еднаква на:

$$\Delta A = u \Delta q = \frac{q}{C} \Delta q. \quad (2.7.1)$$

Вкупната работа што треба да се изврши за да празниот кондензатор се оптовари со некој полнеж  $Q$ , ќе изнесува:

$$A = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} QU. \quad (2.7.2)$$

Вкупната работа е еднаква на шрафираната површина на триаголникот претставен на сл.2.7.2.

Според законот за зачувување на енергијата, оваа работа е претворена во енергија на оптоварениот кондензатор, поточно во **енергија на електростатичкото поле** што постои меѓу електродите на кондензаторот:

$$W_e = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} QU. \quad (2.7.3)$$

Единицата за електростатичка енергија е **џул (J)**.

### Прашања

1. Како се пресметува електростатичката енергија на оптоварен кондензатор, ако е познат полнежот на неговите електроди и напонот меѓу нив?
2. Како се пресметува електростатичката енергија на оптоварен кондензатор, ако е познат полнежот на неговите електроди и неговиот капацитет?
3. Обиди се да го добиеш изразот за одредување на електростатичката енергија, ако се познати капацитетот на кондензаторот и напонот меѓу електродите!

### Задачи

1. Плочест кондензатор со капацитет  $C = 150 \cdot 10^{-9} \text{ F}$  приклучен е на напон  $U = 4 \text{ kV}$ . Одреди ја енергијата содржана во неговото електростатичко поле? (Одговор:  $W = 1,2 \text{ J}$ ).
2. На колкав напон треба да се приклучи кондензатор со капацитет  $C = 10 \cdot 10^{-9} \text{ F}$ , за да истиот содржи енергија на електростатичкото поле  $20 \text{ mJ}$ ? (Одговор:  $U = 2 \cdot 10^3 \text{ V}$ ).
3. Плочест кондензатор со површина на плочите  $S = 80 \text{ cm}^2$  и растојание меѓу плочите  $d = 5 \text{ mm}$  оптоварен е со количество електрицитет  $Q = 0,5 \text{ nC}$ . Да се пресмета енергијата на електростатичкото поле во кондензаторот, ако:
  - а) диелектрикот е воздух;
  - б) диелектрикот е со релативна диелектрична константа  $\epsilon_r = 6$
 (Одговор: а)  $C_0 = 14,16 \text{ pF}$ ,  $W = 8,83 \text{ nJ}$ , б)  $C = 84,96 \text{ pF}$ ,  $W = 1,41 \text{ nJ}$ ).

**ЗАПОМНИ:**

1. Кулоновиот закон го одредува интензитетот на електростатичката сила  $F$ , со која заемно дејствуваат два точкести електрични полнежи е пропорционален со производот на нивните полнежи  $Q_1$  и  $Q_2$  и обратно пропорционален со квадратот на нивното меѓусебно растојание  $r$ . Силата дејствува по правецот што минува низ полнежите и има карактер на привлекување ако полнежите се разноимени и карактер на одбивање, ако полнежите се истоимени.

2. Електростатичкото поле е посебна физичка состојба на просторот околу мирните електрични полнежи и тоа дејствува со сила на други полнежи што ќе се внесат во него. Интензитетот на јачината на електричното поле  $E$  е пропорционален на полнежот  $Q$ , а обратно пропорционален на квадратот на растојанието  $r$ .

3. Електричниот потенцијалот  $V$  на една точка  $M$  во полето се дефинира како количник од работата што ја вршат силите на полето, при преместување на позитивен пробен полнеж  $Q_0$  од точката  $M$  до референтната точка  $R$  и електрицитетот на полнежот  $Q_0$ . Површини во полето чии точки имаат иста вредност за потенцијалот се наречени еквипотенцијални површини. Електричниот напон  $U$  на некоја точка  $M$  во однос на друга точка  $N$  се дефинира како разлика на потенцијалот во точката  $M$  и потенцијалот во точката  $N$ .

4. Проводници се оние материјали кои содржат голем број слободни електрични полнежи. Најважни проводници се металите: алуминиум, бакар, сребро, и др.

5. Изолаторите (диелектриците) се материјали кои не содржат слободни електрични полнежи. Идеален изолатор е вакуумот. Појавата на поместување на елементарните електрични полнежи во диелектриците под дејство на надворешно поле, се нарекува поларизација на диелектрикот. Јачината на полето при која доаѓа до електрично пробивање на диелектрикот се вика електрична цврстина и се означува со  $E_c$ .

6. Кондензаторот претставува систем од две меѓусебно изолирани проводни тела, со било каков облик и големина, електризирани со исти по износ, но спротивни по предзнак полнежи  $+Q$  и  $-Q$ . Капацитетот на кондензаторот се дефинира како количник од полнежот  $Q$  на позитивната електрода и напонот  $U$  на позитивната во однос на негативната електрода.

7. Капацитетот на еквивалентниот кондензатор со кој ги заменуваме двата паралелно поврзани кондензатори е еднаков на збирот од нивните капацитети.

8. При сервиска врска на кондензатори, реципрочната вредност од еквивалентниот капацитет е збир од реципрочните вредности на поедините капацитети.

9. Енергија на електростатичкото поле што постои меѓу електродите на кондензаторот е право пропорционална на полнежот и на напонот меѓу плочите на кондензаторот.



## 3. ЕДНОНАСОЧНИ СТРУИ

### 3.1. ПОИМ ЗА ЕЛЕКТРИЧНА СТРУЈА

Електричната струја претставува организирано, насочено движење на електрични полнежи. Електрични полнежи кои можат да се движат и да создадат електрична струја се електроните како и позитивните и негативните јони.

Во цврстите тела, посебно во металните проводници, подвижни електрични полнежи се електроните.

Од течните средини во кои може да се создаде електрична струја, посебно се значајни електролитите. Во нив подвижни слободни честички се позитивните и негативните јони.

Под одреди услови и во гасовите, кои по правило се добри изолатори, може да дојде до појава на електрична струја. Во овој случај подвижни слободни електрични полнежи пак се позитивните и негативните јони. Пример за ова се неонските и флуоресцентни светилки.

Движењето на честичките се одвива под дејство на некоја сила која може да биде од електрична и неелектрична природа. За практичната електротехника, најзначајни се струите каде движењето на честичките се одвива под дејство на електрично поле.

Временски непроменливата електрична струја е наречена постојана електрична струја или еднонасочна струја. Течењето на ваква струја е поврзано со постоење на постојано електрично поле. Одржување на постојано електрично поле може да се постигне со користење на посебни уреди наречени извори на електрична струја (електрични извори или генератори). Изворите на електричната струја или генераторите се уреди во кои некој друг вид енергија се претвора во електрична енергија.

Секој генератор има по два приклучока, кои се нарекуваат полови на генераторот. За изворите на постојана електрична струја, едниот пол е позитивно електризиран и се нарекува позитивен пол на изворот. Другиот е негативно електризиран и се нарекува негативен пол на изворот.

Електричната струја се карактеризира со две физички величини: јачина на струјата и густина на струјата.

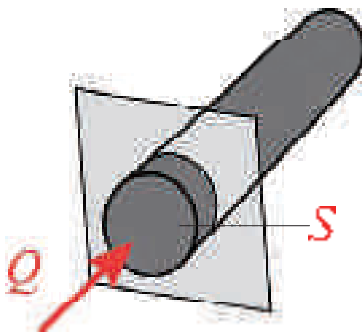
Струјата најчесто протекува низ тенки проводници со ист пресек. Ако низ некој пресек на проводникот  $S$ , за некое време  $t$  протече количество електрицитет  $Q$ , јачината на електричната струја  $I$  се дефинира како количник од полнежот  $Q$  и времето  $t$  (сл. 3.1.1):

$$I = \frac{Q}{t}. \quad (3.1.1)$$

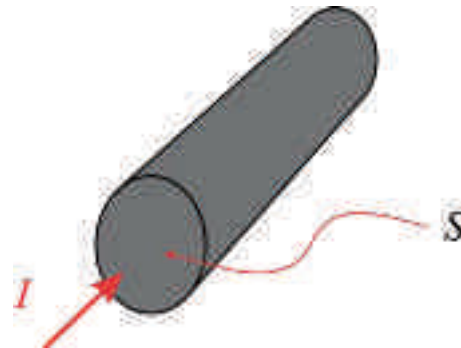
Единицата за мерење на јачина на струјата се нарекува **ампер** (А).

**Јачината на струјата** е скаларна големина на која и се припишува и одредена насока во проводникот. Како насока на електричната струја се зема насоката на движење на позитивните електричните полнежи и таа е наречена **техничка насока на струјата**. Техничката насока се поклопува со насоката на електричното поле. Неопходно е да се прави разлика меѓу техничката насока на струјата и вистинската насока на движење на полнежите. Имајќи во предвид дека електричната струја во металите ја сочинуваат електроните, произлегува дека насоката на струјата е спротивна од насоката на движење на електроните.

Понатаму под насока на струјата ќе се подразбира нејзината техничка насока.



Сл. 3.1.1. Дефинирање на јачината на електричната струја.



Сл. 3.1.2. Дефинирање на густината на електричната струја.

Во некои случаи јачината на струјата не е доволна за прецизно дефинирање на електричната струја. Ова е посебно карактеристично за случаите кога струјата тече низ масивни проводници.

За попрецизно опишување на појавите во просторот каде тече електрична струја, се користи векторска големина наречена **вектор на густината на електричната струја** и се обележува со  $J$  (сл. 3.1.2). Правецот и насоката на овој вектор се поклопува со правецот и насоката на движење на позитивно електризираните честици. Кога струјата е рамномерно распределена по површината на попречниот пресек на проводникот, **интензитетот на векторот на густината на струјата** е даден со односот:

$$J = \frac{I}{S}. \quad (3.1.2)$$

Единицата за мерење на интензитетот на векторот на густината на електричната струја е  $A/m^2$ .

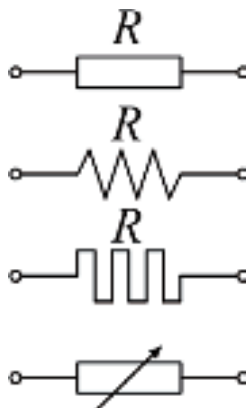
Во општ случај, струјата не е рамномерно распределена по проводникот и векторот на густината на струјата има различен интензитет во различни точки на попречниот пресек на проводникот.

Електричната струја може да постои само во затворено струјно (електрично) коло во кое е вклучен генератор. Електричното коло претставува систем од електрични извори, различни потрошувачи, како и проводници за поврзување на тие елементи.

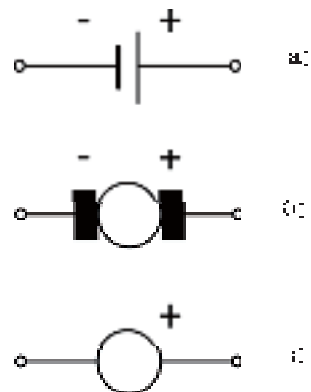
Проводникот низ кој тече електрична струја, сметан како елемент на струјното коло, се нарекува електричен отпорник. Претходно дефиниравме дека проводниците се материјали кои содржат голем број слободни електрични полнежи.

За прикажување на електричните отпорници се употребуваат симболите прикажани на сл. 3.1.3. На овој начин може да се претстави обичен отпорник, но исто така и сијалица со вжарено влакно или електрична греалка. Ако е потребно потрошувачот подетално да се објасни постојат и други симболи.

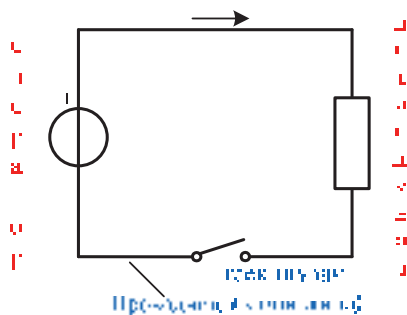
Електричните генератори, исто така се обележуваат на различни начини зависно од видот на генераторот. Електрохемиските извори и акумулаторите се обележуваат со две паралелни црти, една пократка и подебела која го означува негативниот пол, а другата подолга и потенка, која го означува позитивниот пол (сл. 3.1.4.a).



Сл. 3.1.3. Графички симболи за електричен отпорник.



Сл. 3.1.4. Графички симболи за електричен генератор.



Сл. 3.1.5. Елементарно (просто) електрично коло.

Машинските генератори се обележуваат со симболот прикажан на сл. 3.1.4.б. Во електричните кола кога не е важна природата на генераторите, се употребува симболот прикажан на сл. 3.1.4. в.

Елементарно (просто) струјно коло кое содржи електричен извор и потрошувач е претставено на сл. 3.1.5. Покрај другите елементи, во колото е прикажан и прекинувач со што колото може да се прекинува или затвора.

Прашања

1. Што претставува електричната струја?
2. Како се дефинира јачината на електричната струјата?
3. Која е единица за мерење на јачина на струја?
4. Како е избрана насоката на електричната струја и како се нарекува?
5. Како се дефинира густината на струјата?
6. Што е електричен напон?
7. Што претставува електричното коло?

Задачи

1. Колкава е јачината на електричната струја низ проводник, ако за време од  $t = 3\text{h}$  низ него поминало количество електрицитет од  $Q = 500\text{ C}$  ?

Решение: Јачината на електричната струја е:

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{500}{3 \cdot 3600} = 0,0463\text{ A} = 46,3\text{ mA}.$$

2. Во бакарна жица со кружен пресек, со радиус  $r = 1\text{ mm}$  постои постојана струја со јачина  $I = 5\text{ A}$ . Да се пресмета интензитетот на векторот на густината на струјата?

Решение: Бакарната жица има кружен пресек, па површината на попречниот пресек на проводникот е:  $S = r^2 \pi = (1 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 3,14 = 3,14\text{ mm}^2$ , а густината на струјата низ него:

$$J = \frac{I}{S} = \frac{5}{3,14 \cdot 10^{-6}} = 1,592 \cdot 10^6\text{ A/m}^2.$$

**3.2. ОМОВ ЗАКОН, ЕЛЕКТРИЧЕН ОТПОР И ПРОВODНОСТ**

Меѓу краевите на еден долг проводник со константен пресек со површина  $S$  нека постои напон  $U$ . Во проводникот ќе има поле  $E$  под чие дејство ќе се движат полнежите и ќе тече струја. Ако се зголеми напонот на краевите на проводникот, се зголемува и јачината на електричното поле. Зголемена јачина на полето, предизвикува зголемена брзина на движење на електризираните честици, а со тоа и зголемување на количеството електрицитет што се пренесува за одредено време. Јачината на струјата, според изразот (3.1.1) е пропорционална на количеството електрицитет во единица време, па значи дека и таа ќе се зголемува.

Експериментално е покажано дека кај најголем број проводници, а посебно кај металите, кога температурата им се одржува константна, струјата е пропорционална на напонот. Оваа пропорционалност може да се запише во облик:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (3.2.1)$$



Оваа равенка го претставува **Омовиот закон**. Овој закон експериментално го открил 1827 година германскиот физичар Георг Ом. Тој е еден од најрано откриените експериментални закони кои се однесуваат на постојаната електрична струја низ проводниците.

Равенката (3.2.1) може да се запише и во следните облици:

$$U = RI \text{ и } R = \frac{U}{I}. \quad (3.2.2)$$

Константата на пропорционалност  $R$  во Омовиот закон се нарекува **електричен отпор** на набљудуваниот проводник. Тоа е особина на материјалите да се спротивставуваат на течењето на електрична струја.

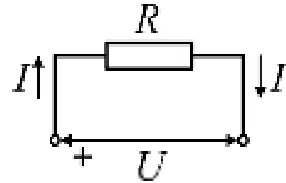
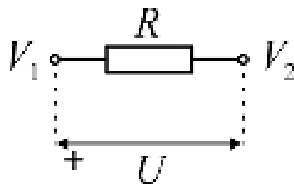
Единицата за мерење на електричниот отпор се вика **ом** и се обележува со симболот  $\Omega$ .

Често наместо отпорот  $R$ , се користи неговата реципрочна вредност. Таа величина се нарекува **електрична проводност**, се обележува со  $G$  и е дадена со:

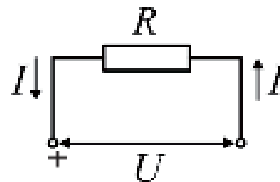
$$G = \frac{1}{R}. \quad (3.2.3)$$

Единица за електричната проводност е **сименс** (S).

Треба да се нагласи дека математичката формулација на Омовиот закон (3.2.1) е поврзана со изборот на референтни насоки на струјата и напонот (сл. 3.2.1).



а)



б)

Сл. 3.2.1. Омов закон (референтни насоки на струјата и напонот).

Електричниот напон се изразува како разлика на потенцијалите на двата краја на отпорникот:

$$U = V_1 - V_2 \quad (3.2.4)$$

Притоа се зема дека  $V_1 > V_2$ . Знакот (+) се става на крајот со повисок потенцијал. Во проводниците насоката на струјата е во насока на електричното поле, т.е. од крајот со повисок кон крајот со понизок потенцијал.

Според тоа, ако се знае насоката на струјата, тогаш се знае кој крај е на повисок потенцијал и обратно.

Според усогласени референтни насоки претставени на сл.3.2.1.а, Омовиот закон го има обликот даден со изразот (3.2.1).

Ако струјата тече во обратна насока, од точката со понизок потенцијал кон точката со повисок потенцијал (сл. 3.2.1.б), Омовиот закон ја има формата:

$$I = -\frac{U}{R}. \quad (3.2.5)$$

Ако не е позната вистинската насока на струјата, се зема произволна насока која се нарекува **референтна насока**. По извршеното пресметување со конкретни вредности на елементите во колото, ако се добие позитивна вредност за струјата, вистинската насока на струјата одговара на усвоената референтна насока. Негативен резултат значи дека овие насоки се спротивни.

### Прашања

1. Дали струјата е пропорционална на напонот, според Омовиот закон?
2. Ако напонот на краевите на еден отпорник се зголеми два пати, што ќе се случи со струјата?
3. Што е електричниот отпор и во кои единици се мери?
4. Како е дефинирана електричната проводност и во кои единици се мери?
5. При усогласени референтни насоки на напонот и струјата, дали струјата влегува во отпорникот од крајот со повисок или со понизок потенцијал?
6. Ако насоките на струјата и напонот не се усогласени, каква форма има Омовиот закон?

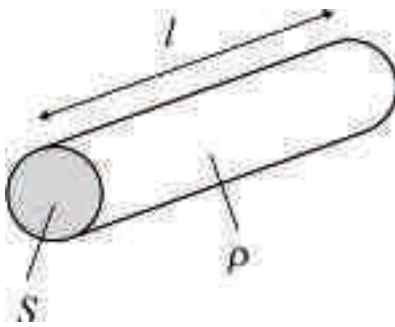
### Задачи

1. Колкава е јачината на струјата низ еден отпорник со отпор  $R = 20\Omega$ , ако напонот на неговите краеве е  $U = 20\text{ V}$ ? (Одговор:  $I = 1\text{ A}$ ).
2. Колкав е отпорот на еден отпорник низ кој тече струја од  $I = 5\text{ mA}$ , а напонот на неговите краеве е  $U = 10\text{ V}$ ? Колкава е неговата проводност? (Одговор:  $R = 2000\Omega = 2\text{ k}\Omega$ ;  $G = 0,0005\text{ S} = 0,5\text{ mS}$ ).
3. Колкав треба да биде напонот на краевите на еден отпорник со отпор  $R = 2,5\text{ k}\Omega$ , за да низ него тече струја од  $I = 10\text{ mA}$ ? ( $U = 25\text{ V}$ ).
4. Колкаво количество електрицитет ќе помине низ напречниот пресек на еден проводник за време од една минута, ако електричниот отпор на проводникот е  $R = 50\Omega$  и тој е приклучен на напон  $U = 20\text{ V}$ ? (Одговор:  $U = 28,8\text{ V}$ ).

### 3.3. СПЕЦИФИЧЕН ЕЛЕКТРИЧЕН ОТПОР И СПЕЦИФИЧНА ПРОВодНОСТ

При константна температура, отпорот на проводникот зависи од неговите димензии, обликот и материјалот од кој е направен. За жичан проводник со константен пресек и од хомоген материјал, експериментално е покажано дека отпорот е пропорционален на должината на проводникот,  $l$ , а обратно пропорционален на површината на напречниот пресек  $S$  (сл.3.3.1):

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (3.3.1)$$



Сл. 3.3.1. Дефинирање на отпорот на проводник.

Од изразот (3.3.1), за специфичниот отпор се добива:

$$\rho = R \frac{S}{l}. \quad (3.3.2)$$

Ако во равенката (3.3.2) се замени  $S=1\text{m}^2$  и  $l=1\text{m}$ , се добива  $\rho=R$ . Тоа значи дека специфичниот отпор е електричен отпор на проводник со должина од  $1\text{m}$  и површина на напречниот пресек од  $1\text{m}^2$ .

Единицата за мерење на специфичниот отпор се добива од равенката (3.3.2), со замена на единиците за отпор, површина и должина и таа е  $(\Omega\text{m})$  или  $(\Omega\text{mm}^2/\text{m})$ .

Специфичниот отпор, за проводниците како сребро, алуминиум, бакар и др. има вредности од ред на големина  $\rho \cong 10^{-8} \Omega\text{m}$ . Најмал специфичен отпор има среброт, потоа бакарот, па алуминиумот. Затоа бакарот и алуминиумот најмногу се употребуваат за изработка на електрични проводници. Среброт, заради високата цена помалку се употребува. Кај полупроводниците, специфичниот отпор за германиум е  $\rho \cong 0,45 \Omega\text{m}$  и за силициум  $\rho \cong 2500 \Omega\text{m}$ . За изолаторите, специфичниот отпор за хартија е  $\rho \cong 10^{10} \Omega\text{m}$  и за стакло  $\rho \cong 10^{11} \Omega\text{m}$ .

Специфичниот отпор, освен од материјалот, зависи и од температурата. Според тоа и електричниот отпор зависи од температурата.

Специфичниот отпор на металите по правило, расте со порастот на температурата. Ова се објаснува на следниот начин. Со пораст на температурата термичкото движење на електроните во проводниците станува поизразено, па потешко е тие да се доведат во насочено движење под дејство на електричното поле.

Зависноста на специфичниот отпор од температурата е дадена со релацијата:

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha_0 (\theta - \theta_0)], \quad (3.3.3)$$

каде  $\rho_0$  е специфичниот отпор на температура  $\theta_0$ ,  $\rho$  е специфичен отпор на температура  $\theta$ , а  $\alpha$  е температурен коефициент на материјалот од кој е направен отпорникот.

За поголем дел од металите вредноста на температурниот коефициент е околу  $0,004 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ . За некои легури на константан и манганин температурниот коефициент приближно е еднаков на нула, па нивниот специфичен отпор не се менува со температурата. Интересно е дека овој коефициент кај графитот, електролитите и полупроводниците има вредност помала од нула, што значи дека специфичниот отпор, а со тоа и отпорот се намалува со пораст на температурата.

Обично температурата  $\theta_0=20^{\circ}\text{C}$ , па претходната равенка се запишува на следниот начин:

$$\rho = \rho_{20} [1 + \alpha_0 (\theta - 20)]. \quad (3.3.4)$$

Реципрочната вредност на специфичниот отпор е специфичната проводност:

$$\gamma = \frac{1}{\rho}. \quad (3.3.5)$$

И единицата за мерење на специфична проводност претставува реципрочна вредност на единицата за мерење на специфичен електричен отпор. Таа е (S/m) или (Sm/mm<sup>2</sup>).

Од равенките (3.3.3), (3.3.1) и (3.3.5), за електрична проводност се добива следниот израз:

$$G = \gamma \frac{S}{l}. \quad (3.3.6)$$

### Прашања

1. Од што зависи отпорот на проводникот при константна температура?
2. Како ќе се промени отпорот на проводникот ако неговата должина се намали два пати?
3. Како ќе се промени отпорот на проводникот ако површината на неговиот пресек се зголеми два пати?
4. Кој проводник има поголем отпор: долг и тенок проводник или краток и дебел проводник?
5. Од што зависи специфичниот електричен отпор и во кои единици се мери?
6. Кои материјали имаат најмал специфичен отпор, а кои најголем?
7. Каква вредност има температурниот коефициент за металите и дали нивниот специфичен отпор расте со порастот на температурата?
8. Дали специфичниот отпор на графитот расте со пораст на температурата?

### Задачи

1. Одреди го електричниот отпор на проводник направен од алуминиум ( $\rho = 0,028 \Omega \text{mm}^2 / \text{m}$ ) со пресек  $S = 100 \text{mm}^2$  и должина  $l = 10 \text{km}$ .

Решение: Електричниот отпор на проводникот е:

$$R = \rho \frac{l}{S} = 0,028 \frac{10 \cdot 10^3}{100} = 2,8 \Omega .$$

2. Електричен грејач е направен од константан чиј специфичен електричен отпор изнесува  $\rho = 0,5 \Omega \text{mm}^2 / \text{m}$ . Употребена е жица со дијаметар  $d = 0,5 \text{mm}$  и должина  $l = 10 \text{m}$ . Колкав е отпорот на греачот? (Одговор:  $R = 9,95 \Omega$ ).

3. Отпорноста на еден отпорник е  $R = 30 \Omega$ . Колкава е должината на жицата направена од легура на хром и никел со специфичен електричен отпор  $\rho = 1,2 \Omega \text{mm}^2 / \text{m}$  и дијаметар на жицата  $0,2 \text{mm}$ ?

Решение: Најпрво треба да се одреди попречниот пресек на жицата:

$$S = \frac{d^2 \pi}{4} = \frac{0,2^2 \cdot 3,14}{4} = 0,0314 \text{mm}^2 .$$

Од изразот (2.3.1) за должината на жицата се добива:

$$l = \frac{RS}{\rho} = \frac{30 \cdot 0,0314}{1,2} = 0,785 \text{m} .$$

4. Спиралата на електричен грејач на собна температура има електричен отпор  $R = 70 \Omega$ . Колкав е неговиот отпор на температура од  $250^\circ \text{C}$ , ако спиралата е направена од никелин со температурен коефициент  $2 \cdot 10^{-4} 1/^\circ \text{C}$ ? (Одговор:  $R = 73,22 \Omega$ ).

5. Низ бакарен проводник со површина на напречниот пресек  $S = 0,8 \text{mm}^2$  и должина  $l = 20 \text{m}$  протекува електрична струја со јачина  $I = 4 \text{A}$ . Која е вредноста на електричниот напон на краевите на проводникот? (Одговор:  $U = 1,72 \text{V}$ ).

### 3.4. ПОВРЗУВАЊЕ НА ОТПОРНИЦИ

Во практична примена, од различни причини, отпорниците често се поврзуваат во групи на различни начини. Два основни начини на поврзување на отпорниците се **сериското (редно) и паралелно поврзување**. Овие два начини на поврзување можат и да се комбинираат (**комбинирано или мешовито поврзување**), за да се добијат различни мрежи на отпорници.

Групата на отпорници поврзани на било кој начин може да се замени со еден отпорник со еквивалентен отпор.

#### 3.4.1. Сериско поврзување на отпорници

Сериска (редна) врска на два отпорника е прикажана на сл. 3.4.1.

Редната врска на отпорниците е остварена така што крајот на првиот отпорник е поврзан за почетокот на вториот, а меѓу почетокот на првиот отпорник и крајот на вториот отпорник е приклучен напон.

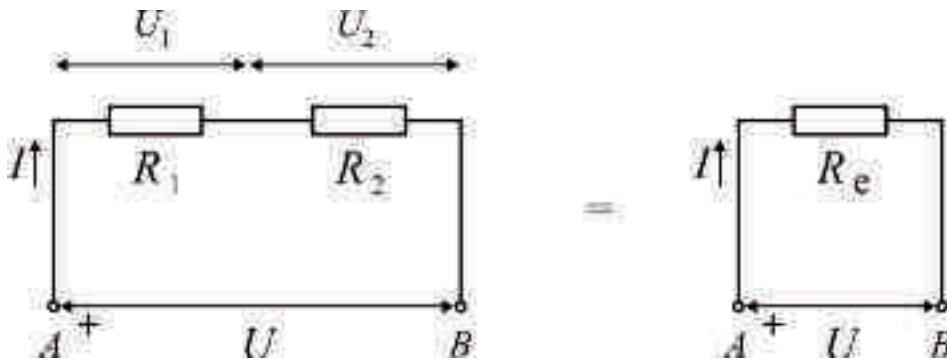
Кога вака поврзаните отпорници се дел од затворено струјно коло, јасно е дека електричната струја низ сите отпорници е иста.

Еквивалентниот отпор на два редно поврзани отпорници е еднаков на збирот на нивните отпори:

$$R_e = R_1 + R_2. \quad (3.4.1)$$

За  $n$  редно поврзани отпорници, последниот израз може да се прошири:

$$R_e = R_1 + R_2 + \dots + R_n. \quad (3.4.2)$$



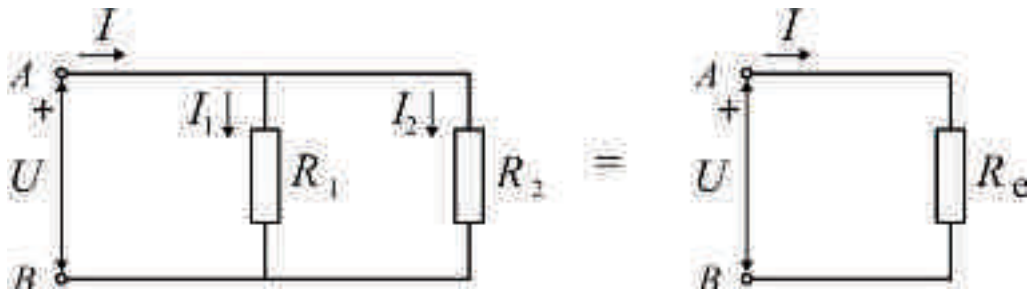
Сл. 3.4.1. Сериско поврзување на отпорници.

Еквивалентниот отпор на  $n$  редно поврзани отпорници е сума од отпори на поедините отпорници.

### 3.4.2. Паралелно поврзување на отпорници

Паралелна врска на два отпорника е прикажани на сликата 3.4.2.

Паралелната врска на отпорниците е остварена така што почетоците на двата отпорници, како и нивните краеве се споени во заеднички точки и приклучени на напон.



Сл. 3.4.2. Паралелно поврзување на отпорници.

Напонот  $U$  меѓу краевите на сите отпорници е ист, а струите низ отпорниците не се исти.

Паралелно поврзаните отпорници можат да се заменат со еден еквивалентен отпорник, кој ќе биде приклучен на истиот напон како и паралелно поврзаните отпорници. Струјата што ќе тече низ него ќе биде еднаква на струјата што е заедничка за двата отпори.

За еквивалентниот отпор на два паралелно поврзани отпорници се добива:

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \quad (3.4.3)$$

Значи, реципрочната вредност на еквивалентниот отпор е еднаква на сумата од реципрочните вредности на отпорите на двата отпорници.

Овој израз може да се запише и во следнава форма и како таков многу често се користи:

$$R_e = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (3.4.4)$$

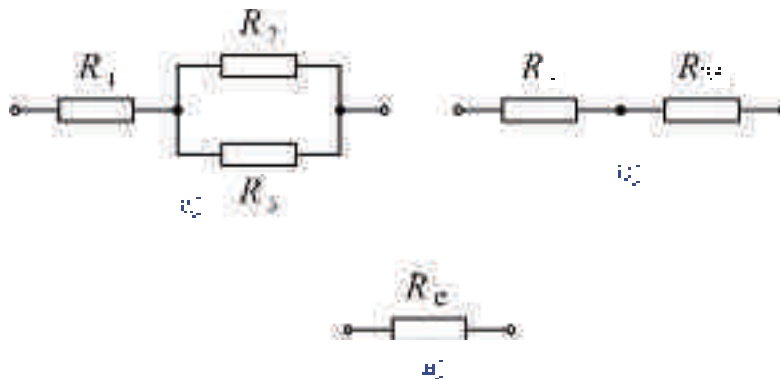
За  $n$  редно поврзани отпорници изразот (3.4.3) може да се прошири:

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}. \quad (3.4.5)$$

Реципрочната вредност на еквивалентниот отпор на паралелно поврзани отпорници е сума од реципрочните вредности на отпорите на поедините отпорниците.

### 3.4.3. Комбинирано поврзување на отпорници

Комбинираното поврзување на отпорници вклучува три и повеќе отпорници, кои можат да бидат поврзани како комбинација од редна и паралелна врска. На сликата 3.4.3.а е прикажано комбинирано поврзување на три отпорници.



Сл. 3.4.3. Комбинирано поврзување на отпорници.

Постапката за одредување на еквивалентниот отпор е следната. Најпрво ќе се одреди еквивалентниот отпор  $R_{23}$  на паралелно врсаните отпорници  $R_2$  и  $R_3$  (сл. 3.4.3.б):

$$R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}. \quad (3.4.6)$$

Потоа овој отпор ќе се собере со отпорот  $R_1$ , со кој е поврзан редно. Конечно се добива (сл. 3.4.3.в):

$$R_e = R_1 + R_{23} = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}. \quad (3.4.7)$$

### Прашања

1. Како се поврзуваат отпорниците во електрично коло?
2. Што е редна врска на отпорници и како се одредува еквивалентниот отпор на групата отпорници?
3. Колку изнесува еквивалентниот отпор на  $n$  еднакви редно поврзани отпорници со отпор  $R$ ?
4. Што е паралелна врска на отпорници и како се одредува еквивалентниот отпор на групата отпорници?
5. Колку изнесува еквивалентниот отпор на  $n$  еднакви паралелно поврзани отпорници со отпор  $R$ ?
6. Како се добива комбинирана или мешовита врска на отпорници?

### Задачи

1. Два отпорника со електрични отпори  $R_1 = 20\Omega$  и  $R_2 = 40\Omega$  поврзани се редно и приклучени на напон  $U = 120\text{V}$ . Колкава е јачината на струјата што протекува низ отпорниците и колкав е напонот врз секој од отпорниците?

Решение: Двата отпорника ги заменуваме со еден отпорник со отпор:

$$R = R_1 + R_2 = 20 + 40 = 60\Omega.$$

Струјата што тече низ отпорниците може да се одреди со Омовиот закон е:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{120}{60} = 2\text{A}.$$

Со Омовиот закон се одредуваат и напоните на секој од отпорниците:

$$U_1 = R_1 I_1 = 20 \cdot 2 = 40\text{V} \text{ и } U_2 = R_2 I_2 = 40 \cdot 2 = 80\text{V}.$$

2. Два отпорници со електрични отпори  $R_1 = 20\Omega$  и  $R_2 = 40\Omega$  поврзани се паралелно и приклучени на напон  $U = 120\text{V}$ . Колкава е еквивалентниот отпор на двата отпорника? Колкава е јачината на струјата што тече низ еквивалентниот отпорник, а колкави се јачините на струите што протекуваат низ секој од отпорниците?

Решение: Двата отпорника ги заменуваме со еден отпорник со отпор:



$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{20 \cdot 40}{20 + 40} = \frac{40}{3} \Omega.$$

Струјата низ еквивалентниот отпорник што е приклучен на напон од  $U = 120 \text{ V}$  изнесува:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{120}{40/3} = 9 \text{ A}.$$

Струите во поедините отпорници можат да се одредат со Омовиот закон имајќи во предвид дека и двата паралелно поврзани отпорници се приклучени на напон од  $U = 120 \text{ V}$ :

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{120}{20} = 6 \text{ A} \quad \text{и} \quad I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{120}{40} = 3 \text{ A}.$$

3. Шест електрични светилки се поврзани паралелно. Ако секоја од нив има електричен отпор  $R = 120 \Omega$ , колку изнесува вкупниот електричен отпор во колото? (Одговор:  $R_e = 20 \Omega$ ).

4. Два отпорници со електрични проводности  $G_1 = 1/100 \text{ S}$  и  $G_2 = 1/500 \text{ S}$  се поврзани паралелно и приклучени на електричен извор. Да се пресмета јачината на електричната струја низ првиот отпорник, ако струјата низ вториот отпорник е  $I_2 = 0,4 \text{ A}$  ! (Одговор:  $I_1 = 2 \text{ A}$ ).

5. Три отпорници со електрични отпори  $R_1 = 12 \Omega$ ,  $R_2 = 6 \Omega$  и  $R_3 = 12 \Omega$  се поврзани паралелно и приклучени на електричен извор со напон од  $U = 60 \text{ V}$ . Да се пресметаат струите низ сите отпорници како и вкупната електрична струја што колото ја зема од изворот! (Одговор:  $I_1 = 5 \text{ A}$ ,  $I_2 = 10 \text{ A}$ ,  $I_3 = 5 \text{ A}$   $I = I_1 + I_2 + I_3 = 20 \text{ A}$ .)

6. За колото дадено на сл. 3.4.3.a се познати електричните отпори на отпорниците:  $R_1 = 10 \Omega$ ,  $R_2 = 20 \Omega$  и  $R_3 = 30 \Omega$ . Групата отпорници е приклучена на напон  $U = 220 \text{ V}$ . Да се пресмета еквивалентниот отпор на колото и јачината на електричната струја што колото ја прима од изворот! (Одговор:  $R_e = 22 \Omega$  и  $I = \frac{U}{R_e} = 10 \text{ A}$ .)

### 3.5. МЕРЕЊЕ НА НЕКОИ ЕЛЕКТРИЧНИ ГОЛЕМИНИ

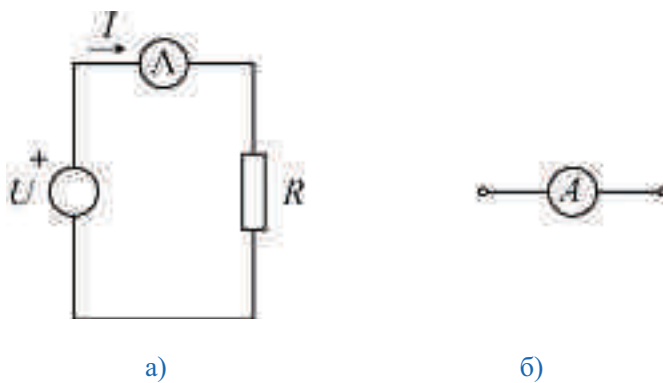
#### 3.5.1. Мерење на електрична струја

За мерење јачината на струјата се употребуваат инструменти наречени **амперметри**. Според конструкцијата и принципот на работата постојат различни видови амперметри. Независно од принципот на работа, тие имаат скала и стрелка (аналогни амперметри) или дисплеј (дигитални амперметри). Во електричните шеми амперметарот се означува со круг во кој се става буквата А (сл. 3.5.1.б).

Секој амперметар има два приклучока. Амперметарот се поврзува во струјното коло така што низ него да поминува струјата што се мери. Тоа значи дека амперметарот се поврзува во **серија** со потрошувачот во струјното коло (сл. 3.5.1.a).

Краевите на амперметарот обично се обележани со '+' и '-', а амперметарот се вклучува во колото така да техничката насока на струјата е насочена од "позитивниот" приклучок.

Амперметарот треба да биде така конструиран да со своето присуство што помалку дејствува на струјата што тече во колото пред внесувањето на амперметарот. Тоа значи дека тој треба да има мал внатрешен отпор  $R_a$ .



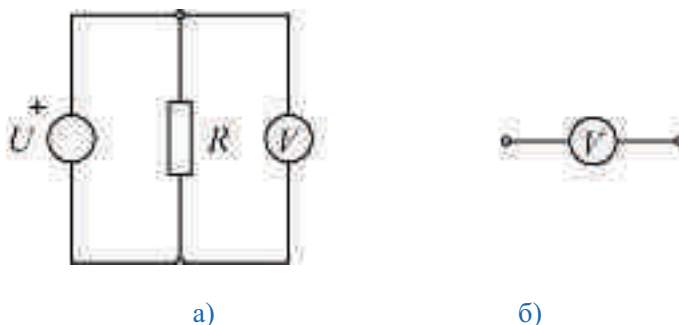
Сл. 3.5.1. Мерење на јачината на струјата со амперметар.

Во текот на мерењето мора да се внимава мерената јачина на струјата да не биде поголема од онаа што инструментот може да ја поднесе без оштетување. Обично амперметрите се наменети за мерење на различни вредности на струите (имаат повеќе мерни подрачја), па се препорачува при мерењето да се започне со поголемо мерно подрачје.

Во зависност од добиената положба на стрелката во однос на скалата, може мерното подрачје да се намали.

### 3.5.2. Мерење на електричен напон

Мерењето на електричниот напон се врши со посебни мерни инструменти наречени **волтметри**. Според конструкцијата и принципот на работа постојат различни видови волтметри. Независно од принципот на работа, тие се снабдени со скала и стрелка (аналогни волтметри) или со дисплеј (дигитални волтметри). На скалата или на дисплејот може да се отчита мерената вредност. Во електричните шеми волтметарот се означува со круг во кој се става буквата V (сл. 3.5.2.б).



Сл. 3.5.2. Мерење на напон со волтметар.

На секој волтметар има два приклучоци. Волтметарот се поврзува **паралелно** на мерениот напон (сл. 3.5.2.a).

Волтметарот има одреден електричен отпор. При негово приклучување во дадено коло, за да не влијае на точноста на мерењето, електричниот отпор  $R_V$  на волтметарот треба да биде што поголем. За идеален волтметар, кој не внесува никаква грешка во мерењето овој отпор тежи кон бесконечност.

Крајот на волтметарот означен со '+' се приклучува на точката со повисок потенцијал.

Во текот на мерењето треба да се внимава на големината на мерениот напон, која не смее да биде поголема од онаа што инструментот може да ја поднесе без оштетување. Обично волтметрите се наменети за мерење на различни вредности на напонот (имаат повеќе мерни подрачја), па се препорачува при мерењето да се започне со поголемо мерно подрачје. Во зависност од добиената положба на стрелката во однос на скалата, потоа може мерното подрачје да се намали и попрецизно да се отчита вредноста на мерениот напон.

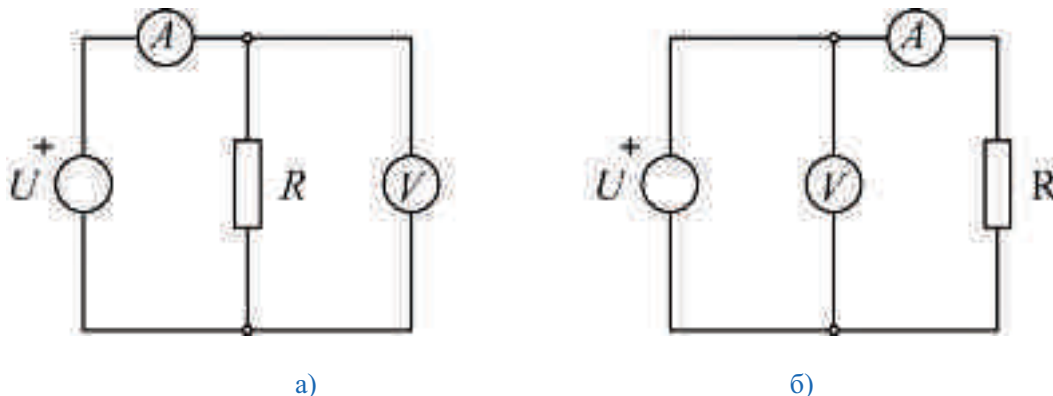
### 3.5.3. Мерење на електричен отпор

Постојат повеќе методи за мерење на отпорот.

Наједноставниот метод за мерење на отпорот е со примена на Омовиот закон, поточно со мерење на напонот на краевите на отпорникот чиј отпор треба да се одреди и струјата низ него. Ова е таканаречена  $UI$  метода. При ваквиот начин на мерење, постојат два начини на поврзување на инструментите, прикажани на сл. 3.5.3.

Под претпоставка дека инструментите се сосема точни, според шемата на сл. 3.5.3.а, волтметарот го покажува напонот на краевите на отпорникот  $R$ , а амперметарот ја покажува заедничката струја низ отпорникот и низ волтметарот. Значи при мерењето се јавува грешка која може да се корегира, ако се знае внатрешниот отпор на волтметарот  $R_V$ . Ваквиот начин на поврзување е погоден за мерење на мали отпори.

Начинот на поврзувањето прикажан на сл. 3.5.3.б, има предност при мерење на големи отпори. При овој начин на поврзување точно се мери струјата, а волтметарот го покажува збирот од напоните на отпорникот и амперметарот. Значи при мерењето се јавува грешка која може да се корегира, ако се знае внатрешниот отпор на амперметарот  $R_A$ .



Сл. 3.5.3. Мерење на електричен отпор со помош на амперметар и волтметар.

Резултатите што ќе се добијат и при едното и при другото мерење, во пракса можат да се прифатат како точни и без внесување на корекција. Грешките што се последица на

несовршеноста на инструментите ( на нивниот внатрешен отпор), можат да се занемарат. Претходно спомнавме дека волтметрите имаат обично голем отпор, па струите што течат низ нив се мали. Амперметрите обично имаат мал отпор, па напонот на нивните краеве е мал.

Постојат и инструменти за брзо и директно отчитување на отпорот, таканарачени **омметри**. Овие инструменти имаат приклучоци на кои се приклучува мерениот отпорник и отпорот се отчитува на скалата на инструментот. Инструментот содржи извор на кој се приклучува отпорникот, еден отпорник со променлив отпор и амперметар. Мерењето на отпорот се сведува на мерење на струјата.

За прецизни мерења на отпорот се употребуваат мостови. Најупотребуван и наједноставен е Вистоновит мост. За мерење на многу мали отпори се користи Томсоновиот мост.



Сл. 3.5.4. Дигитален мултиметар.

Денес, најчесто се употребуваат универзални мерни инструменти (мултиметри) кои можат да мерат и јачина на струја и напон и електричен отпор (сл. 3.5.4). Тие се изработуваат како аналогни или дигитални инструменти.

### Прашања

1. Кои инструменти се користат за мерење на електрична струја?
2. Како се поврзуваат амперметрите во електричното коло и каков е нивниот внатрешен отпор?
3. Со кои инструменти се мери електричен напон?
4. Како се поврзува волтметарот во електрично коло и каков е неговиот внатрешен отпор?
5. Како наједноставно се мери електричен отпор?
6. Кои мерни инструменти најчесто се употребуваат денес?

### Задачи

1. Пет исти електрични светилки се поврзани редно и се приклучени на извор со напон  $U = 220 \text{ V}$ . Светилките се со замаглено стакло и влакното во нив не се гледа. При работа, се прекинало влакното на една од светилките и сите светилки не светат. Како може да се одреди која од светилките е прегорена?

- а) со помош на волтметар;
- б) без мерни инструменти.

Решение: а) Волтметарот се поставува на секоја светилка. Бидејќи електричното коло е прекинато и низ него не тече електрична струја, напонот на секоја од непрекинатите светилки ќе биде нула и волтметарот нема да покаже ништо, додека на прегорената светилка ќе покаже вредност еднаква на напонот на електричниот извор.

б) Со помош на еден проводник кој се поврзува меѓу краевите на секоја светилка (премостување). Ако се премости непрекинатата светилка, колото е сеуште прекинато, бидејќи во него учествува прегорената светилка. Ако се премости прегорената светилка, таа нема да биде поврзана во колото и електричните светилки ќе светата без неа.

### 3.6. ЏУЛОВ ЗАКОН И НЕГОВА ПРИМЕНА

Еден од најважните пропратни ефекти на електрична струја е нејзиниот топлотен ефект, кој предизвикува загревање на проводниците. Овој ефект се нарекува **Џулов ефект**, според англискиот истражувач Џул. Тој правел експерименти ставајќи изолиран проводник во калориметар и го мерел ослободеното количество топлина при различни јачини на постојана струја и при други различни околности. Притоа утврдил дека ослободената топлина е пропорционална на времето и на квадратот на јачината на струјата. Коефициентот на пропорционалност зависи од геометриските димензии и од видот на проводникот кој бил вклучен во експериментот. Подоцна се утврдило дека тој коефициент е отпорот на проводникот  $R$ .

Џуловиот ефект може да се објасни и на следниот начин.

На сл. 3.6.1. е прикажано струјно коло составено од еден генератор и еден отпорник.

На краевите на отпорникот постои напон  $U$ , а во колото тече струја  $I$ . Струјата низ отпорникот тече под дејство на електричното поле  $E$  кое ги движи полнежите во насока на полето, по должината на силовите линии. За некое време  $t$ , низ отпорникот ќе помине количество електрицитет:

$$Q = I t. \quad (3.6.1)$$

За пренесување на оваа количество електрицитет, меѓу две точки во полето во кое постои напон  $U$ , силите на електричното поле ќе извршат работа:

$$A = QU = I U t. \quad (3.6.2)$$

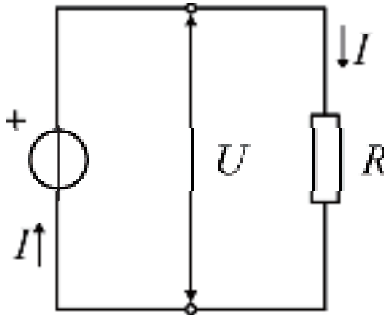
Истата струја тече и низ генераторот, но спротивно од линиите на полето  $E$ , т.е. спротивно на Кулоновата сила. За вакво движење, генераторот мора да троши некој друг вид на енергија, при што врши работа дадена повторно со изразот (3.6.2).

Работата што ја вршат силите на електричното поле во отпорникот која е дадена со изразот (3.6.2), се претвора во топлинска енергија:

$$W_t = A = I U t. \quad (3.6.3)$$

Претходниот израз, со користење на Омовиот закон може да се запише и на друг начин:

$$W_t = A = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t. \quad (3.6.4)$$



Сл. 3.6.1. Дефинирање на работа на електричната струја.

Ако изразот (3.6.3) го поделиме со времето, ќе ја добиеме моќноста, со која работата на силите на електричното поле ќе се трансформира во топлинска енергија:

$$P = \frac{A}{t} = \frac{U I t}{t} = U I. \quad (3.6.5)$$

Ако истото го примениме и на изразот (2.6.4), за моќноста ќе добиеме уште два изрази:

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R}. \quad (3.6.6)$$

Изразите (3.6.5) и (3.6.6) го претставуваат **Џуловиот закон за моќноста**.

Формулите (3.6.3), (3.6.4), (3.6.5) и (3.6.6) се напишани за усогласени референтни насоки на струјата и напонот.

Единицата за мерење на моќност е **ват (W)**. Единица за мерење на работа и енергија е **џул (J)**. Оваа единица се нарекува и **ватсекунда (Ws)**. Поголема единица која се користи во пракса е **киловатчас (kWh)**.

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}. \quad (3.6.7)$$

Топлотниот ефект на електричната струја наоѓа значајна примена во електротехниката, бидејќи на него се базира работата на многу електротехнички уреди. Меѓутоа, во случај кога претворањето на електричната енергија во топлотна не е цел, како на пр. во електричните генератори и мотори, трансформаторите и преносните проводници, развивањето на топлина се јавува како несакана и штетна пропратна појава која предизвикува дополнителни загуби.

За да се илустрира пресметувањето на потрошената електрична енергија и нејзината цена на чинење, разгледан е пример со дадени бројни вредности.

Пример: Електричен грејач е приклучен на електричен напон  $U=220V$  и низ него протекува електрична струја со јачина  $I=5A$ . Ако грејачот е вклучен секој ден по 5 часа, да се пресмета потрошената електрична енергија за еден ден и за 30 дена, како и цената на чинење, ако 1kWh чини 2,4 денари.

Решение:

Потрошената електрична енергија за еден ден е:

$$A_1 = UI t = 220 \cdot 5 \cdot 5 = 5500 \text{Wh} = 5,5 \text{kWh}, \quad (3.6.8)$$

а потрошената електрична енергија за 30 дена е:

$$A_{30} = 30 \cdot A_1 = 165 \text{kWh}. \quad (3.6.9)$$

Цената на чинење на потрошената електрична енергија за 30 дена изнесува:

$$C = A_{30} (\text{kWh}) \cdot 2,4 (\text{ден.} / \text{kWh}) = 165 (\text{kWh}) \cdot 2,4 (\text{ден.} / \text{kWh}) = 396 \text{ ден.} \quad (3.6.10)$$

### Прашања

1. Со кои изрази е даден Џуловиот закон?
2. Со кои изрази е даден Џуловиот закон за моќноста?
3. Која единица се користи за мерење на моќноста, а која за мерење на работата и енергијата?

### Задачи

1. Колкава електрична работа се троши за време од  $t = 2 \text{h}$  во светилка низ која тече струја од  $I = 0,2 \text{A}$ , приклучена на напон  $U = 220 \text{V}$ ? (Одговор:  $A = 88 \text{Wh}$ ).
2. Електричен грејач со отпор  $R = 20 \Omega$  приклучен е на извор и за време  $t = 0,5 \text{h}$  се ослободува количество на топлина  $A = 324 \text{kJ}$ . Колкава јачина на електрична струја протекува низ грејачот?

Решение:  $A = R I^2 t \Rightarrow I = \sqrt{\frac{A}{R t}} = \sqrt{\frac{32400}{20 \cdot 30 \cdot 60}} = 3 \text{A}.$

### 3.7. ЕЛЕКТРОМОТОРНА СИЛА И ВНАТРЕШЕН ОТПОР НА ГЕНЕРАТОРОТ

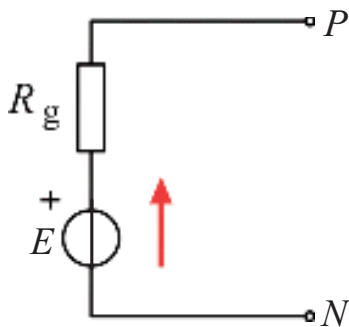
Претходно ги дефиниравме електричните генератори како **уреди во кои некој друг вид на енергија се претвора во електрична**. Тие имаат способност во својата внатрешност да ги движат електричните полнежи спротивно на силите на електричното поле. Поточно, позитивните полнежи ги придвижуваат кон крајот на генераторот со повисок потенцијал, а негативните кон крајот со понизок потенцијал. Кога генераторот е вклучен во електрично коло, во него се врши работа против силите на електрично поле, при што некои други видови на енергија или работа се претвораат во енергија на електрично поле. Таа со помош на полето се пренесува во другите делови на струјното коло и се претвора

во други видови на енергија или работа. Сите електрични извори имаат и некој внатрешен отпор, што значи дека ќе се развие одредена топлина во генераторот.

Еден реален генератор може да се прикаже како редна врска на два елемента. Едниот елемент е идеален генератор без никаков отпор, а другиот е отпорник чиј отпор е еднаков на внатрешниот отпор на генераторот  $R_g$  (сл. 3.7.1). Идеалниот генератор меѓу своите краеве дава константен напон кој е еднаков на електромоторна сила  $E$ . Електромоторна сила често се запишува со кратенката емс (ЕМС). Ваквите генератори се нарекуваат напонски генератори.

Електромоторната сила е еднаква на напонот меѓу половите на реален генератор кога низ него не тече струја. Тогаш напонот на внатрешниот отпор е еднаков на нула според Омовиот закон. Електромоторната сила на генераторот е скаларна големина, но има насока од негативниот кон позитивниот пол на генераторот (црвена стрелка на сл. 3.7.1).

Единицата за мерење на емс е иста со единицата за мерење на напон (V).



Ако генераторот е поврзан во електрично коло, низ него тече струја. Ако струјата тече во насока на емс  $E$  (од негативниот кон позитивниот пол), за некое време  $t$  низ изворот ќе протече полнеж  $Q = It$ . Овој полнеж го пренесуваат низ генератор неелектричните сили кои дејствуваат во него.

Сл. 3.7.1. Реален генератор.

Работата што ја вршат неелектричните сили во генераторот е:

$$A = QE = EIt. \quad (3.7.1)$$

Моќноста на генераторот се добива кога работата ќе се подели со времето  $t$ :

$$P = \frac{A}{t} = \frac{EIt}{t} = EI. \quad (3.7.2)$$

Моќноста е резултат на работата што ја вршат неелектричните сили. Со електромоторната сила е одредена моќноста што се внесува во колото под дејство на неелектричните сили.

Ако струјата во генераторот тече во обратна насока од емс (од позитивниот кон негативниот пол), тогаш врз генераторот се врши работа и тој работи како потрошувач (полнење на акумулатор). Тогаш моќноста на генераторот е дадена со изразот:

$$P = -EI. \quad (3.7.3)$$

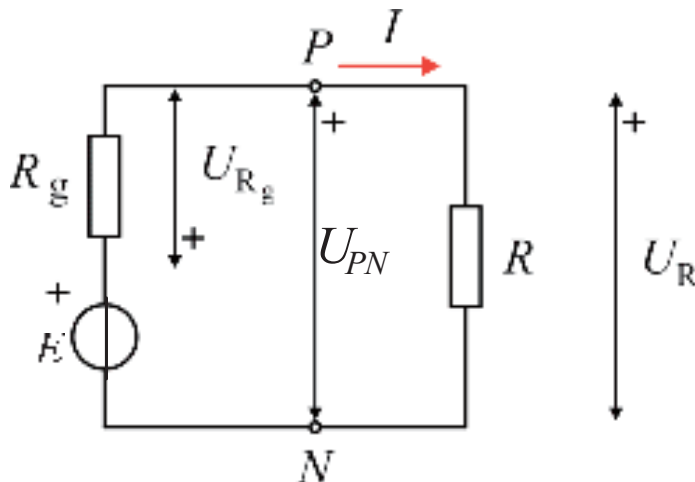


## Прашања

1. Напонскиот генератор може да се претстави како редна врска на два елементи. Кои се тие елементи?
2. Каква насока има електромоторната сила?
3. Која е единицата за мерење на електромоторна сила?
4. Како може да се одреди моќноста на генераторот при усогласени референтни насоки на напонот и струјата, а како при неусогласени?

## 3.8. СТРУЈНО КОЛО СОСТАВЕНО ОД ЕДЕН ИЗВОР И ЕДЕН ОТПОРНИК

Просто струјно коло кое се состои од генератор со емс  $E$  и внатрешен отпор  $R_g$  и еден отпорник со отпор  $R$  претставено е на сл. 3.8.1. Решавањето на едно вакво коло, а и решавањето на едно електрично коло воопшто, во основа значи одредување на напоните и струите низ сите елементи во колото.



Основната равенка на едно вакво коло за одредување на јачината на струјата во него се добива со помош на претворањето на енергијата во колото. Електричната моќност што ја дава генераторот (емс и струјата низ генераторот се во иста насока) се троши како Џулова топлина и тоа еден дел во самиот генератор (во отпорникот  $R_g$ ), а другиот во потрошувачот (отпорникот со отпор  $R$ ):

Сл. 3.8.1. Струјно коло составено од еден извор и еден отпорник .

$$EI = I^2 R_g + I^2 R \quad (3.8.1)$$

Претходната равенка се дели со струјата и се добива:

$$E = IR_g + IR, \quad (3.8.2)$$

откаде за струјата се добива:

$$I = \frac{E}{R_g + R}. \quad (3.8.3)$$

Оваа равенка често се нарекува Омов закон за просто струјно коло.

За целосно решавање на колото треба да се одредат и напонот на отпорникот со отпор  $R$  и напонот на внатрешниот отпор на генераторот. За нив се добива, според Омовиот закон:

$$U_R = IR \quad (3.8.4)$$

и

$$U_{Rg} = IR_g. \quad (3.8.5)$$

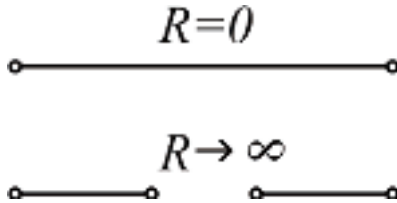
Напонот меѓу позитивниот и негативниот пол на реалниот генератор ќе се добие од равенката (3.8.2), во која ќе ги замениме равенките (3.8.4) и (3.8.5):

$$E = IR_g + IR = U_{Rg} + U_R. \quad (3.8.6)$$

За напонот меѓу позитивниот и негативниот пол на генераторот се добива:

$$U_{PN} = U_R = E - U_{Rg} = E - IR_g. \quad (3.8.7)$$

Горните равенки се напишани за усогласени референтни насоки на струјата и напоните.



Сл. 3.8.2. Куса врска и празен од во просто електрично коло.

Случајот кога во колото претставено на сл. 3.8.1. отпорот на отпорникот е еднаков на нула, се нарекува куса врска (сл. 3.8.2) и се карактеризира со следните релации:

$$R = 0, \quad I = \frac{E}{R_g}, \quad U_{PN} = U_R = IR = 0. \quad (3.8.8)$$

Случајот кога во колото претставено на сл. 3.8.1. отпорникот е исклучен и краевите каде што бил врзан се оставени отворени ( $R \rightarrow \infty$ ), се нарекува празен од (сл. 3.8.2) и се карактеризира со следните равенки:

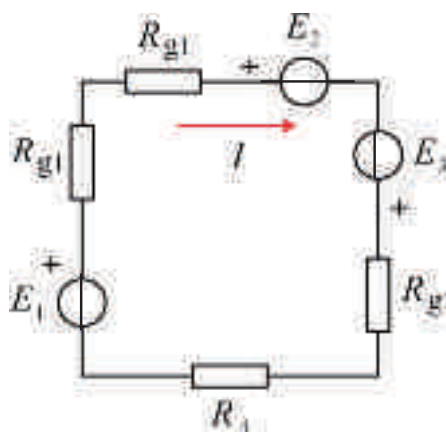
$$R \rightarrow \infty, \quad I = 0, \quad U_{PN} = E. \quad (3.8.9)$$

### Прашања

1. Како може да се одреди струјата во колото на сл. 3.8.1. и како се нарекува таа равенка?

### 3.9. ПРОСТО СТРУЈНО КОЛО СОСТАВЕНО ОД ПОВЕЌЕ ИЗВОРИ И ОТПОРНИЦИ

Просто струјно коло кое се состои од повеќе генератори со различни емс и внатрешни отпори и повеќе отпорници со различни отпори е претставено на сл. 3.9.1. Решавањето на едно вакво коло е поврзано со одредување на струјата во колото.



Електричната моќност во колото ја даваат генераторите чии емс имаат иста насока со струјата. Потрошувачи во колото се отпорниците и оние генератори чии емс имаат обратна насока од струјата. Ова може да се запише со следната равенка:

$$E_1 I + E_3 I = I^2 R_{g1} + I^2 R_{g2} + I^2 R_{g3} + I^2 R_4 + E_2 I. \quad (3.9.1)$$

Ако горната равенка се подели со струјата  $I$ , ќе се добие:

$$E_1 + E_3 = IR_{g1} + IR_{g2} + IR_{g3} + IR_4 + E_2. \quad (3.9.2)$$

Сл. 3.9.1. Струјно коло составено од повеќе генератори и отпорници.

Решавајќи ја равенката (3.9.2) по струјата, се добива:

$$I = \frac{E_1 - E_2 + E_3}{R_{g1} + R_{g2} + R_{g3} + R_4}. \quad (3.9.3)$$

Изразот (3.9.3) може да се запише и во скратена форма:

$$I = \frac{\sum E}{\sum R}. \quad (3.9.4)$$

Симболот  $\sum$ , кој е употребен во претходната равенка е вообичаена ознака во математиката со која скратено се обележува алгебарски збир. Изразот (3.9.4) се нарекува **воопштен Омов закон за просто струјно коло**.

При пишувањето на равенката (3.9.4) важи следното правило: **Во алгебарскиот збир на емс, оние кои имаат иста насока со струјата се земаат со позитивен предзнак, а оние кои имаат обратна насока се земаат негативен предзнак.**

Треба да напоменеме дека ако не е позната насоката на струјата во колото избираме произволна (референтна) насока, па според добиениот резултат, утврдуваме дали таа е вистинска насока на струјата или не.

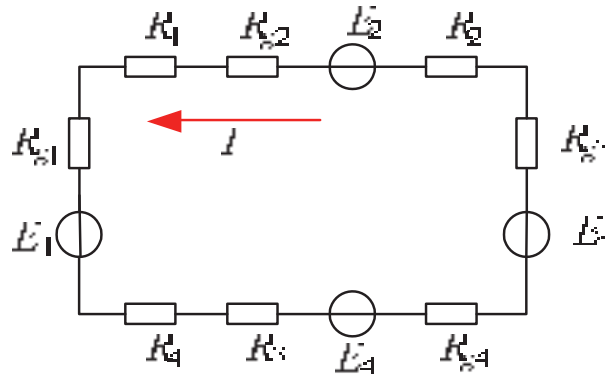
Колото ќе биде комплетно решено ако се одредени и напоните на краевите на елементите според Омовиот закон.

### Прашања

1. Како може да се одреди струјата во колото на сл. 3.9.1 ?
2. Кое правило важи за алгебарскиот збир на електромоторните сили при пишување на равенката (3.9.4)?

Задачи

1. Да се пресмета јачината на струјата во колото на сл. 3.9.2. Познато е:  
 $E_1 = 10\text{ V}$ ,  $E_2 = 20\text{ V}$ ,  
 $E_3 = 30\text{ V}$ ,  $E_4 = 40\text{ V}$ ,  
 $R_{g1} = R_{g2} = R_{g3} = R_{g4} = 1\Omega$   
 $R_1 = 4\Omega$ ,  $R_2 = 2\Omega$ ,  
 $R_3 = 7\Omega$ ,  $R_4 = 3\Omega$ .



Сл. 3.9.2.

Решение: За струјата во колото, според изразот (3.9.4) се добива:

$$I = \frac{\sum E}{\sum R} = \frac{-E_1 + E_2 - E_3 + E_4}{R_{g1} + R_1 + R_{g2} + R_2 + R_{g3} + R_3 + R_4} = 1\text{ A}.$$

2. На акумулатор со електромоторна сила  $E = 2,1\text{ V}$  и внатрешен отпор  $R_g = 0,02\Omega$ , приклучен е надворешен отпорник со отпор  $R = 0,68\Omega$ . Пресметај ја јачината на електричната струја во колото и електричниот напон на надворешниот отпорник! (Одговор:  $I = 3\text{ A}$ ,  $U = 2,04\text{ V}$ ).

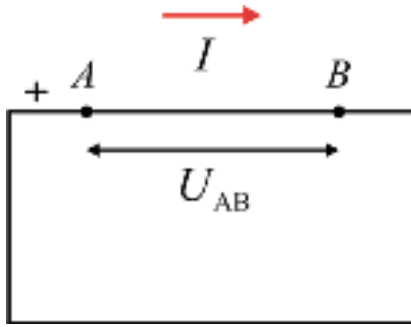
3. Во електрично коло е вклучен потрошувач со електричен отпор  $R = 430\Omega$ , низ кој тече електрична струја со јачина  $I = 0,5\text{ A}$ . Да се пресмета електромоторната сила на изворот, ако неговата внатрешен отпор е  $R_g = 10\Omega$ . (Одговор:  $E = 220\text{ V}$ ).

4. На приклучоците на неоптоварен електричен извор измерен е напон од  $E = 10\text{ V}$ . Ако изворот се оптовари со потрошувач со електричен отпор  $R = 10\Omega$ , напонот на приклучоците на изворот ќе падне на  $U = 8\text{ V}$ . Колкав е внатрешниот отпор на изворот? (Одговор:  $R_g = 2,5\Omega$ ).

5. Една батериска ќелија има електромоторна сила  $E = 1,2\text{ V}$  и внатрешен отпор  $R_g = 0,2\Omega$ . Колкав е електричниот отпор на надворешното коло, ако низ него тече електрична струја со јачина  $I = 1\text{ A}$ ? (Одговор:  $R = 1\Omega$ ).

**3.10. НАПОН МЕЃУ ДВЕ ТОЧКИ ВО СТРУЈНО КОЛО**

Напонот меѓу точките  $A$  и  $B$  во едно електрично коло претставено на сл. 3.10.1 може да се одреди според следното правило:



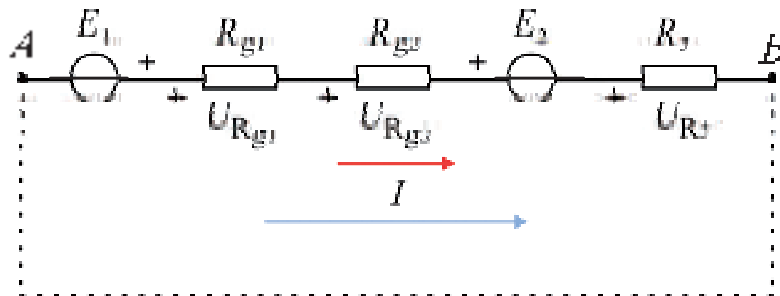
Сл. 3.10.1. Одредување напон меѓу две точки.

Напонот  $U_{AB}$  на точката  $A$  во однос на точката  $B$  ќе биде еднаков на алгебарската сума на сите емс и напони врз отпорниците меѓу точките  $A$  и  $B$ , при што со позитивен предзнак се земаат оние чиј позитивен пол се наоѓа кон точката  $A$ .

За примерот на сл. 3.10.1, при одредување на напонот  $U_{AB}$ , сумирањето на напоните се прави во насока од точката  $A$  кон точката  $B$  и притоа се сумираат сите емс и сите напони врз отпорите меѓу тие две точки.

Емс  $E_1$  има позитивен пол кон  $B$ , па во сумата ќе биде земена со знак  $(-)$ , а емс  $E_2$  има позитивен пол кон  $A$ , па во сумата ќе биде земена со знак  $(+)$ . Напоните врз отпорите  $U_{R_{g1}}$ ,  $U_{R_{g2}}$  и  $U_{R_3}$ , според насоката на струјата, имаат позитивни полови кон  $A$ , па ќе бидат земени со предзнак  $(+)$ . Според ова, се добива следната равенка:

$$U_{AB} = -E_1 + E_2 + U_{R_{g1}} + U_{R_{g2}} + U_{R_3} = -E_1 + E_2 + IR_{g1} + IR_{g2} + IR_3. \quad (3.10.1)$$



Сл.3.10.2. Одредување напон меѓу точките  $A$  и  $B$ .

Последната равенка може да се запише и вака:

$$U_{AB} = \sum RI - (E_1 - E_2). \quad (3.10.2)$$

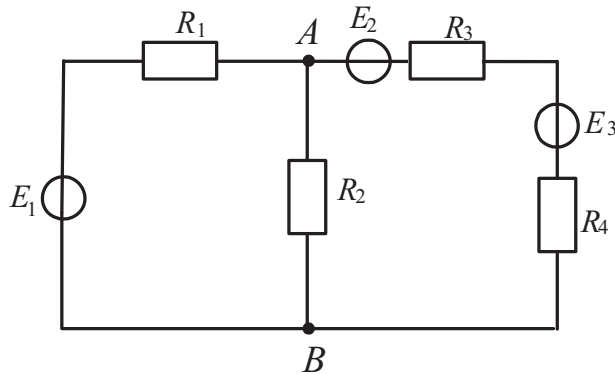
Во општ случај за одредување на напон меѓу точките  $A$  и  $B$ , се добива следната равенка:

$$U_{AB} = \sum_A^B RI - \sum_A^B E. \quad (3.10.3)$$

Според равенката (3.10.3) при одредување на напонот  $U_{AB}$ , сумирањето на напоните се прави во насока од точката  $A$  кон точката  $B$  и струите и емс чии насоки се поклопуваат со насоката на движење се земаат со позитивен предзнак и обратно.

### 3.11. СЛОЖЕНО ЕЛЕКТРИЧНО КОЛО

Сложени врски на електрични генератори и отпорници се нарекуваат електрични мрежи или сложени електрични кола. Едно такво коло е прикажано на сл. 3.11.1.



Јазол во сложеното електрично коло е точка во која се поврзани три или повеќе проводници. Јазлите во колото се обележуваат со големи букви од латиницата. На сликата 3.11.1 се означени јазлите  $A$  и  $B$ .

Сл. 3.11.1. Сложено електрично коло.

Гранка на електричното коло претставува еден или повеќе елементи поврзани во серија помеѓу два јазли. Низ сите елементи во гранката тече иста струја. Колото дадено на сликата 3.11.1 има три гранки и сите три гранки се меѓу јазлите  $A$  и  $B$ .

Контура во електричното коло е затворен пат кој се состои од повеќе гранки на сложеното електрично коло. Насоката по која се движиме по должината на контурата, а која може да се избере произволно, се нарекува позитивна насока на обиколување по контурата.

Независна контура е онаа контура што има барем една гранка што ѝ припаѓа само нејзе.

#### Прашања

1. Која точка се нарекува јазол во сложено електрично коло?
2. Што е гранка на електричното коло?
3. Што претставува контура во сложено електрично коло?
4. Колку контури има на сл. 3.11.1? Одреди ги!
5. Која контура е независна контура?

### 3.12. ПРВ И ВТОР КИРХОФОВ ЗАКОН

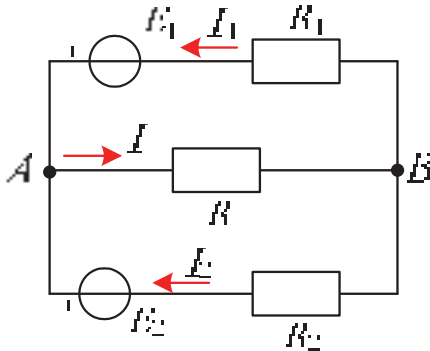
Првиот Кирхофов закон (I Кирхофов закон) се однесува на струите во гранките поврзани во еден јазол и гласи:

Алгебарскиот збир на јачините на струите во било кој јазол на електричното коло е еднаков на нула. По договор, струите кои излегуваат од јазолот се земаат со позитивен знак, а тие што влегуваат во јазолот со негативен знак.

Првиот Кирхофов закон може да се запише на следниот начин:

$$\sum I = 0. \quad (3.12.1)$$

Тој се употребува за одредување на една непозната струја во еден јазол, ако се познати јачините на струите во другите гранки поврзани со тој јазол.



Сл. 3.12.2. Одредување на непозната струја со прв Кирхофов закон.

Ако насоката на непозната струја е исто така непозната, се претпоставува референтна насока за неа. Ако по извршеното пресметување се добие позитивен резултат, тоа е потврда дека вистинската насока се поклопува со референтната. Ако се добие негативна вредност, вистинската насока е обратна од референтната насока.

Вториот Кирхофов закон се применува на контура и тој ги поврзува сите електромоторни сили и напоните на отпорите во една контура.

Вториот Кирхофов закон гласи:

По должината на било која затворена патека (контура) во електрично коло, алгебарскиот збир на сите електромоторни сили на генераторите е еднаков на алгебарскиот збир на сите напони врз отпорниците во таа контура.

Притоа електромоторните сили се земаат со позитивен знак, ако нивната насока се поклопува со позитивната насока на обиколување по контурата, а со негативен ако нивната насока е спротивна од насоката на обиколување по контурата. Напоните врз отпорниците се земаат со позитивен знак ако струите низ нив се поклопуваат со позитивната насока на обиколување по контурата, а со негативен знак, ако струите низ нив се во обратна насока од позитивната насока на обиколување по контурата.

Вториот Кирхофов закон може да се запише со следниот израз:

$$\sum E = \sum RI. \quad (3.12.4)$$

Примената на вториот Кирхофов закон ќе ја илустрираме со еден пример прикажан на сл. 3.12.3. Се претпоставува позитивна насока на обиколување по контурата, означена на сликата со црвена стрелка. За контурата, според равенката (3.12.4) се пишува следното: на левата страна на равенката треба да се напише збирот на емс на сите генератори во контурата, односно генераторот со емс  $E_1$  чија насока се совпаѓа со насоката на

Примената на првиот Кирхофов закон ќе ја илустрираме со еден пример прикажан на сл. 3.12.2. Јачините на струите  $I_1$  и  $I_2$  нека се познати, а јачината на струјата  $I$  непозната. Таа може да се одреди ако се напише првиот Кирхофов закон за јазелот  $A$ :

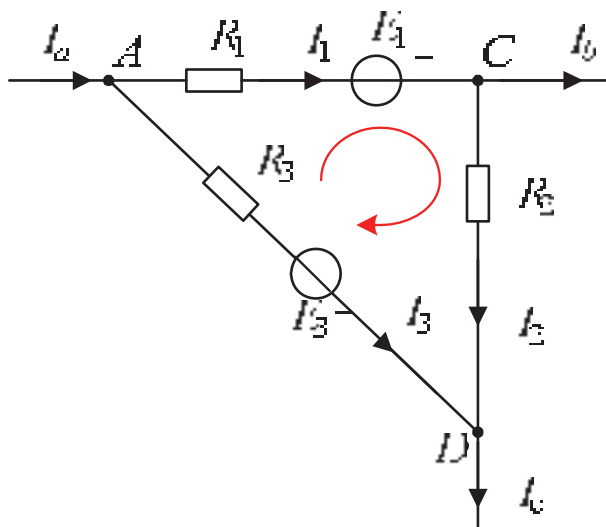
$$-I_1 - I_2 + I = 0. \quad (3.12.2)$$

Со решавање на последната равенка, се добива непознатата струја  $I$ :

$$I = I_1 + I_2. \quad (3.12.3)$$

обиколување по контурата, во алгебарскиот збир се зема со позитивен знак. Електромоторната сила на другиот генератор  $E_2$  во контурата има спротивна насока од насоката на обиколување по контурата, па во алгебарскиот збир се зема со негативен знак.

Според на равенката (3.12.4), десната страна го содржи збирот на сите напони врз отпорниците во контурата. Струјата  $I_1$  има иста насока со насоката на обиколување по контурата, па напонот врз отпорникот  $R_1$  во збирот се зема со позитивен знак. Истото важи и за напонот врз отпорникот  $R_2$ , бидејќи струјата  $I_2$  има иста насока со насоката на обиколување. Струјата  $I_3$  има спротивна насока од насоката на обиколување, па напонот врз отпорникот  $R_3$  ќе го земеме во сумата со негативен знак.



Според горното објаснување, вториот Кирхофов закон за контурата на сл.3.12.3. е даден со изразот:

$$E_1 - E_3 = R_1 I_1 + R_2 I_2 - R_3 I_3. \quad (3.12.5)$$

Со помош на вториот Кирхофов закон може да се одреди струјата во некоја гранка од контурата ако се познати сите електромоторни сили, отпорите на сите отпорници, како и струите во другите гранки на контурата. Ова може да се види од претходниот пример, ако се изберат бројни вредности за електромоторните сили, за отпорите и за струите  $I_2$  и  $I_3$ , а струјата  $I_1$  се смета за непозната.

### Сл. 3.12.3. Примена на втор Кирхофов закон.

Нека се избрани следните бројни вредности:

$$E_1 = 20\text{V} \quad E_3 = 50\text{V} \quad R_1 = 40\Omega \quad R_2 = 20\Omega \quad R_3 = 10\Omega \quad I_2 = 0,5\text{A} \quad I_3 = 1,2\text{A}.$$

Од равенката (3.12.5), за непознатата струја  $I_1$  се добива:

$$I_1 = \frac{E_1 - E_3 - R_2 I_2 + R_3 I_3}{R_1} = \frac{20 - 50 - 20 \cdot 0,5 + 10 \cdot 1,2}{40} = -\frac{28}{40} = -0,7\text{A}. \quad (3.12.6)$$

Добиената вредност за струјата е негативна, што значи дека нејзината вистинска насока е спротивна од референтната (претпоставената) на сликата (3.12.3).

### Прашања

1. Како гласи првиот Кирхофов закон?
2. На што се применува вториот Кирхофов закон?
3. Како гласи вториот Кирхофов закон?



### 3.13. ПРИМЕНА НА ПРВИОТ И ВТОРИОТ КИРХОФОВ ЗАКОН ЗА РЕШАВАЊЕ НА СЛОЖЕНИ ЕЛЕКТРИЧНИ КОЛА

Под решавање на сложено електрично коло се подразбира одредување на сите струи во гранките по јачина и насока, ако се познати сите електромоторни сили на генераторите и сите отпори на отпорниците.

Првиот и вториот Кирхофов закон заедно овозможуваат решавање на сложено електрично коло.

Секое електрично коло има одреден број на јазли  $n_j$  и гранки  $n_g$ . Бидејќи, најчесто непознати се струите во гранките, бројот на непознати кој треба да се одреди е  $n_g$ . Овие непознати се одредуваат така што се поставуваат вкупно  $n_g$  равенки, според првиот и вториот Кирхофов закон.

Бројот на независни равенки што може да се напише по првиот Кирхофов закон е еднаков на  $n_j - 1$ . Имено, ако се формираат равенки по првиот Кирхофов закон за сите  $n_j$  јазли, равенката за еден јазол секогаш произлегува од равенките на другите јазли и може да се добие како збир од равенките на останатите  $n_j - 1$  јазли.

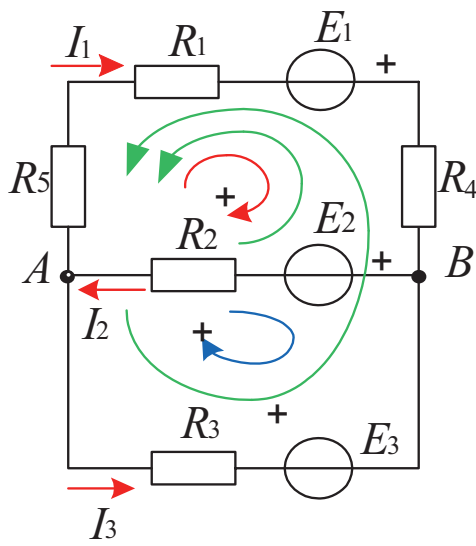
Бидејќи вкупниот број на непознати е  $n_g$ , бројот на равенки што треба да се напише по вториот Кирхофов закон се добива, кога од вкупниот број на гранките се извади бројот на равенките напишан според првиот Кирхофов закон.

Тој број е  $n_k = n_g - (n_j - 1) = n_g - n_j + 1$ . Овој број одговара на бројот на независните контури во колото. Значи, ако се избрани  $n_k$  независни контури, тогаш и равенките што ќе се напишат за нив по вториот Кирхофов закон ќе бидат меѓусебно независни. За потсетување, ќе спомнеме дека независни контури се оние кои содржат барем една гранка што им припаѓа само нив.

Редоследот на постапката за решавање на едно сложено електрично коло со примена на првиот и вториот Кирхофов закон ќе ја објасниме на примерот прикажан на сликата 2.13.1. Дадени податоци за колото се:

$$R_1 = 10\Omega, R_2 = 20\Omega, R_3 = 30\Omega, R_4 = 40\Omega, R_5 = 50\Omega, E_1 = 40V, E_2 = 20V, E_3 = 30V$$

Бројот на јазлите во даденото коло е два и тие се обележани како  $A$  и  $B$ . Колото има три гранки. Првата гранка е меѓу јазлите  $A$  и  $B$  и ги содржи отпорниците со отпори  $R_1$ ,  $R_4$  и  $R_5$  и генератор со емс  $E_1$ . Втората гранка е меѓу истите јазли и содржи генератор со емс  $E_2$  и отпорник со отпор  $R_2$ . Третата гранка е исто така меѓу јазлите  $A$  и  $B$  и содржи генератор со емс  $E_3$  и отпорник со отпор  $R_3$ . Колото има три непознати струи. Насоките на струите се претпоставени и означени на сл. 3.13.1.



Сл. 3.13.1. Примена на првиот и вториот Кирхофов закон.

Заедничка за двете контури е гранката со генератор со емс  $E_2$  и отпорник со отпор  $R_2$ . Првата контура е независна, бидејќи само нејзе и припаѓа гранката што ги содржи отпорниците со отпори  $R_1$ ,  $R_4$  и  $R_5$  и генератор со емс  $E_1$ . Втората е независна бидејќи само нејзе и припаѓа гранката со генераторот со емс  $E_3$  и отпорникот со отпор  $R_3$ .

За првата контура според вториот Кирхофов закон, во согласност со позитивната насока на обиколување ја пишуваме равенката:

$$E_1 - E_2 = I_1(R_1 + R_4 + R_5) + I_2 R_2. \quad (3.13.2)$$

За втората контура според вториот Кирхофов закон, во согласност со позитивната насока на обиколување ја пишуваме равенката:

$$E_2 + E_3 = -I_3 R_3 - I_2 R_2. \quad (3.13.3)$$

Овие две равенки, заедно со равенката напишана по првиот Кирхофов закон (3.13.1) се решаваат како систем од равенки и нивното решение ги дава непознатите јачини на струите.

Со замена на бројните вредности во овие равенки се добива:

$$I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

$$40 - 20 = I_1(10 + 40 + 50) + I_2 20$$

$$20 + 30 = -I_3 30 - I_2 20.$$

Со средување, горните равенки ја добива формата:

Според првиот Кирхофов закон може да се напише една равенка, бидејќи  $n_j - 1 = 2 - 1 = 1$ .

Тоа ќе биде равенка за едниот од јазлите, на пример јазелот А:

$$I_1 - I_2 + I_3 = 0 \quad (3.13.1)$$

Според вториот Кирхофов закон може да се напишат две равенки, бидејќи  $n_k = n_g - n_j + 1 = 3 - 2 + 1 = 2$ .

Потребно е да се одберат две независни контури. Тие се означени на сликата со избраните произволни насоки на обиколување и тоа кај првата со црвена линија со стрелка, а кај втората со сина линија со стрелка.

$$I_1 - I_2 + I_3 = 0$$

$$20 = 100I_1 + 20I_2$$

$$50 = -30I_3 - 20I_2.$$

На крајот со решавање на горниот систем на равенки со три непознати величини, за јачините на непознатите струи се добива:

$$I_1 = 0,36\text{A}; \quad I_2 = -0,78\text{A}; \quad I_3 = -1,14\text{A}.$$

За струјата  $I_1$  се доби позитивна вредност, што значи дека нејзината насока правилно е претпоставена. За другите две струи се добива негативна вредност, што значи дека нивните вистински насоки се спротивни од претпоставените.

За колото прикажано на сл. 3.13.1. независните контури можат да се изберат и на друг начин. Со линии во зелена боја кои завршуваат со стрелки на сликата се означени позитивните насоки на обиколување по тие независни контури.

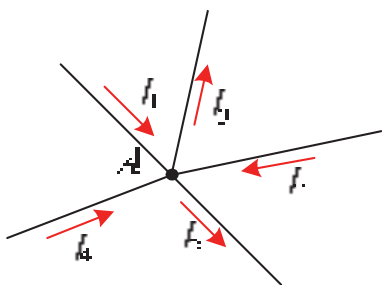
Изборот на независните контури не влијае на добиениот резултат за непознатите струи.

### Прашања

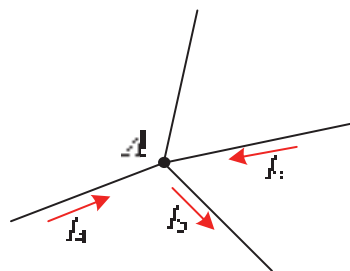
1. Колкав е бројот на непознати струи во сложено електрично коло?
2. Колку независни равенки можат да се напишат по првиот Кирхфов закон, а колку по вториот за решавање на едно сложено електрично коло?
3. Дали независните контури можат да се изберат само на еден начин?

### Задачи

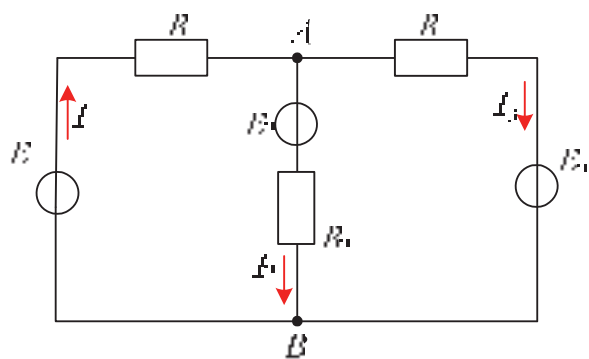
1. Да се одреди непознатата струја  $I_1$  во јазелот претставен на сликата 3.13.2.? Дадено е:  $I_2 = 0,2\text{A}$ ,  $I_3 = 0,5\text{A}$ ,  $I_4 = 0,8\text{A}$ ,  $I_5 = 1,5\text{A}$ . (Одговор:  $I_1 = 1\text{A}$ ).
2. Да се одреди непознатата струја по јачина и насока за јазелот претставен на сликата 3.13.3.? Дадено е:  $I_2 = 0,5\text{A}$ ,  $I_4 = 0,8\text{A}$ ,  $I_5 = 1,8\text{A}$ . (Одговор:  $I_1 = 0,5\text{A}$ , насочена е кон јазелот).
3. За колото прикажано на сликата сл. 3.13.4 познато е:  $E_1 = 2\text{V}$ ,  $E_2 = 20\text{V}$ ,  $R_1 = 10\Omega$ ,  $R_2 = 5\Omega$ . Со примена на првиот и вториот Кирхофов закон, да се одредат јачините на струите во сите гранки. (Одговор:  $I_1 = 0,75\text{A}$ ,  $I_2 = 0,25\text{A}$ ,  $I_3 = 0,5\text{A}$ ).
4. За колото прикажано на сликата сл. 3.13.5 познато е:  $E_1 = 20\text{V}$ ,  $E_2 = 6\text{V}$ ,  $R_1 = 300\Omega$ ,  $R_2 = 700\Omega$  и  $R_3 = 400\Omega$ . Со примена на првиот и вториот Кирхофов закон, да се одредат јачините на струите во сите гранки. (Одговор:  $I_1 = 33\text{mA}$ ,  $I_2 = -8\text{mA}$ ,  $I_3 = 25\text{mA}$ ).



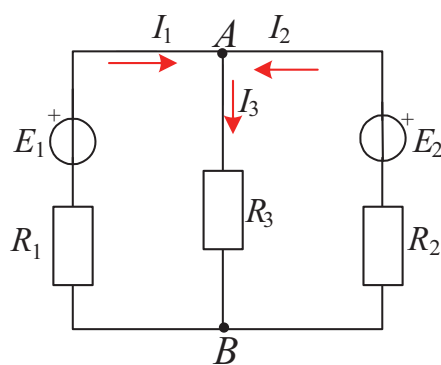
Сл. 3.13.2



Сл. 3.13.3



Сл. 3.13.4



Сл. 3.13.5

**ЗАПОМНИ:**

1. Електричната струја претставува организирано, насочено движење на електрични полнежи.

2. Ако низ некој пресек на проводникот  $S$ , за некое време  $t$  протече количество електрицитет  $Q$ , јачината на електричната струја  $I$  се дефинира како количник од полнежот  $Q$  и времето  $t$ .

3. Векторот на густината на струјата се дефинира како количник од јачината на струјата и површината на напречниот пресек на проводникот.

4. Експериментално е покажано дека кај најголем број проводници, а посебно кај металите, кога температурата им се одржува константна, струјата е пропорционална на напонот. Оваа пропорционалност може да се запише во облик  $I = \frac{U}{R}$  и го претставува Омовиот закон.

5. За жичен проводник со константен пресек и од хомоген материјал, експериментално е покажано дека отпорот е пропорционален на должината на проводникот  $l$ , а обратно пропорционален на површината на попречниот пресек  $S$  и даден со релацијата  $R = \rho \frac{l}{S}$ .

6. Еквивалентниот отпор на два редно поврзани отпорници е еднаков на збирот на нивните отпори.

7. Реципрочната вредност на еквивалентниот отпор на паралелно поврзани отпорници е сума од реципрочните вредности на отпорите на поедините отпорниците.

8. Цуловиот закон е даден со релацијата  $W_t = A = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t$  и со него може да се одреди топлинската енергија која се создава во еден отпорник.

9. Еден реален генератор може да се прикаже како редна врска на два елемента. Едниот елемент е идеален генератор без никаков отпор, а другиот е отпорник чиј отпор е еднаков на внатрешниот отпор на генераторот  $R_g$ .

10. Напонот  $U_{AB}$  на точката  $A$  во однос на точката  $B$  ќе биде еднаков на алгебарската сума на сите емс и напони врз отпорниците меѓу точките  $A$  и  $B$ , при што со позитивен предзнак се земаат оние чиј позитивен пол се наоѓа кон точката  $A$ .

11. Првиот Кирхофов закон гласи: алгебарскиот збир на јачините на струите во било кој јазол на електричното коло е еднаков на нула. По договор, струите кои

излегуваат од јазолот се земаат со позитивен знак, а тие што влегуваат во јазолот со негативен знак.

12. Вториот Кирхофов закон гласи: по должината на било која затворена патека (контура) во електрично коло, алгебарскиот збир на сите електромоторни сили на генераторите е еднаков на алгебарскиот збир на сите напони врз отпорниците во таа контура. Притоа електромоторните сили се земаат со позитивен знак, ако нивната насока се поклопува со позитивната насока на обиколување по контурата, а со негативен ако нивната насока е спротивна од насоката на обиколување по контурата. Напоните врз отпорниците се земаат со позитивен знак ако струите низ нив се поклопуваат со позитивната насока на обиколување по контурата, а со негативен знак, ако струите низ нив се во обратна насока од позитивната насока на обиколување по контурата.

## 4. НАИЗМЕНИЧНИ СТРУИ

### 4.1. ДОБИВАЊЕ И ПРИКАЖУВАЊЕ НА НАИЗМЕНИЧНИТЕ ГОЛЕМИНИ

Денес, пренесувањето на електричната енергија во електричните мрежи од местото на производство до местото на потрошувачка се прави **исклучиво со примена на наизменични електрични големина**. Трансформаторите и електричните машини за **наизменична струја**, наоѓаат широка и незаменлива примена во пракса. Процесот на електромеханичко претворање на енергијата во нив го овозможуваат наизменични големина. Преносот на **радиотелевизиските сигнали** се изведува со наизменични големина, преку електромагнетни бранови, што се создадени од наизменичните струи.

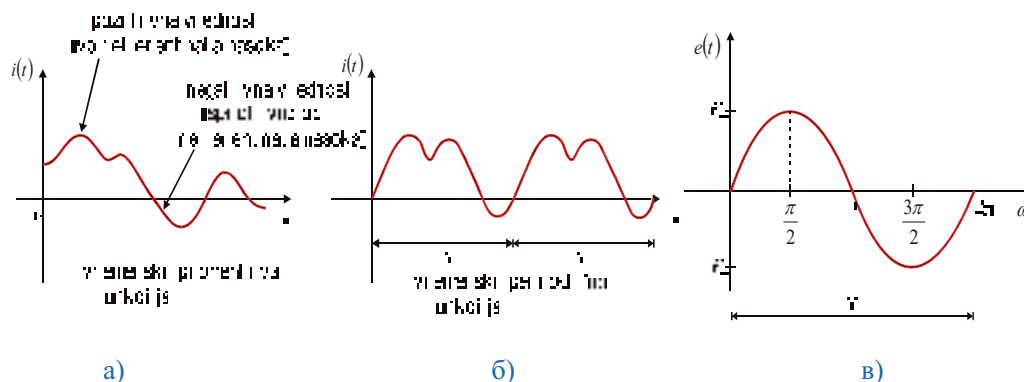
**Телеграфијата, телефонијата** се исто така примери за користење на наизменичните големина.

#### 4.1.1. Општи поими

**Временски променлива струја** е онаа која во текот на **времето** произволно го менува интензитетот или насоката, или и двете големина **истовремено**.

**Моменталната** вредност на променлива струја  $i(t)$  е вредноста што ја има струјата во дадено време, т.е. во **моментот  $t$** .

Зависноста на струјата од времето може да биде дадена: аналитички, графички (сл.4.1.1) и табеларно.



Сл. 4.1.1. Временски променливи струи а) временски променлива, б) временски периодична и в) прстопериодична функција.

**Временски периодични струи** се струите чии моментални вредности се повторуваат во еднакви временски интервали.

За променливата струја се избира **референтна насока**. Бидејќи променливата струја може да ја менува својата насока, ако нејзината **вистинска насока** (тоа важи и за напонот) **се поклопува** со **референтната** во даден момент, се вели дека во тој момент струјата е **позитивна** со предзнак (+). Ако има **обратна** насока од **референтната**, тогаш се вели дека е **негативна** и се пишува со предзнак (-).

За некоја струја  $i_2(t)$  се вели дека е негативна во однос на струјата  $i_1(t)$  односно  $i_2(t) = -i_1(t)$  ако во секој момент  $i_2(t)$  има ист интензитет како и  $i_1(t)$ , а е со спротивна насока.

## 4.2. ПАРАМЕТРИ НА ПРОСТОПЕРИОДИЧНИ ГОЛЕМИНИ

### 4.2.1. Фаза на наизменичните големини

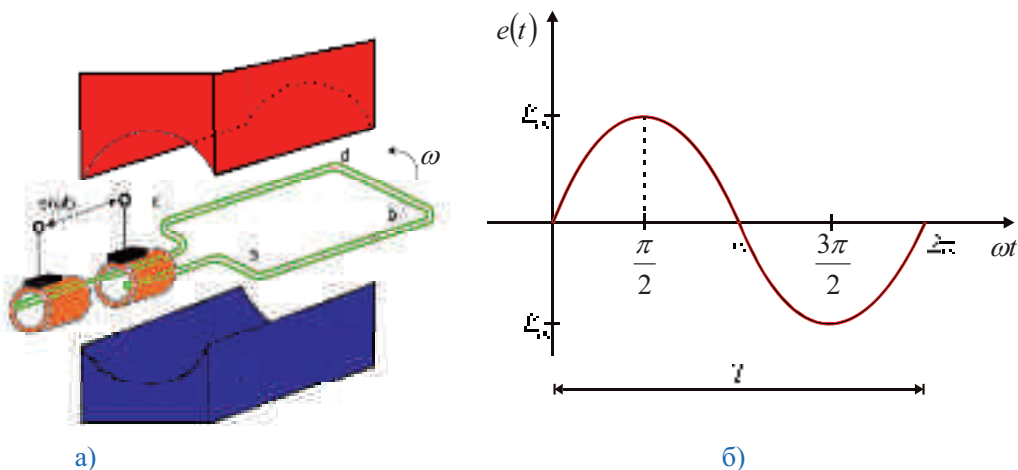
Простопериодичните големини што се разгледуваат во електротехниката се големините, чија **вредност хармониски се менува** во однос на **времето**.

**Синусните големини** растат од нула, ја достигнуваат позитивната максимална вредност, опаѓаат на нула, потоа ја достигнуваат максималната вредност во спротивна насока и повторно опаѓаат на нула.

На сл. 4.2.1.а, е даден поедноставен модел на генератор во кој се произведува наизменичен напон и струја. Кога навивката се врти со постојана аголна брзина  $\omega = 2\pi f$  во означената насока, во неа се индуцира наизменична електромоторна сила, чија временска карактеристика е дадена на сл.4.2.1.б. Равенката за промената на моменталната вредност на струјата е:

$$e(t) = E_m \sin(\omega t + \theta) \quad (4.2.1)$$

Изразот во заградата ( $\omega t + \theta$ ) се нарекува **фаза** на **наизменичната** електромоторна сила, а  $\theta$  се нарекува **почетна фаза** во моментот  $t = 0$ .



Сл. 4.2.1. а) Генератор за добивање на наизменични големини, б) временска карактеристика на наизменичната електромоторна сила во навивка, која се менува по синусен закон.



Понатаму, почетната фаза на наизменичниот напон и електромоторната сила ќе се означува со буква  $\theta$  (тета).

Почетната фаза на струјата ќе се означува со буква  $\psi$  (пси), а моменталната вредност на струјата е претставена со равенката:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi) \quad (4.2.2)$$

Вредноста на почетната фаза  $\theta$  на индуцираната електромоторна сила се менува во зависност од положбата на навивката во моментот  $t=0$ , односно од почетокот на набљудувањето на нејзината промена.

Вредноста на почетната фаза може да биде позитивна, негативна или нула.

### Прашања

1. Што е временски периодична големина?
2. Што е наизменична големина?
3. Какви големини се напоните, струите и индуцираните електромоторни сили што се проучуваат во ова поглавје?
4. Како се добива наизменичен напон и струја?

### Задачи:

1. Две наизменични електромоторни сили со амплитуди  $E_{m1} = 10 \text{ V}$  и  $E_{m2} = 15 \text{ V}$  имаат почетни фази  $\theta_1 = \pi/3$  и  $\theta_2 = -\pi/4$ . Да се напишат равенките за моменталните вредности на емс. (Одговор:  $e_1(t) = E_{m1} \sin(\omega t + \pi/6)$  и  $e_2(t) = E_{m2} \sin(\omega t - \pi/4)$ ).

### 4.2.2. Периода на наизменичните големини

Временскиот интервал за кој наизменичната големина прави една полна промена се нарекува **периода**. Периодата се одбележува со  $T$ , а се мери во секунди (s), сл. 4.2.1.б.

Половина од временскиот интервал  $T/2$ , се нарекува **полупериода**. Од сл. 4.2.1.б може да се забележи дека промените на индуцираната електромоторна сила во првата полупериода се во позитивна насока, а во втората полупериода се во негативна насока. Периодот на наизменичните големини кои се менуваат по синусен закон е  $T = 2\pi$ :

$$e(t) = e(t + n2\pi) \quad n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots \quad (4.2.3)$$

Кога наизменичната големина ќе направи една полна промена, се вели дека направила еден **циклус**.

Ако за време од една секунда навивката се заврти  $N$  пати, наизменичната големина ќе направи  $N$  промени, односно  $N$  циклуси.

Ако навивката за една секунда прави 50 вртежи, наизменичната големина ќе направи 50 полни промени.

Времето на траење на една периода ќе изнесува  $1/50 = 0,02 \text{ s}$ .

### 4.2.3. Фреквенција на наизменичните големини

Количникот помеѓу бројот на циклусите  $N$  и времето  $t$  за кое се направени, се нарекува **фреквенција** на **наизменичната големина (напон, струја, емс)**. Фреквенцијата се означува  $f$ , а се мери во херци (Hz). Фреквенцијата се пресметува според равенката:

$$f = \frac{N}{t} = \frac{1}{T}. \quad (4.2.4)$$

Наизменичните големини имаат фреквенција од еден херц, ако за една секунда прават една полна промена.

Во Европа, наизменичните големини најчесто се менуваат со фреквенција од 50 Hz, додека во САД со 60 Hz, за т.н.р. јака струја. Во светилките, промената на наизменичната струја меѓу две максимални вредности, не може да се регистрира од човечкото око.

За други намени фреквенцијата се движи во граници од неколку десетици херци до неколку гига херци.

**Наизменичната струја** се менува по **синусниот закон**, ако **доведениот напон** во електричното коло е **наизменичен**, а **параметрите** во колото  $R, L, C$  имаат **константни вредности**. Ако параметрите на колото не се константни, струјата не се менува по синусниот закон, иако напонот кој е приклучен во колото се менува по тој закон.

**Осовината на навивката** секогаш е **нормална** на **векторот** на **магнетната индукција**  $\vec{B}$ .

Фреквенцијата на наизменичната големина во вака поставената навивка, е пропорционална со бројот на вртежи на навивката  $n$  во магнетното поле, за  $p=1$ :

$$f = \frac{n}{60}. \quad (4.2.5)$$

Ако машината има поголем број на парови магнетни полови од 1, т.е.  $p>1$ , тогаш фреквенцијата на наизменичната големина се пресметува:

$$f = \frac{pn}{60}. \quad (4.2.6)$$

Во **стационарен** режим, **брзината на вртење** на навивката е **константна**.

При претставување на наизменичните големини со фазори, единечниот радиус вектор при вртење по обемот на кружница, за време од една периода  $T$  изминува агол од  $2\pi$  rad, додека за време  $t$  единечниот радиус вектор зафаќа агол  $\alpha$ , од што следува соодносот:

$$2\pi : T = \alpha : t. \quad (4.2.7)$$

Количникот  $\alpha/t$  ја претставува **аголната брзина** на **единечниот радиус вектор (навивката)**, од што следува:

$$\alpha = \omega t. \quad (4.2.8)$$

Ако изразот 4.2.8, се замени во 4.2.7, за пресметување на  $\omega$  се добива:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f. \quad (4.2.9)$$

Аголната брзина  $\omega$  во електротехниката се нарекува **фазна брзина** или **кружна фреквенција**. Основна мерна единица е радијани во секунда (rad/s).

Со примена на равенката 4.2.9, промената на индуцираната електромоторната сила од равенка 4.2.1, може да се изрази:

$$e(t) = E_m \sin(2\pi f t + \theta). \quad (4.2.10)$$

### Прашања

1. Што е фреквенција  $f$  и колкава е нејзината вредност во Европа?
2. Како се пресметува периодата  $T$  во електрично коло со наизменични струи?
3. Што е кружна фреквенција  $\omega$  и како се пресметува?

### Задачи:

1. Да се определи фреквенцијата на наизменичната електромоторна сила со  $\omega = 301,6 \text{ rad/s}$ . (Одговор: 48 Hz).

2. Електричен хидрогенератор има  $2p = 4$  магнетни полови. Ако фреквенцијата на индуцираната електромоторна сила е  $f = 50 \text{ Hz}$ , колкава е брзината роторот? (Одговор: 1500 vr/min).

### 4.2.4. Моментална и максимална вредност на наизменични големини

Ако се набљудува временската карактеристика на наизменичната електромоторна сила сл. 4.2.1.б, се доаѓа до заклучокот дека во секој момент од време, таа има различна вредност, во текот на една полупериода.

**Вредноста** што ја има **наизменичната големина** во **некој момент**, се нарекува **моментална вредност**.

**Моменталните вредности** се означуваат со мали букви и тоа со:  $e(t)$  за електромоторната сила,  $i(t)$  за струјата,  $u(t)$  за напонот и моќноста со  $p(t)$ .

Секоја наизменична големина за време од една полупериода постигнува единствена најголема моментална вредност.

**Најголемата вредност** се нарекува **амплитудна** или **максимална вредност**. Означувањето на максималните вредности е со големи букви со индекс  $m$  и тоа:  $E_m$  за електромоторната сила,  $I_m$  за струјата,  $U_m$  за напонот и  $P_m$  за моќноста.

За определување на една наизменична големина треба да се познати неколку нејзини карактеристики и тоа: **фреквенцијата**, **почетната фаза** и **максималната вредност**.

Прашања

1. Што е моментална, а што максимална вредност на наизменичната струја?
2. Со кои параметри е дефинирана наизменичната големина?
3. По која законитост се менуваат моменталните вредности на индуцираната електромоторна сила  $e(t)$  и напон  $u(t)$ ?

Задачи

1. Наизменичен напон со амплитуда  $380\text{V}$ , е приклучен на краевите од намотка, која ротира во хомогено магнетно поле со константна аголна брзина  $\omega$ . Напиши ја равенката по која се менува моменталната вредност на напонот! (Одговор:  $u(t) = U_m \sin \omega t = 380 \sin \alpha$ ).

2. Познат е аналитичкиот израз за промената на наизменичната струја низ навивка која се врти со константна аголна брзина во хомогено магнетно поле:  $i(t) = 2\sqrt{2} \sin \alpha$ . Да се пресмета моменталната вредност на струјата, во моментот кога положбата на навивката е одредена со аголот  $\alpha = 5\pi/4 \text{ rad}$ ! (Решение:  $i(t) = 2\sqrt{2} \sin 5\pi/4 = 2\sqrt{2} \cdot (-0,707) = -1,99 \text{ A}$ ).

3. Да се пресмета амплитудата на наизменичната електромоторна сила, индуцирана во роторска навивка на генераторот, ако во моментот кога таа со  $x$  оската зафаќа агол  $\alpha = -\pi/3 \text{ rad}$ , нејзината вредност е  $e(t) = -259,8 \text{ V}$ !

Решение:

$$e(t) = E_m \sin \alpha \Rightarrow E_m = \frac{e(t)}{\sin \alpha} = \frac{-259,8}{\sin(-\pi/3)} = \frac{-259,8}{-0,866} = 300 \text{ V}.$$

4. Познат е математичкиот израз за моменталните вредности на наизменична електромоторна сила:  $e(t) = 220\sqrt{2} \sin \alpha \text{ V}$ . Да се определи нејзината максимална вредност! (Одговор:  $E_m = 220\sqrt{2}$ ).

5. Да се напише изразот за моменталните вредности на наизменична струја со амплитуда  $I_m = 0,2 \text{ A}$ . Да се претстави нејзиниот график! (Одговор:  $i(t) = 0,2 \sin \alpha \text{ A}$ ).

6. Познат е изразот за моменталната електромоторна сила, индуцирана во една навивка  $e(t) = 310 \sin \alpha \text{ V}$ . Да се пресмета нејзината моменталната вредност, во моментот кога таа зафаќа агол  $\alpha = \pi/3$ , во однос на  $x$  оската! (Одговор:  $e(t) = 268,4 \text{ V}$ ).

## 4.2.5. Ефективна вредност на наизменичните големини

Кога има потреба да се измери наизменичната големина, не е погодно да се мерат најзините моментални вредности, бидејќи постојано се различни. Истиот заклучок може да се донесе и за максималните вредности, бидејќи се јавуваат само двапати во текот на една периода.

При одредени појави, ефектите од наизменичната струја или напон се пропорционални на средната вредност од **квадратот** на големините.

Затоа, во теоријата на наизменичните големини често за карактеристика на нивниот интензитет се воведуваат нивните **ефективни вредности**, кои се означуваат со големи букви:  $I$  за струјата,  $U$  за напонот и  $E$  за електромоторната сила.

**Ефективна** вредност на **наизменичната струја** е нејзина **постојана** вредност, **еднаква** на вредноста што треба да ја има **еднонасочната струја**, при што за време од една периода  $T$ , **Џуловиот ефект низ отпорник  $R$**  (развиената топлота енергија)  $W_-$  биде еднаков со ефектот на наизменична струја  $W_{\sim}$ .

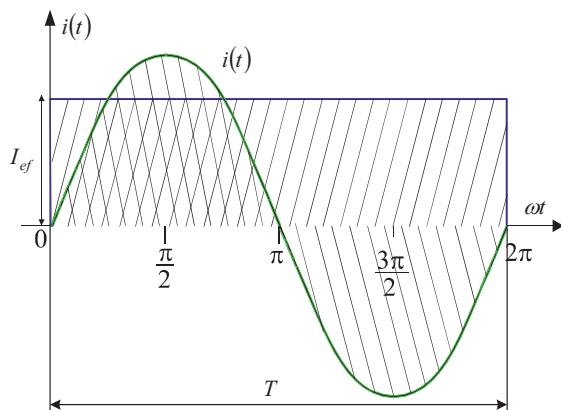
Ако низ проводникот  $R$  тече наизменична струја  $i(t)$ , електричната енергија која за време од една периода  $T$  ќе се претвори во топлина според Џуловиот закон е:

$$W_{\sim} = RI_m^2 \frac{T}{2}. \quad (4.2.11)$$

Ако низ истиот проводник  $R$  тече еднонасочна струја  $I = I_{ef}$ , тогаш електричната енергија што за време  $T$  ќе се претвори во топлина се пресметува со:

$$W_- = RI^2 T. \quad (4.2.12)$$

На сл. 4.2.2, шрафираните површини во размер на енергија, ги претставуваат топлотните загуби во двата случаи, односно ако  $W_- = W_{\sim}$ , значи дека **ефектот во отпорникот**, при течење на наизменичната или еднонасочната струја е еднаков.



Сл.4.2.2. Ефективна вредност на наизменична струја.

Со изедначување на шрафираните површини, односно со изедначување на равенките (4.2.11) и (4.2.12), се добиваат равенката за пресметување на ефективната вредност на наизменичната струја и напон:

$$RI_m^2 \frac{T}{2} = RI^2 T,$$

$$\Rightarrow I = \sqrt{\frac{I_m^2 T}{T} \frac{1}{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 I_m \quad (4.2.13)$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

Ефективната вредност на напонот на градската мрежа е  $U = 220 \text{ V}$ . Неговата максимална вредност  $U_m = U\sqrt{2} = 220\sqrt{2} = 311 \text{ V}$ .

### Прашања

1. Што е ефективна вредност на наизменична струја?

2. Како се пресметува ефективната вредност на наизменичниот напон?

### Задачи

1. Да се пресмета ефективната вредност, фреквенцијата и периодата на наизменичната струја чија моментална вредност е дадена со изразот  $i(t) = 11,28 \sin 157t$  mA!

Решение: Амплитудата на наизменичната струја изнесува  $I_{\max} = 11,28$  mA, а нејзината ефективна вредност се пресметува:  $I = I_{\max} / \sqrt{2} = 7,976$  mA. Фреквенцијата изнесува:

$$\omega = 2\pi f \Rightarrow f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{157}{6,28} = 25 \text{ Hz.}$$

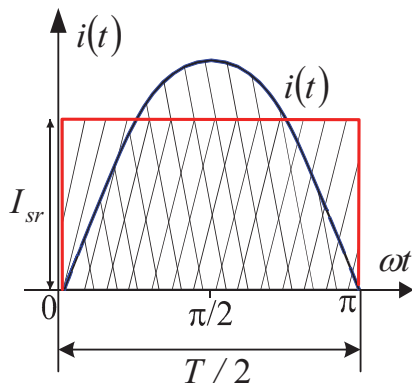
### 4.2.6. Средна вредност на наизменичната струја

Средната вредност на наизменична големина која се менува по синусниот закон, е нејзината константна вредност во текот на позитивната полупериода. Таа е математичка големина.

Средната вредност на наизменичната струја  $I_{sr}$  е вредноста што треба да ја има еднонасочната струја, за да даде исто количество електричество  $Q_{\sim}$ , како и наизменичната струја  $i(t)$  во текот на позитивната полупериода  $Q_{\sim}$ .

На сл. 4.2.3, шрафираните површини во размер, го претставуваат количеството електричество во двата случаи. Кога ќе се изедначат, се добива:

$$Q_{\sim} = Q_{\sim}. \quad (4.2.14)$$



Сл. 4.2.3. Средна вредност на наизменичната струја.

Ако се зборува за електролиза, тогаш е потребно да се знае средната вредност на наизменичната струја.

За да се пресмета загревањето на еден отпорник, наједноставно е да се примени ефективната вредност на струјата.

### Прашања

1. Што е средна вредност на наизменичната струја и како се пресметува ?

Со средување на претходното равенството, за средната вредност на наизменичната струја се добива:

$$I_{sr} = \frac{2}{\pi} I_m \quad \text{или} \quad U_{sr} = \frac{2}{\pi} U_m. \quad (4.2.15)$$

Која карактеристика на наизменичната струја или напон ќе се примени, зависи од тоа кој ефект се проучува. Ако треба да се одговори кој напон ќе го издржи кондензаторот, тоа се однесува на максималната вредност на наизменичниот напон  $U_m$ .

Задачи

1. Акумулатор се полнел за време  $t = 12 \text{ h}$  со исправена наизменична струја, чија ефективна вредност изнесува  $I = 1 \text{ A}$ . Пресметај го капацитетот на акумулаторот!

Решение: Количеството на електрицитет со кое се полни акумулаторот (капацитет на акумулаторот) се пресметува:  $Q = I_{\text{sr}} t$ . Средната вредност на наизменичната струја се пресметува:  $I_{\text{sr}} = 2I_m / \pi$ ,  $I_m = \sqrt{2}I$ . Добиените изрази се заменуваат во изразот за капацитет на акумулаторот и се добива:  $Q = \frac{2\sqrt{2}I}{\pi} t = \frac{2\sqrt{2}1}{3,14} 12 = 10,78 \text{ Ah}$ .

#### 4.2.7. Претставување на наизменичните големини кои се менуваат по синусниот закон со помош на фазори (вектори кои се вртат во рамнина)

Во претходните поглавја, **наизменичните големини** се претставени со нивните **временските карактеристики**. Од карактеристиките може да се определи: **моменталната, максималната, ефективната и средната** вредност на големината.

Исто така може да се определи и **почетната фаза** и **периодот** или **фреквенцијата**. Прегледноста не е најдобра кога се претставуваат повеќе наизменични големини истовремено со различни почетни фази.

Најдобро прикажување на наизменичните големини е со вектори (фазори кои се вртат во една рамнина) со константна брзина  $\omega$ , спротивно од стрелките на часовникот.

Тоа е можно, бидејќи секоја синусна функција се добива со проекциите на единечен радиус вектор врз ординатната оска, при вртење во тригонометрискиот круг, во насока спротивна од стрелките на часовникот.

Се замислува радиус вектор со должина  $U_m$  (нацртан во размер на напонот), кој се врти во рамнината (сл. 4.2.4), околу координатниот почеток  $O$ , со постојана аголна брзина  $\omega$  во спротивна насока од вртење на стрелките на часовникот. Тој вектор во моментот  $t=0$ , со оската  $x$  зафаќа агол  $\theta$ .

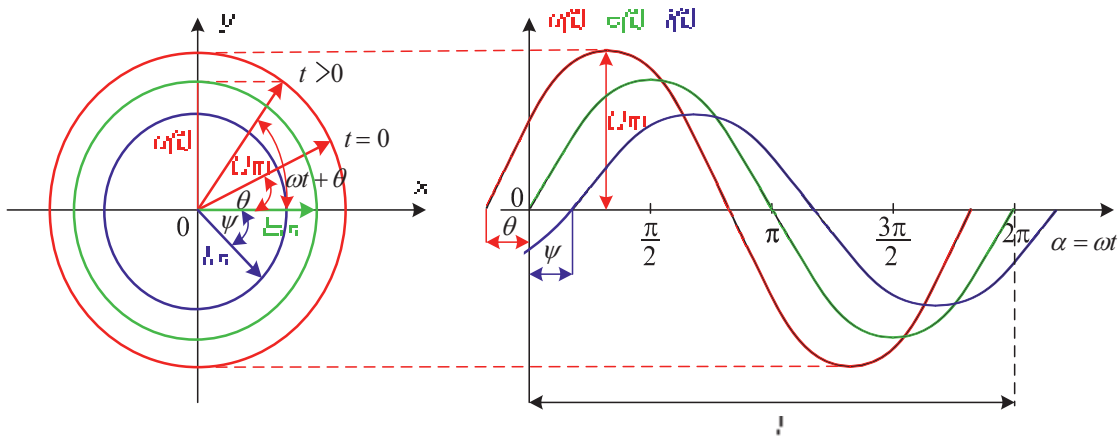
После време  $t > 0$ , векторот  $U_m$  со оската  $x$  зафаќа агол  $\alpha = (\omega t + \theta)$ . Во тој момент проекцијата на тој вектор на  $y$  оската е синусна функција:

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \theta). \quad (4.2.16)$$

Оттука произлегува можноста, напонот кој се менува според синусниот закон да се прикаже со вртлив вектор (фазор) чија големина е  $U_m$ . Тој се врти со аголна брзина  $\omega$  и со  $x$  оската зафаќа агол  $\theta$ .

Понатаму, се замислува радиус вектор со должина  $E_m$ , (нацртан во размер на напонот), кој се врти во рамнината, околу координатниот почеток  $O$ , со постојана аголна брзина  $\omega$  во спротивна насока од вртење на стрелките на часовникот (сл. 4.2.4). Во моментот  $t=0$ , **почетната фаза** ( $\theta=0$ ). **Проекцијата врз оската  $y$**  во тој момент ја дава моменталната вредност на наизменичната електромоторна сила:

$$e(t) = E_m \sin \omega t. \quad (4.2.17)$$



Сл.4.2.4. Претставување на наизменичните големини со фазори.

Векторот на струјата  $I_m$  (нацртан во размер на струјата), ја претставува наизменичната струја, со почетна фаза  $\psi$ , односно во моментот  $t=0$ , со  $x$  оската зафаќа агол од  $\psi = -\pi/6$  и нејзината моментална вредност пресметува:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi). \quad (4.2.18)$$

Оската  $x$  во однос на која се пресметуваат аглите се нарекува **фазна оска** (*f.o.*).

Истите промени на наизменичните големини би се добиле, ако радиус векторот мирува, а  $y$  оската (временската) се врти во обратна насока. Така се добиваат наместо вртливи вектори, запрени вектори.

Бидејќи во пракса најчесто се работи со ефективните вредности на наизменичните големини, ништо нема да се промени во претставувањето, ако должината на радиус векторот во соодветен размер ја претставува ефективната вредност на наизменичната големина  $U$ ,  $E$  или  $I$ .

Векторите во рамнина кои се определени со две координати се нарекуваат фазори. Затоа и вртливите вектори во рамнината со чија помош се претставуваат наизменичните големини се нарекуваат фазори.

Фазорите се означуваат со исти букви како и големините кои тие ги претставуваат, со црта над нив.

Оската  $y$  во тригонометрискиот круг се нарекува **временска оска**, а  $x$  се нарекува фазна оска.

Пример: фазорот на максималниот наизменичен напон  $u(t) = U_m \sin(\omega t + \theta)$ , се означува со  $\bar{U}_m$ , фазорот на максималната наизменичната струја  $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi)$  се



означува со  $\bar{I}_m$ , а фазорот на максималната електромоторна сила  $e(t) = E_m \sin \omega t$  се означува со  $\bar{E}_m$ .

Тие можат да се означат на следниот начин:

$$\bar{U}_m = U_m \angle \omega t + \theta, \quad \bar{I}_m = I_m \angle \omega t + \psi, \quad \bar{E}_m = E_m \angle \omega t + 0. \quad (4.2.19)$$

$\bar{U}_m, \bar{I}_m, \bar{E}_m$  – се вектори на максималните вредности на големините, а  $(\omega t + \theta), (\omega t + \psi), (\omega t + 0)$  се аглие кои ги зафаќаат векторите со апцисната оска или почетните фази на векторите од максималните големини.

Во праксата, наместо со вектори од максималните вредности, се работи со вектори од ефективните вредности на големините:

$$\bar{U} = U \angle \theta, \quad \bar{I} = I \angle \psi, \quad \bar{E} = E \angle 0. \quad (4.2.20)$$

$\bar{U}, \bar{I}, \bar{E}$  – се запрени вектори на ефективните вредности на наизменичните големини, додека  $\theta, \psi$  и  $0$  се нивните почетни фази.

$U, I, E$  се модули, а  $\theta, \psi$  и  $0$  соодветно се аргументи.

Ако почетната фаза е позитивна, синусоидата е поместена во лево, ако е негативна, синусоидата е поместена во десно од координатниот почеток.

#### 4.2.8. Собирање и одземање на наизменичните струи и напони кои имаат иста фреквенција

При анализата на електричните кола, често се јавува потреба од собирање или одземање на наизменични големини, со цел да се определи вкупната (резултантната) вредност на наизменичните големини.

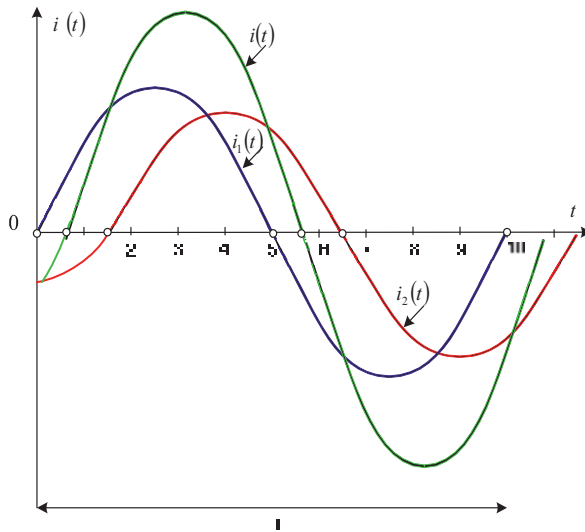
За дадени две наизменични струи:  $i_1(t) = I_{m1} \sin(\omega t + \psi_1)$  и  $i_2(t) = I_{m2} \sin(\omega t + \psi_2)$ , треба да се определи збирот од двете струи:

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t). \quad (4.2.21)$$

Струјата  $i(t)$  може да се определи на неколку начини. Еден од начините е да се изврши алгебарско собирање на моменталните вредности. Тоа значи дека треба да се задаваат вредности на времето  $t$ , односно аголот  $\omega t$  и за добиените вредности на синусите да се добиваат вредностите од двете струи, а на крајот алгебарски да се соберат. За да се добие точен резултат, треба да се задаваат многу вредности што го отежнува пресметувањето.

Вториот начин е графичко собирање на струите. Потребно е да се нацртаат синусоидите на двете струи. Резултантната струја ќе се добие со собирање на ординатите (моменталните вредности), за повеќе агли  $\omega t$  од временските дијаграми на сл. 4.2.5.

Собирање или одземање на наизменичните големини се изведува само ако се од исти тип и со еднакви фреквенции.



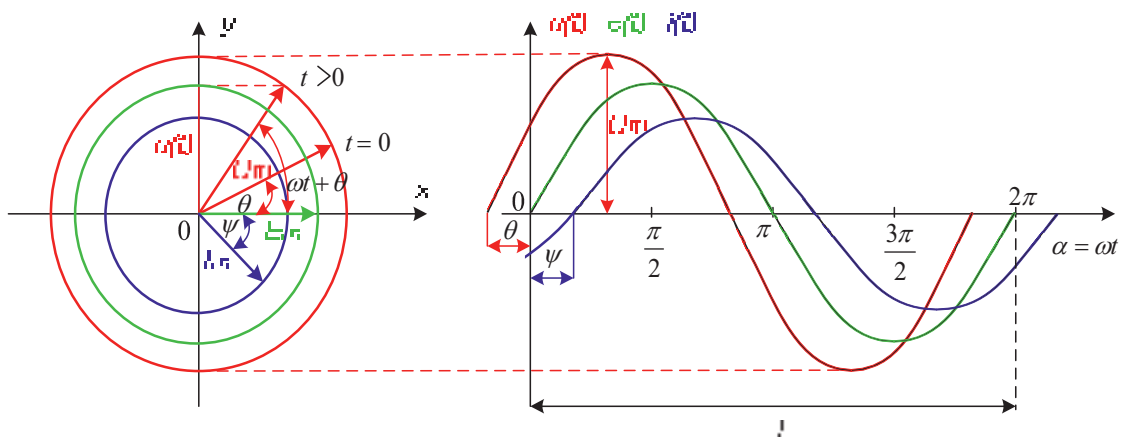
Сл.4.2.5. Графичко собирање на две наизменични струи.

И овој начин не е многу точен, бидејќи бара голема прецизност во графичката работа.

Анализата на електричните кола се поедноставува и е попрегледна и поточна со воведувањето на **фазорските дијаграми**. Собирањето или одземањето се прави исто како и кај векторските големини и може да се користи графичка или аналитичка метода.

На сл. 4.2.6, се нацртани фазорите  $\bar{I}_{m1}$  и  $\bar{I}_{m2}$  од максималните вредности на струите  $i_1(t)$  и  $i_2(t)$ . Положбата на фазорите е дефинирана со почетните фази  $\psi_1$  и  $\psi_2$ . Бидејќи струите имаат исти фреквенции, нивните фазори ќе имаат иста брзина на вртење  $\omega$  околу координатниот почеток  $O$ . Разликата од нивните почетни фази или нивната фазна разлика  $\psi_{12} = \psi_1 - \psi_2 = \psi$  има постојана вредност во секој момент од времето.

Тоа дава можност фазорите  $\bar{I}_{m1}$  и  $\bar{I}_{m2}$  да се разгледуваат како **запрени вектори** и да се применат сите **законитости за геометриско собирање на вектори**.



Сл. 4.2.6 Геометриско и графичко собирање на две наизменични струи.

Фазорот на вкупната струјата се пресметува како векторски збир на поединечните фазори од максималните или ефективните вредности:

$$\begin{aligned} \bar{I}_m &= \bar{I}_{m1} + \bar{I}_{m2} \\ \bar{I} &= \bar{I}_1 + \bar{I}_2 \end{aligned} \quad (4.2.22)$$

Според геометриските правила, збирот на два вектори е еднаков на поголемата дијагонала од паралелограм, чии страни се поединечните вектори.

Разликата помеѓу два вектори е еднаква на помалата дијагонала од истиот паралелограм.

Аналитичкиот пат за определување на резултантниот вектор е со примена на косинусната теорема, при определување на страна од триаголник, сл. 4.2.7.

Амплитудата на струјата се определува:

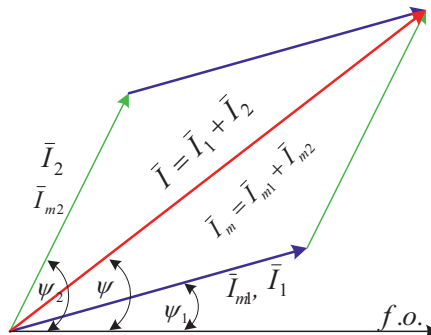
$$I_m = \sqrt{I_{m1}^2 + I_{m2}^2 + 2I_{m1}I_{m2} \cos(\psi_2 - \psi_1)}. \quad (4.2.23)$$

Покрај амплитудата, треба да се определи и почетната фаза на резултантната струја. Од дијаграмот на слика 4.2.7, се определува тангенсот од аголот  $\psi$ , што е почетна фаза на резултантната струја (нејзината максимална или ефективна вредност):

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{I_1 \sin \psi_1 + I_2 \sin \psi_2}{I_1 \cos \psi_1 + I_2 \cos \psi_2} \quad (4.2.24)$$

Исто така, вкупната струја во колото може да се определи со собирање на запрени вектори:

$$\begin{aligned} i(t) &= i_1(t) + i_2(t) \\ \bar{I} &= \bar{I}_1 + \bar{I}_2 \\ \bar{I} &= I \angle \psi \quad \bar{I}_1 = I_1 \angle \psi_1 \quad \bar{I}_2 = I_2 \angle \psi_2 \\ i(t) &= \sqrt{2} I \sin(\omega t + \psi) \end{aligned} \quad (4.2.25)$$



Сл. 4.2.7. Определување на резултантната струја и нејзината почетна фаза.

Прашања

1. Што е проекцијата на основниот фазор врз ординатната оска?
2. Со што се претставуваат наизменичните големини?
3. Што е фазор?
4. Што е почетна фаза за наизменичен напон и струја и како се означуваат?
5. Дали ефективните вредности можат да се претстават со фазори?
6. Кои услови треба да бидат исполнети за да се собираат (одземаат) наизменични струи (напони)?
7. Наброј ги начините на собирање на струите (напоните)?
8. Кога резултатите се најпрецизни?

Задачи

1. Дадени се моменталните вредности на два наизменични напони:  $u_1(t) = 100 \sin 314t$  и  $u_2(t) = 100 \sin(314t - \pi/2)$ . Да се определи максималниот резултантен напон  $U_m$  и напиши ја равенката за моменталната промена на вкупниот напон. (Решение:  $U_m = 173 \text{ V}$ ,  $u(t) = 173 \sin(314t - \pi/6)$ ).

#### 4.3. ОПРЕДЕЛУВАЊЕ НА ПРОМЕНАТА НА ЕЛЕКТРИЧНАТА СТРУЈА И МОЌНОСТА ВО ЕЛЕКТРИЧНО КОЛО СО ОТПОРНИК, КАЛЕМ И КОНДЕНЗАТОР

##### 4.3.1. Анализа на однесување на отпорник, калем и кондензатор во коло со наизменичен напон $u(t) = U_m \sin \omega t$

Во секое електрично коло дел од електричната работа на изворот се претвора во топлина. Освен тоа, просторот во кој е сместено електричното коло е опфатен од електромагнетно поле. Ако се менува електромагнетното поле, електричната работа ќе се претвори во енергија на полето, или енергијата на полето ќе се претвори во електрична работа, во зависност од тоа дали електромагнетното поле се засилува или слабее.

Кога напонот се зголемува, електричното поле се засилува, а електричната работа на изворот се претвора во електростатска енергија на електричното поле, која се акумулира во диелектрикот. Кога напонот опаѓа, електричното поле слабее, а електростатската енергија повторно се претвора во електрична работа на изворот.

Кога се зголемува електричната струја во колото, тогаш се засилува магнетното поле, а електричната работа се претвора во магнетна енергија на магнетното поле. Кога струјата опаѓа, магнетното поле слабее, а магнетната енергија се претвора во електрична работа на колото. При тоа се претпоставува дека во колото нема потрошувач и дека електричното коло не е под влијание на друго електрично коло.

Кај еднонасочните големини, претворувањето на електричната работа во електростатска енергија е во моментот на вклучување на прекинувачот, а претворувањето на електростатската енергија во електрична работа во колото се случува при отворање на

прекинувачот (исклучување на струјата). Кај наизменичната струја овие трансформации се постојани.

Електричните кола, во кои претходните појави се случуваат рамномерно, вдоль колото, се нарекуваат **електрични кола со распределени параметри**. Тоа се електрични водови за пренесување на електричната енергија. Во електротехниката постојат електрични кола кои се составени од определени елементи во кои, некои претходно опишаните појави, се манифестираат понагласено, а во други кола, истите појави послабо се манифестираат. Ваквите електрични кола се нарекуваат **електрични кола со концентрирани параметри**.

Елементите во електричното коло, во кои најмногу се манифестира претворувањето на електричната работа во топлина, а останатите појави можат да се занемарат се нарекуваат **термогени - активни отпори**. Во **отпорот** се појавува **пад на напон**  $u_R(t) = Ri(t)$ .

Овој пад на напон, се менува по истиот закон како и струјата. Активниот отпорник во електричното коло се означува со  $R$ , а шематски се прикажува на следниот начин:



Елементите на електричните кола во кои посебно е изразено **претворањето на електричната работа во магнетна енергија и обратно**, додека другите појави можат да се занемаруваат, се нарекуваат **индуктивни калеми**. Карактеристика на овие елементи е **индуктивитетот (самоиндуктивност)  $L$** . Ако индуктивниот калем не ја менува формата и не содржи феромагнетно јадро, тогаш  $L = const$ . Во електричните шеми калемот се одбележува со:



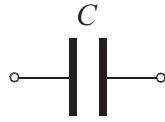
На **калемот** се појавува **напон на самоиндукција**  $u_L(t)$ , кој тежи да ја спречи промената на струјата во електричното коло. Во него се занемарува Џуловиот ефект.

Елементите во електричните кола во кои се врши **претворање на електричната работа во електростатска енергија и обратно**, а останатите појави се занемаруваат, се **кондензатори**.

Карактеристика на кондензаторот е **капацитетот  $C$** . Кога диелектрикот на кондензаторот е совршен, тогаш при намалување на електричното поле, целокупната електростатска енергија која кондензаторот ја акумулирал од изворот, повторно се враќа во изворот - мрежата.

Оптоварен кондензатор има напон  $u_C(t)$ , со насока спротивна од насоката во која кондензаторот се оптоварува.

Во шемите електричниот кондензатор се означува на следниот начин:



Во електричните кола со наизменична електрична струја, постојат **неповратни процеси**, кога енергијата  $W(t)$  неповратно се претвора во топлина-тоа е **активна електрична енергија**.

Во електричното коло постојат и **повратни процеси**, кога енергијата  $W(t)$  се претвора од еден во друг вид, тоа е таканаречена **реактивна електрична енергија**.

#### 4.3.2. Електрично коло со активен отпор $R$

Најнапред се разгледува наједноставно електрично коло кое содржи активен отпор  $R$ , сл. 4.3.1. Отпорот на проводникот зависи од неговите карактеристики ( $R = \rho l / S$ ). Овој отпор се нарекува **омски отпор на проводникот**. Ако **проводникот се** приклучи на **еднонасочен напон**, низ него ќе тече електрична струја, која **рамномерно ќе се распредели** низ **напречниот пресек на проводникот**.

Ако истиот **проводник се** приклучи на **наизменичен напон**, заради **површинскиот (скин) ефект**, доаѓа до **нерамномерна распределба на струјата по напречниот пресек на проводникот**. Таа ќе биде **истисната на површината од напречниот пресек**, **активниот пресек се намалува**, а тоа доведува до **зголемување на неговиот отпор**. Вака зголемениот отпор се нарекува **активен отпор на проводникот**.

Разликата на овие отпори е занемарлива за фреквенција од 50Hz. За повисоки фреквенции нивната разлика е значајна.

Во колото на сл. 4.3.1, на краевите на отпорникот е приклучен наизменичен напон:

$$u(t) = U_m \sin \omega t \rightarrow \bar{U} = U \angle 0. \quad (4.3.1)$$

Во траен режим на работа, во електричното коло важи вториот Кирхофов закон за моменталните напони и падови на напони:

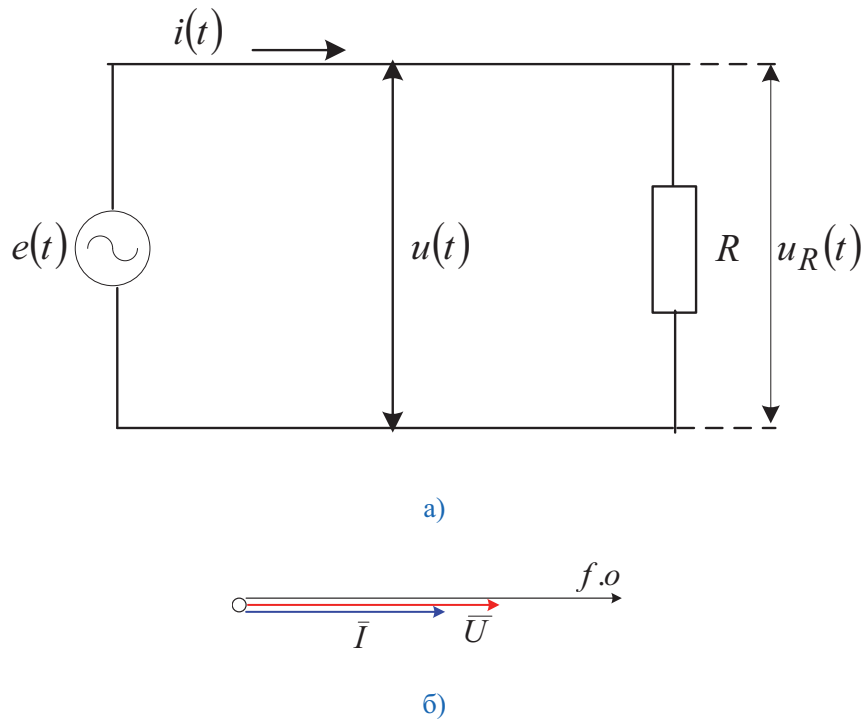
$$u(t) - Ri(t) = 0. \quad (4.3.2)$$

Струјата во колото се определува:

$$i(t) = \frac{u(t)}{R} = I_m \sin \omega t \rightarrow \bar{I} = I \angle 0. \quad (4.3.3)$$

Ефективната вредност на струјата и падот на напонот во ова електрично коло се пресметуваат според Омовиот закон:

$$I = \frac{U}{R} \text{ или } U = RI. \quad (4.3.4)$$



Сл. 4.3.1. а) Шема за електрично коло со активен отпор, б) фазорски дијаграм во коло со активен отпор.

Од равенката 4.3.3, произлегува дека струјата исто така се менува по синусниот закон. Таа во ова електрично коло има иста фреквенција како и напонот и нивните почетни фази се еднакви на 0.

Фазорите на напонот  $\bar{U}$  и струјата  $\bar{I}$  се колинеарни и лежат на фазната оска ( $f.o.$ ).

Во ова електрично коло, изворот врши електрична работа која во целост се претвора во топлина. Моменталната електричната моќност во колото се пресметува:

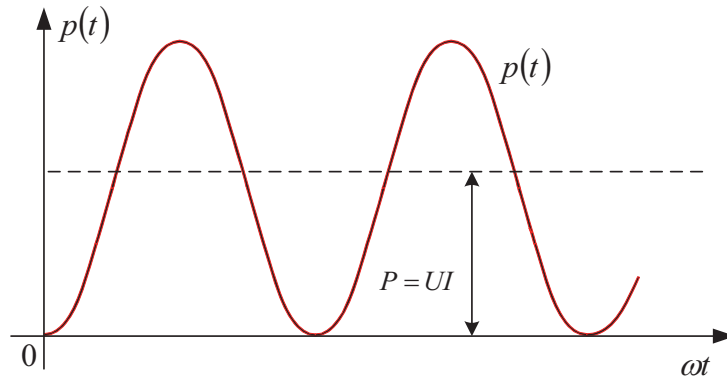
$$p(t) = u(t)i(t) = U_m I_m \sin^2 \omega t = UI(1 - \cos 2\omega t). \quad (4.3.5)$$

Електричната моќност во ова електрично коло се менува со двојна брзина  $2\omega$  во однос на брзината со која се менуваат електричниот напон и струја, сл. 4.3.2. Кога напонот и струјата се нула, моменталната моќност  $p(t) = 0$ . Кога напонот и струјата ја достигнуваат максималната вредност,  $p(t) = U_m I_m = \frac{UI}{2}$ . Значи, **моменталната моќност осцилира** околу нејзината **средна** или **ефективна вредност**  $UI$ , што ја претставува испрекинатата линија на сл. 4.3.2, а се пресметува со равенката:

$$P = UI. \quad (4.3.6)$$

Потрошувачите кои електричната енергија неповратно ја претвораат во топлотна енергија се нарекуваат активни потрошувачи, а средната моќност што ја трошат се нарекува **активна електрична моќност**.

Основна мерна единица за мерење на активната електрична моќност е ват (W). Таа се мери со инструмент наречен ватметар.



Сл. 4.3.2. Временски дијаграм на електрична моќност во коло со  $R$ .

### Прашања

1. Што се активни елементи во коло со наизменична струја?
2. Колкава е почетната фаза на синусниот напон и струја во коло со активен отпор?
3. Каква е фазната разлика помеѓу напонот и струјата?
4. Во што се претвора електричната моќност во коло со активен отпор?
5. Што е моменталната моќност во коло со наизменичен напон?
6. Каква е фреквенцијата на електричната моќност во коло со активен отпор?
7. Која е основна мерна единица за мерење на активната моќност?
8. Колкава е ефективната (средната) вредност на моќноста во коло со електричен отпор?

### Задачи

1. Електрично решо со отпор на греачот  $R = 25 \Omega$ , е приклучено на наизменичен напон со максимална вредност  $U_m = 310 \text{ V}$ . Кривата фреквенција  $\omega = 314 \text{ rad/s}$ . Да се определи максималната, моменталната и ефективната вредност на струјата во греачот! (Одговор:

$$I_m = \frac{U_m}{R} = 12,4 \text{ A}, i(t) = 12,4 \sin(314t), I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 8,79 \text{ A}.$$

2. Електрична светилка е приклучена на наизменичен напон со ефективна вредност  $U = 220 \text{ V}$  и фреквенција  $f = 50 \text{ Hz}$ . Да се определи отпорот на жичката во неа, ако амперметарот покажува струја со ефективна вредност  $I = 0,454 \text{ A}$ .



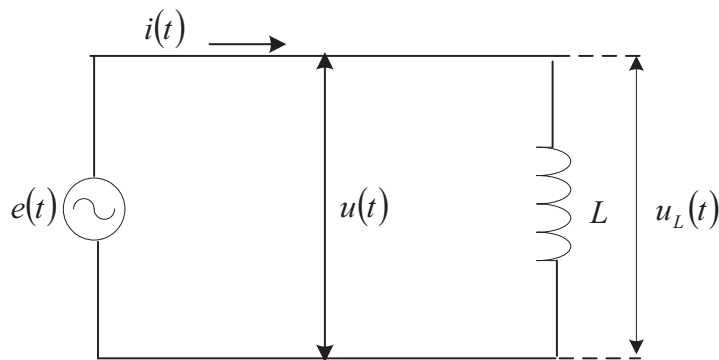
Да се напише изразот за моменталните вредности на напонот и струјата. (Одговор:  $R = 484,58 \Omega$ ,  $u(t) = 311 \sin 314t$ ,  $i(t) = 0,64 \sin 314t$ ).

#### 4.3.3. Електрично коло со идеален индуктивен калем $L$ ( $R=0$ )

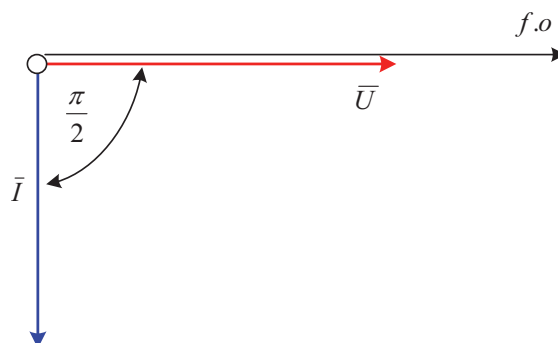
Калем, со точно дефинирани карактеристики ( $\rho, l, S, N$ ), се приклучува на еднонасочен напон, а потоа на наизменичен синусен напон. Со амперметар може да се измери струјата во двата случаи. Резултатот при мерењето ќе покаже дека во првиот случај протекува поголема еднонасочна струја од ефективната вредност во вториот случај.

Се заклучува дека при наизменична струја, калемот се спротивставува со поголем отпор, бидејќи во него се појавува дополнителен отпор.

Наизменичната струја во калемот создава променливо магнетно поле и променлив флукс, заради што се индуцира електромоторна сила на самоиндукција  $e_L(t) = -L \frac{\Delta \phi(t)}{\Delta t}$ . Таа според Ленцовиот закон се спротивставува на промената на струјата и напонот во колото.



а)



б)

Сл. 4.3.3. а) Шема за електрично коло со индуктивен калем, б) фазорски дијаграм.

На сл. 4.3.3, шематски е прикажано електрично коло со калем, приклучен на наизменичен напон:

$$u(t) = U_m \sin \omega t \rightarrow \bar{U} = U \angle 0. \quad (4.3.7)$$

Во стационарен режим, за електричното коло важи вториот Кирхофов закон:

$$u(t) - L \frac{\Delta i(t)}{\Delta t} = 0. \quad (4.3.8)$$

Со решавање на горната равенка, за промената на струјата во колото се добива:

$$i(t) = I_m \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \rightarrow \bar{I} = I \angle -\frac{\pi}{2}. \quad (4.3.9)$$

Тоа значи дека струјата заостанува во однос на доведениот напон за агол од  $\pi/2$ .

Ефективната вредност на струјата во коло со идеален калем се пресметува:

$$I = \frac{U}{X_L} = \frac{U}{\omega L}, \quad (4.3.10)$$

каде  $X_L = \omega L$  е **индуктивен отпор** на калемот и се мери во оми ( $\Omega$ ).

Во ова електрично коло, фазорот на ефективната вредност на напонот  $\bar{U}$  е во фаза со фазната оска (*f.o.*), додека фазорот на струјата  $\bar{I}$  заостанува зад фазорот од напонот за агол од  $\pi/2$ .

Моменталната вредност на електричната моќност во електричното коло се пресметува според равенката:

$$p(t) = u(t)i(t) = U_m \sin \omega t I_m \sin(\omega t - \pi/2). \quad (4.3.11)$$

Со замена на производите од синусите на двата агли, крајната равенка е:

$$p(t) = -UI \sin 2\omega t. \quad (4.3.12)$$

Од равеката може да се заклучи дека електричната моќност осцилира непрекинато од изворот до калемот, а во електричното коло не врши никаква работа и е неискористена. Затоа се нарекува **реактивна** или **јалова енергија**.

Моменталната моќност се менува со брзина  $2\omega$ , т.е. два пати побрзо од напонот и струјата.

Изворот на електрична енергија во ова електрично коло мора да ја обезбеди максималната моќност на калемот:

$$Q_L = UI = X_L I^2. \quad (4.3.13)$$

Големината  $Q_L$  во претходната равенка е јалова реактивна електрична моќност, со која електричната енергија во калемот со индуктивитет  $L$  периодично се претвора во електромагнетна енергија и обратно.

Основната мерна единица за мерење на реактивната електрична моќност е волт-ампер реактивен или вар (VAr). Реактивната моќност се мери со инструмент наречен варметер.

Електричната моќност осцилира околу средната вредност ( $P_{sr}$ ) која е еднаква на нула, бидејќи  $P_{max} = UI$ , а  $P_{min} = -UI$ , односно:

$$P_{sr} = \frac{P_{max} + P_{min}}{2} = \frac{UI + (-UI)}{2} = 0. \quad (4.3.14)$$

### Прашања

1. Каква е почетната фаза на струјата во коло со идеален калем?
2. Каква е фазната разлика помеѓу фазорот на напонот и струјата?
3. Каква електричната моќност се развива во ова електрично коло?
4. Што се случува со реактивната енергија во колото со идеален калем?
5. Која е основна мерна единица за реактивната моќност?

### Задачи

1. Идеален калем приклучен е на наизменичен извор, чиј напон има фреквенција  $f = 50 \text{ Hz}$ . При тоа тој има индуктивен отпор  $X_L = 30 \Omega$ . Да се пресмета неговиот индуктивен отпор, ако се приклучи на наизменичен извор, чиј напон има фреквенција  $f_1 = 400 \text{ Hz}$ ! (Одговор:  $X_{L1} = 240 \Omega$ )

2. Колку е индуктивитетот на соленоид, за при фреквенција на напонот на изворот  $f = 1000 \text{ Hz}$  да има индуктивен отпор  $X_L = 80 \Omega$ ? (Одговор:  $L = 127,39 \text{ mH}$ ).

3. Да се пресмета индуктивниот отпор на калем без феромагнетно јадро, со индуктивитет  $L = 50 \text{ mH}$ , приклучен на наизменичен извор со фреквенција на напонот  $f = 50 \text{ Hz}$ ! (Одговор:  $X_L = 15,7 \Omega$ )

4. Идеален калем приклучен е на наизменичен напон со фреквенција  $f_1 = 50 \text{ Hz}$  и при тоа има индуктивен отпор  $X_{L1} = 40 \Omega$ . Да се пресмета индуктивниот отпор, ако истиот се приклучи на извор со напон чија фреквенција  $f_2 = 100 \text{ Hz}$ . Колку изнесува индуктивитетот на калемот? (Решение: Индуктивниот отпор на калемот е право пропорционален со фреквенцијата на струјата што тече низ неговата намотка. Ако фреквенцијата се зголеми два пати, тогаш и неговиот индуктивен отпор ќе се зголеми два пати:  $X_{L1} = \omega_1 L = 2\pi f_1 L = 40 \Omega$ , а  $X_{L2} = \omega_2 L = 2\pi f_2 L = 2\pi(2f_1)L = 2\omega_1 L = 2X_{L1} = 2 \cdot 40 = 80 \Omega$ .)

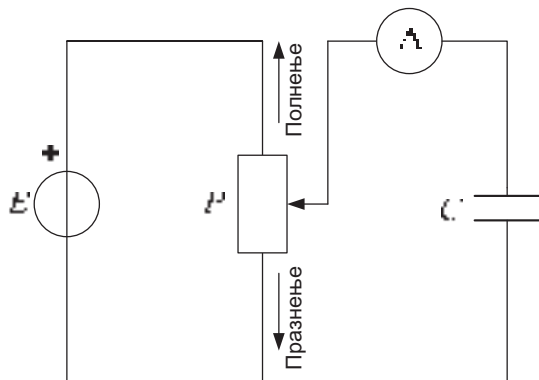
Индуктивитетот на калемот може да се пресмета:

$$L_1 = \frac{X_{L1}}{2\pi f_1} = \frac{40}{314} = 0.1274\text{H} = 127,4 \text{ mH}, \text{ а } L_2 = \frac{X_{L2}}{2\pi f_2} = \frac{80}{628} = 127,4 \text{ mH}.$$

#### 4.3.4. Кондензатор во коло со еднонасочна струја

Од електростатика е познато дека кондензаторот е составен од две метални плочи и простор меѓу нив може да биде исполнет со диелектрик. Главна негова карактеристика е неговиот капацитет кој може да се пресмета со изразот (2.5.1). Неговата голема примена произлегува од неговата способност да акумулира одредено количество електричество при релативно мали напони.

За да се објасни однесувањето на кондензаторот во коло со еднонасочна струја, ќе се разгледа електричното коло претставено на сл. 4.3.4., кое покрај кондензатор со капацитет  $C$ , содржи извор на еднонасочен напон со емс  $E$ , потенциометар  $P$  со кој може да се менува напонот на кондензаторот и еден амперметар со нула на средината на скалата, чија стрелка може да се отклонува и лево и десно.



Слика 4.3.4. Шема на електрично коло за полнење и празнење на кондензатор.

Електричната енергија што ја дал изворот се акумулира во облик на електростатичка енергија на електричното поле во диелектрикот на кондензаторот.

Ако се поместува контактот на потенциометарот нагоре, приклучениот напон се менува и во колото пак протекува струја што се регистрира со отклон на стрелката на амперметарот во иста насока како претходно. Овој отклон е резултат на дополнително движење на електрични полнежи (дополнително полнење на кондензаторот), кое трае се до воспоставување на нова рамнотежна положба.

Кондензаторот вклучен во коло со еднонасочна струја се полни за кратко време, после што престанува течењето на струјата. Тоа значи дека кондензаторот во колото со еднонасочна струја претставува бесконечно голем отпор, или како вообичаено се вели не ја пропушта еднонасочната струја.

Кога ќе се вклучи кондензаторот во колото, стрелката на амперметарот нагло се отклонува на десната страна за некој агол, а потоа нагло се враќа на нула и останува на нула, иако изворот и понатаму е вклучен во колото. Ова се објаснува на следниот начин: кога кондензаторот ќе се приклучи на еднонасочен напон во колото ќе протече еднонасочна струја и затоа постои отклон на амперметарот. Струјата ќе тече во колото се додека напонот на кондензаторот не се изедначи со приклучениот напон. Потоа станува еднаква на нула и затоа амперметарот не покажува отклон.

Ако се поместува контактот на потенциометарот надолу (сл.4.3.4), доаѓа до намалување на приклучениот напон. Напонската рамнотежа е нарушена, бидејќи напонот на кондензаторот е поголем од приклучениот напон, па ова ќе предизвика течење на струја во обратна насока. Струјата ќе тече од кондензаторот кон изворот и амперметарот ќе се отклони во спротивна насока. Значи, кондензаторот во овој случај ја враќа енергијата која ја примил во процесот на полнење и се однесува како извор на енергија.

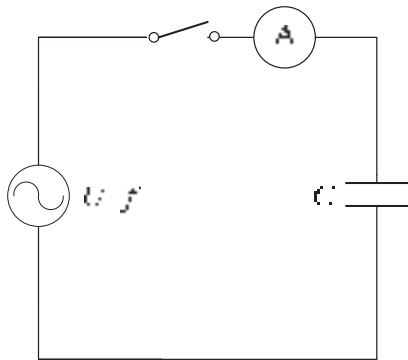
Ако контактот на потенциометарот наизменично се поместуваме горе-долу (што значи наизменично се зголемува или намалува приклучениот напон), кондензаторот наизменично ќе се полни и празни, па движењето на електричните полнежи во колото ќе биде наизменично.

### Прашања

1. Како се однесува кондензаторот во коло со еднонасочна струја?
2. Што се случува со енергијата кога кондензаторот се полни, а што кога се празни?

#### 4.3.5. Кондензатор во коло со наизменична струја

Ако кондензаторот што претходно беше разгледуван се приклучи на наизменичен напон (сл.4.3.5) кој се менува по синусен закон, полнењата и празнењата на кондензаторот наизменично ќе се повторуваат.



Амперметарот приклучен во колото постојано ќе покажува некоја ефективна вредност за струјата. Струјата е последица на непрекинатото полнење и празнење на кондензаторот. Според тоа, кондензаторот иако има диелектрик, во коло со наизменична струја не го прекинува електричното коло, т.е. кондензаторот за изменичната струја не претставува бесконечно голем отпор.

Слика 4.3.5. Шема на електрично коло на кондензатор во коло со наизменична струја.

Во електростатика споменавме дека кај диелектриците под дејство на надворешно поле доаѓа до поларизација, т.е. до поместување на полнежите на диелектриците во рамките на атомите и молекулите. Ако кондензаторот е приклучен на наизменичен напон со фреквенција  $f$ , во истиот ритам ќе се менува поларитетот на изворот, а со тоа и поларитетот и потенцијалот на електродите на кондензаторот. Електричното поле во кондензаторот, постојано ќе ја менува насоката. Тоа значи дека поларизацијата на диелектрикот ќе се одвива наизменично. При тоа настанува осцилаторно движење на врзаните полнежи во ритамот на промените на електричното поле. Тоа претставува диелектрична струја или струја на диелектрично поместување. Оваа струја постои во диелектрикот, а во проводниците во колото постои проводна или кондукциона струја. Во диелектрикот поради неговата несовершеност (идеални изолатори не постојат), покрај

струјата на диелектрично поместување, постои и проводна струја која најчесто се занемарува.

### Прашања

1. Како се однесува кондензаторот во коло со наизменична струја?
2. Каква струја тече тогаш низ диелектрикот и како настанува таа струја?

#### 4.3.6. Електрично коло со идеален кондензатор $C$ ( $R=0$ )

Шема на просто електрично коло, во кое идеален кондензатор со капацитет  $C$  е приклучен на наизменичен синусен напон, дадена е на сл. 4.3.6. а).

Напонот приклучен на краевите од кондензаторот е синусен и се пресметува по равенка:

$$u(t) = U_m \sin \omega t \rightarrow \bar{U} = U \angle 0. \quad (4.3.15)$$

Во стационарен режим на работа, во секој момент од време  $t$  важи вториот Кирхофов закон:

$$u(t) - \frac{q(t)}{C} = 0. \quad (4.3.16)$$

Од равенка 4.3.16, електричеството на плочите на кондензаторот се пресметува:

$$q(t) = C u(t) = C U_m \sin \omega t. \quad (4.3.17)$$

Бидејќи јачината на струјата претставува количина на електрицитет што ќе протече во единица време низ пресекот на проводникот, струјата што ќе протече при донесување на некое мало количество електрицитет  $\Delta q$  на плочите на кондензаторот за време  $\Delta t$  е дадена со изразот:

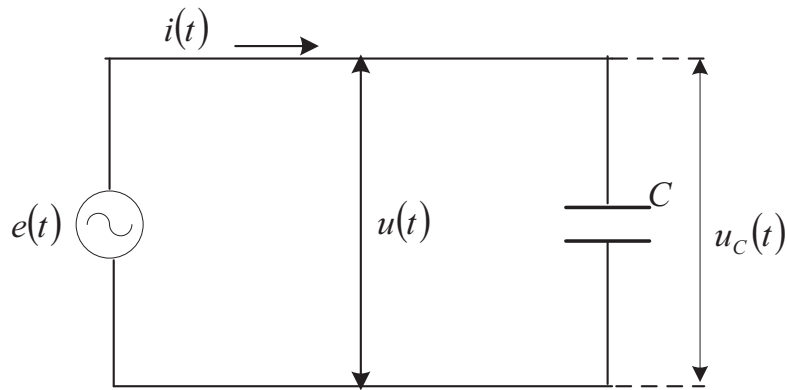
$$i = \frac{\Delta q}{\Delta t}. \quad (4.3.18)$$

Со замена на  $q(t)$  од равенката 4.3.17 во 4.3.18 и со понатамошно решавање, за моменталната вредност на струјата во електричното коло се добива:

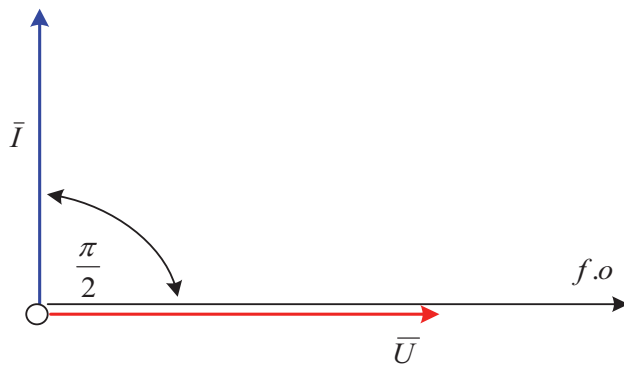
$$i(t) = \frac{U_m}{\frac{1}{\omega C}} \sin(\omega t + \pi/2) = \frac{U_m}{X_C} \sin(\omega t + \pi/2) = I_m \sin(\omega t + \pi/2). \quad (4.3.19)$$

Значи за промената на струјата во електричното коло се добива:

$$i(t) = I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \rightarrow \bar{I} = I \angle \frac{\pi}{2}. \quad (4.3.20)$$



а)



б)

Сл. 4.3.6. а)Шема на електрично коло со кондензатор б)фазорски дијаграм.

Во равенката за струјата  $X_C = \frac{1}{\omega C}$  има димензија на отпор и се нарекува реактивен капацитивен отпор на кондензаторот, а  $I_m = \frac{U_m}{X_C}$  е максимална вредност на наизменичната струја.

Од равенката 4.3.20, се заклучува дека фазорот на струјата  $\bar{I}$  во ова електрично коло е поместена **пред** фазорот на напонот  $\bar{U}$  за агол од  $\pi/2$ . Фазорскиот дијаграм е даден на сл. 4.3.6.б).

Моменталната моќност во колото се пресметува:

$$p(t) = u(t)i(t) = U_m \sin(\omega t) I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (4.3.21)$$

Слично, како во колото со идеален калем, се врши замена на производот од синусите од двата агли, при што за пресметување на моменталната електрична моќност се добива крајната равенка:

$$p(t) = UI \sin 2\omega t \quad (4.3.22)$$

Моменталната електрична моќност во електрично коло со идеален кондензатор, се менува со двојна брзина  $2\omega$ , во однос на брзината со која се менуваат напонот и струјата.

Енергијата осцилира непрекинато од изворот до кондензаторот, а во електричното коло не врши никаква работа и е неискористена и се нарекува реактивна или јалова енергија.

Електричната моќност осцилира околу средната вредност ( $P_{sr}$ ) која е еднаква на нула, бидејќи  $P_{max} = UI$ , а  $P_{min} = -UI$ , односно:

$$P_{sr} = \frac{P_{max} + P_{min}}{2} = \frac{UI + (-UI)}{2} = 0. \quad (4.3.23)$$

За да се одржи електродинамичката стабилност на електричното коло, изворот на електрична енергија мора да ја обезбеди максималната моќност ангажирана од кондензаторот:

$$Q_C = UI = X_C I^2. \quad (4.3.24)$$

Големината  $Q_C$  е јалова реактивна моќност во кондензаторот со која електричната енергија периодично се претвора во електростатичка и обратно.

Основна мерна единица за мерење на оваа реактивна електрична моќност е VAr (волт-ампер реактивен).

### Прашања

1. Колкава е фазната разлика помеѓу напонот и струјата во коло со идеален кондензатор?
2. Колкава е средната моќност во коло со идеален кондензатор?
3. Која е основна мерна единица за реактивната моќност?
4. Како се пресметува реактивната моќност во коло со идеален кондензатор?

### Задачи

1. Ако еден кондензатор, при фреквенција на изворот  $f_1 = 50 \text{ Hz}$  има реактивен отпор  $X_{C1} = 40 \Omega$ , колкав е неговиот реактивен отпор, при фреквенција на изворот  $f_2 = 100 \text{ Hz}$ ? (Одговор:  $X_{C2} = 20 \Omega$ )

2. Колку изнесува реактивниот отпор на кондензаторот со капацитет  $C = 125 \mu\text{F}$ , ако тој се приклучи на наизменичен извор со фреквенција  $50 \text{ Hz}$ ? (Одговор:  $X_C = 25,48 \Omega$ ).



3. Колку изнесува фреквенцијата на извор, со ефективна вредност на напон  $U = 110 \text{ V}$ , ако низ колото со кондензатор, чија капацитет  $C = 50 \mu\text{F}$ , приклучен на изворот, тече струја со ефективна вредност  $I = 2,14 \text{ A}$ ! (Решение: Се пресметува реактивниот отпор на

кондензаторот:  $X_C = \frac{U}{I} = \frac{110}{2,14} = 51,4 \Omega$ . Фреквенцијата на изворот се пресметува од

равенката:  $X_C = \frac{1}{2\pi fC} \Rightarrow f = \frac{1}{2\pi CX_C} = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 51,4} = 62 \text{ Hz}$ .

**ЗАПОМНИ:**

1. Временски променлива струја е онаа што во текот на времето произволно го менува интензитетот и насоката или двете вредности истовремено. Временски периодични струи се струите чии моментални вредности се повторуваат во еднакви временски интервали. За променливата струја секогаш треба да се избере референтна насока. Простопериодичните големини што се разгледуваат во електротехниката се големините чија вредност хармониски се менуваат во однос на времето по синусен закон. Наизменичните големини (напон и струја) во пракса се добиваат со генератор за наизменична струја. Моменталната вредност на индуцираната емс се изразува со равенката:  $e(t) = E_m \sin(\omega t + \theta)$ . Во неа  $e(t)$  е нејзина моментална вредност,  $E_m$  е нејзина максимална вредност, изразот во заградата  $(\omega t + \theta)$  е нејзина фаза, додека само  $\theta$  се нарекува почетна фаза во моментот  $t = 0$ . Почетната фаза на наизменичната струја се означува со  $\psi$ .

2. Временскиот интервал за кој наизменичната струја прави една полна промена (еден циклус) се нарекува период  $T$ . Количникот помеѓу бројот на циклуси ( $N$ ) и времето  $t$ , за кое тие се направени се нарекува фреквенција ( $f$ ) на наизменичната струја ( $f = N/t = 1/T$  Hz). Кога генераторот за наизменична струја има еден пар на полови ( $p = 1$ ), фреквенцијата ќе биде еднаква со бројот на вртежи на генераторот ( $f = n$ ), додека при  $p > 1$ , ( $f = pn$ ). Ако е познат аголот  $\alpha$  во  $t = 0$ , за наизменичната големина, соодносот  $\alpha/t = \omega = 2\pi f$  rad/s ја претставува аголната брзина со која се врти намотката.

3. Ефективна вредност на наизменичната струја е нејзина постојана вредност, еднаква на вредноста што треба да ја има еднонасочната струја, при што за време од една периода  $T$ , Џуловиот ефект низ отпорник  $R$  (развиената топлотна енергија)  $W_{\sim}$  биде еднаков со ефектот на наизменична струја  $W_{\sim}$ . Таа се пресметува со равенката:  $I = I_m / \sqrt{2} = 0.707 I_m$ . Ефективата вредност на напонот се пресметува:  $U = U_m / \sqrt{2} = 0.707 U_m$ .

4. Средната вредност на наизменичната струја  $I_{sr}$  е вредноста што треба да ја има еднонасочната струја, за да даде исто количество електричество  $Q_{\sim}$ , како и наизменичната струја  $i(t)$  во текот на позитивната полупериода  $Q_{\sim}$ . Средната вредност на наизменичната струја и напон се пресметува:  $I_{sr} = 2/\pi I_m$  и  $U_{sr} = 2/\pi U_m$ .

5. Со цел да се поедностави математичкиот апарат при пресметувања во електрични кола со наизменичен напон, максималните или ефективните вредности на наизменичните големини најчесто се претставуваат со вектори кои се вртат во една рамнина. Тие се нарекуваат фазори  $\bar{U}_m, \bar{I}_m, \bar{E}_m$ , за максималните вредности или

$\bar{U}, \bar{I}, \bar{E}$ , (модули) за нивните ефективни вредности. Аглите кои ги зафаќаат со фазната оска  $(\theta, \psi)$  се нарекуваа аргументи.

6. Во коло со наизменичен синусен напон  $u(t) = U_m \sin \omega t$ , каде е вклучен идеален активен отпор, струјата се менува по равенката  $i(t) = I_m \sin \omega t$ , односно струјата и напонот се поместени за агол 0. Во колото постои само активната електрична моќност која се пресметува со равенката  $P = UI$ , а основна мерна единица е ват (W).

Во коло со идеален калем, приклучен на синусен напон, струјата заостанува зад напонот за агол од  $-\pi/2$  и се менува по равенката  $i(t) = I_m \sin(\omega t - \pi/2)$ . Во колото постои само јалова моќност  $Q = X_L I^2$ . Основна мерна единица е волт-ампер реактивен (VAr).

Во коло со идеален кондензатор, приклучен на синусен напон, струјата е пред напонот за агол од  $+\pi/2$  и се менува по равенката  $i(t) = I_m \sin(\omega t + \pi/2)$ . Во колото постои само јалова моќност  $Q = X_C I^2$ . Основна мерна единица е волт-ампер реактивен (VAr).



## 5. СТРУКТУРА И ЕЛЕКТРИЧНИ ОСОБИНИ НА МАТЕРИЈАТА

### 5.1. СТРУКТУРА НА МАТЕРИЈАЛИТЕ

Според моделот на атомот на научникот Нилс Бор од 1913 година (сл. 1.1.1, поглавие 1. од овој учебник), електроните кружат околу јадрото по точно определени орбити, сместени во различни рамнини во просторот. Во електрониката се работи со поедноставен модел на атомот, каде орбитите се сместени во една рамнина. Тие се обележуваат со латинските букви  $K$ ,  $L$ ,  $M$ ,  $N$ ,  $P$  и  $Q$ , во насока од јадрото, сл. 5.1.1. а).

Во секоја орбита, точно е дефиниран максималниот можен број на електрони.

Начинот на пополнување на орбитите е таков, да најнапред се пополнуваат орбитите најблиску до јадрото, а потоа останатите. При тоа, електроните во невозбудена состојба заземаат положба, во која имаат најмала енергија.

Силата која ги поврзува електроните со јадрото се намалува, при оддалечување на електронот од јадрото. На електроните од последната орбита во атомот им е потребна најмала енергија за да го напуштат атомот.

Електроните во орбитите имаат строго одредени енергии кои се нарекуваат **дискретни енергии**. Ако електронот преминува од една стационарна состојба во која има енергија  $E_a$  во друга стационарна состојба со енергија  $E_b$  (преминува од една на друга орбита), тој прима или оддава енергија.

Фреквенцијата на примената или оддадената енергија е:

$$f = \frac{E_a - E_b}{h} \text{ Hz}, \quad (5.1.1)$$

каде што:  $E_a, E_b$  се енергии на електронот, со основна мерна единица **електронволт** (eV), додека  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Js е Планкова константа со основна мерна единица **кулсекунда** (Js).

Електронот во стационарна состојба се движи во круг со радиус  $r$ . Обемот на кругот по кој се движи е цел број од брановата должина на електронот:

$$2\pi r = n\lambda = \frac{nh}{mv}, \text{ каде } n = 1, 2, 3, \dots \quad (5.1.2)$$

Енергијата на електроните во дискретните енергетски нивоа се пресметува според равенката:

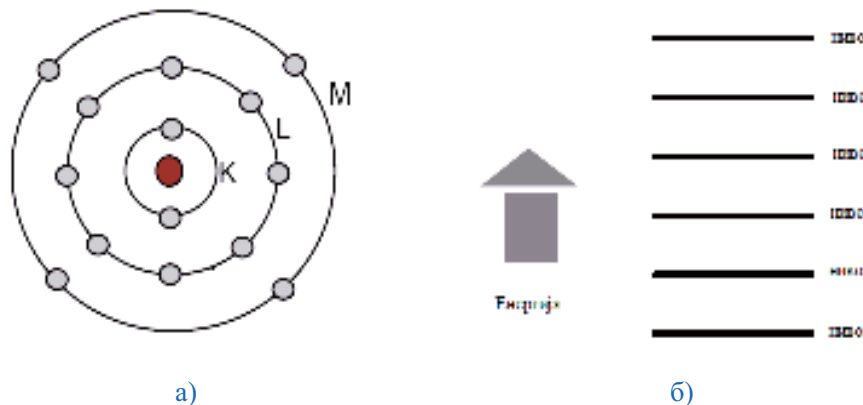
$$E = -13.6 \frac{Z^2}{n^2}. \quad (5.1.3)$$

Во горната равенка,  $Z$  го означува бројот на протони во јадрото. Енергија од  $1 \text{ eV}$  е кинетичката енергија на електронот кој се забрзува со потенцијална разлика од  $1 \text{ V}$ .

Електроните од последната орбита кои најлесно можат да го напуштат атомот се нарекуваат **валентни електрони**.

Од бројот на валентни електрони и енергетското ниво зависат хемиските и електричните својства на материјата. Електроните во елементите чии атоми имаат непополнети надворешни орбити, полесно стапуваат во реакција со атомите од други хемиски елементи, затоа тие се нарекуваат **хемиски активни**.

Модел на изолиран атом во една рамнина и енергиите на електроните во орбитите (енергетските нивоа) се дадени на сл. 5.1.1 а и сл.5.1.1.б, респективно.



Сл. 5.1.1. а) Модел на еден атом, б) енергетски нивоа на осамен атом.

Под влијание на надворешна енергија, ако некој електрон прими доволно количество енергија, го напушта атомот. Неговото вкупно електричество ќе биде позитивно. Таков атом се нарекува **позитивен јон**.

Ако пак атомот, во последната орбита прими електрон од соседен атом, вкупното електричество станува негативно. Таков атом се нарекува **негативен јон**.

Процесот на испуштање или примање на електрони се нарекува **јонизација**.

Електроните кои ја напуштаат орбитата во атомот, го продолжуваат движењето во просторот на атомот и преминуваат во **слободни електрони**.

Овие електрони се движат хаотично во просторот, се судираат меѓусебно, примаат и оддават енергија.

Под влијание на електрично поле, **слободните електрони се движат насочено**, а таквото движење знаеме дека се нарекува **електрична струја**.

Ако повеќе **различни** атоми се приближуваат за да се формира кристална структура, електроните кои имале исти енергетски нивоа во **различните** атоми, **неможат да ги задржат истите вредности на енергијата** (заради ефекти кои се случуваат во квантната

механика). Тука секое енергетско ниво, се дели на повеќе многу блиски енергетски поднивои кои формираат **енергетски зони** сл. 5.1.2. Внатре во зоната, електроните имаат точно дефинирани дискретни вредности на енергија. Вкупната енергетска разлика во една зона е помала од термичката енергија што електронот ја има на собна температура. Затоа електронот лесно се движи внатре во зоната.

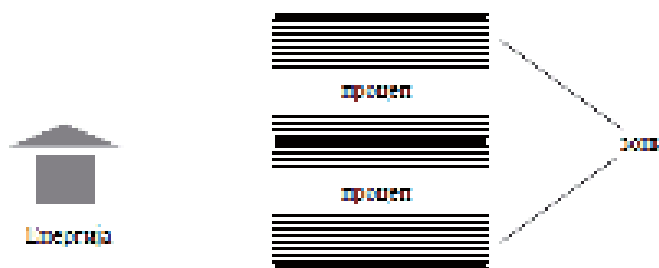
Разликата на енергиите помеѓу две зони, се нарекува **енергетски процеп** или **забранета зона**. Овие енергии се забранети, се обележуваат со  $E_G$  и електроните во кристалот не може да ги поседуваат. Основна мерна единица за овие енергии е електронволт (eV).

Со помош на енергетските процепи се дефинирани различните материјали во електротехниката.

На температура од апсолутна нула, **највисоката енергетска зона** од јадрото што е **комплетно пополнета со електрони** се нарекува **валентна зона**.

**Повисоката зона што е празна** и нема електрони при апсолутна нула се нарекува **проводна зона**.

Помеѓу овие две зони се наоѓа **забранетата зона** или **процеп**.



Сл. 5.1.2. Енергетски зони на електроните во кристалната решетка.

## 5.2. ЕЛЕКТРИЧНИ СВОЈСТВА НА МАТЕРИЈАТА

Според големината на енергетскиот процеп се дефинирани електричните својства на материјалите. Кај изолаторите, овој енергетски процеп е толку голем, така што на електронот од валентната зона, треба да му се даде голема енергија, за да премине од валентната во проводната зона. Затоа изолаторите имаат мал број слободни електрони, а со тоа и мала електрична проводност сл. 5.2.1.а.

За разлика од изолаторите, кај проводниците валентната и проводната зона се преклопуваат. Затоа постои голем број слободни електрони, кои **под дејство на електрично поле** би создале **насочено движење на слободните електрони**, односно **електрична струја** сл. 5.2.1.б.

Кај полупроводниците, енергетскиот процеп при номинална температура има вредност помеѓу онаа на изолаторите и проводниците сл. 5.2.1.в.

Како **проводници** најчесто се применуваат алуминиумот, бакарот, среброто и др.

Металите на собна температура имаат поголем број на слободни електрони.

Тие не се врзани за некој атом и можат слободно да се движат од атом до атом низ металот. Нивната насока на движење се менува после секој судар со атомите од кристалната решетка. Нивното движење е хаотично, затоа низ замислен пресек на металот, поминуваат ист број на електрони во двете насоки. Средната струја низ пресекот е нула.

Ако на металот дејствува константно електрично поле  $E(V/m)$ , на хаотичното движење на електроните се суперпонира **насочено-дрифтно** движење на електроните во насока на електричното поле.

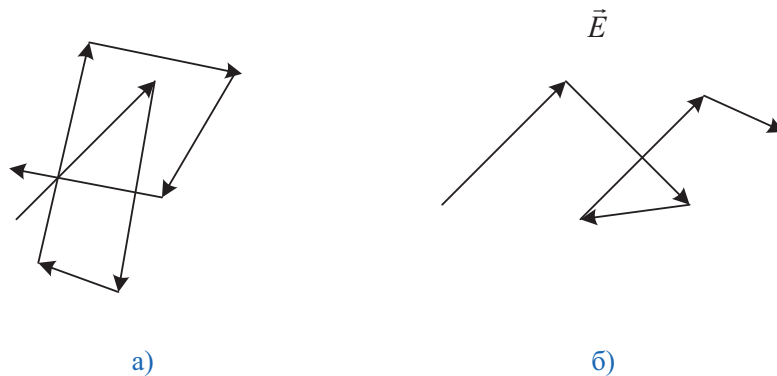


Сл. 5.2.1. Шематско прикажување на енергетските зони: а) изолатор, б) проводник, в) полупроводник.

Средната брзина што ја добива електронот се нарекува **дрифтна брзина**, се обележува со  $v_d$ . Основна мерна единица за неа е  $m/s$ , а се пресметува според равенката:

$$v_d = \mu E. \quad (5.2.1)$$

Во равенката  $\mu$  е **подвижност на електроните**, а основна мерна единица е  $m^2/Vs$ .



Сл.5.2.2. а) Хаотично движење на електронот, б) насочено движење на електронот под влијание на електрично поле  $\vec{E}$ .



Подвижноста на електроните зависи од особините на металот и од температурата.

Дрифтната брзина е во спротивна насока од насоката на доведеното електрично поле.

Течните проводници се нарекуваат **електролити** и кај нив слободни електрични полнежи се јоните на кои се разложуваат молекулите на солите, киселините или базите.

Во групата на изолатори припаѓаат: воздух, хартија, парафин, дрво, стакло, гума, дестилирана вода и др.

Во природата не постои материјал кој е идеален изолатор. Кај реалните изолатори, секогаш има одреден број слободни електрични полнежи, но нивниот број е толку мал што може да се занемари. **Идеален изолатор е вакуумот.**

**Полупроводниците** најчесто се изработуваат од силициум и германиум со различни примеси.

### Прашања:

1. Каква е структурата на јадрото според Боровиот модел?
2. Каде е сместена вкупната маса на атомот?
3. Што е елементарен електричен полнеж?
4. Што е енергетско ниво?
5. Кога се добиваат енергетските зони?
6. Што се формира помеѓу енергетските зони во кристалната структура на материјата?
7. Што е разликата меѓу изолаторите, проводниците и полупроводниците?
8. Дефинирај струја во металите!

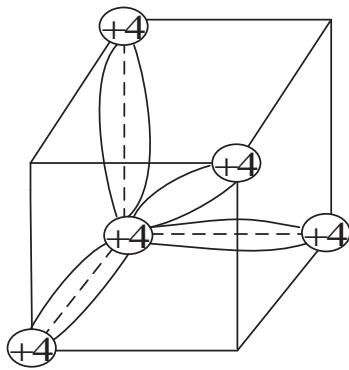
### 5.3. ПОЛУСПРОВОДНИЦИ

Во производството на полупроводнички компоненти, како основен материјал се користи силициумот, со хемиски знак  $Si$  и германиумот, со хемиски знак  $Ge$ . Силициумот има одредени предности во однос на германиумот од технолошка природа.

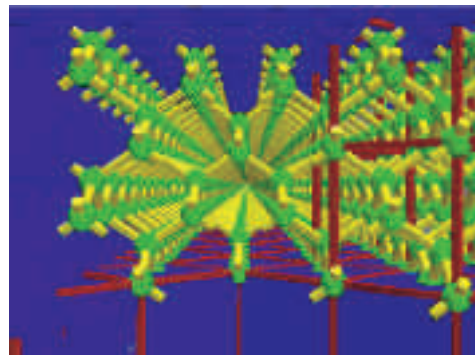
Силициумот и германиумот се четривалентни хемиски елементи и се наоѓаат во четвртата колона од периодниот систем. Силициумот зазема четиринесетто, а германиумот триесет и второ место. Тоа значи дека атомот на силициумот има 14, а атомот на германиумот 32 електрони.

Во јадрото на атомот на силициумот има исто така 14 протони и 14 неутрони, а 32 протони и неутрони во јадрото на германиумот.

Распоредот на електроните по орбитите во силициумот е следен: во  $K$  орбитата 2 електрони, во  $L$ -8 и  $M$ -4 електрони. Последната орбита  $M$ , односно последното енергетско ниво, може да прима 8 електрони, тоа значи дека кај силициумот се непополнети 4 електрони. Исто така и германиумот во последната орбита има 4 валентни електрони. Затоа, при претставувањето на кристалната структура на силициумот (сл.5.3.1) и германиумот, доволно е да се претстават со 4 валентни електрони и со исто толкав број на протони.



а)

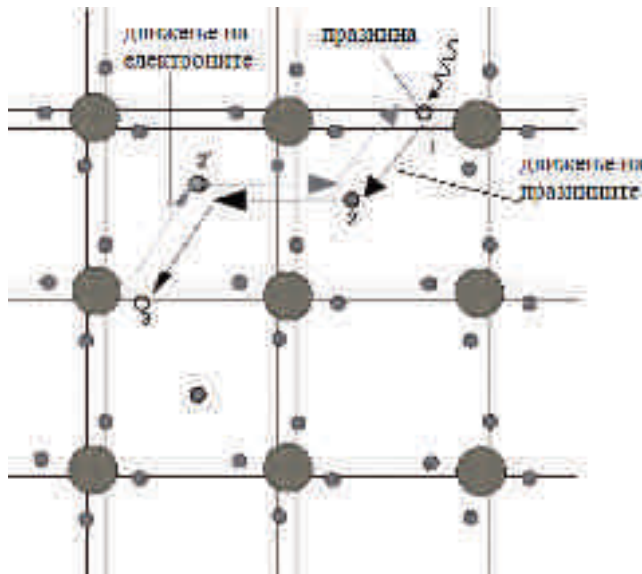


б)

Сл.5.3.1. Просторна кристална структура на чист силициум: а) модел, б) фотографија.

### 5.3.1. Чисти полупроводници

Во кристалната решетка на полупроводникот, секој од четирите валентни електрони стапува во врска со по еден валентен електрон од четирите соседни атоми. Доаѓа до преплетување на патеките на валентните електрони од соседните атоми, слично на алки од синџир, наречени **ковалентни врски**. Тоа значи дека два електрони, се движат по заедничка орбита, која ги опфаќа јадрата на двата соседни атоми, сл. 5.3.2.



Во чистите полупроводници при температура на апсолутна нула,  $0^\circ \text{K} = -273^\circ \text{C}$ , електроните од валентната зона немаат енергија да преминат во проводната зона. Ако се доведе надворешна енергија (топлина, светлина,...), некои валентни електрони добиваат енергија да преминат во проводната зона. Овие електрони зад себе во материјалот оставаат **непополната празнина**, која може да се третира како **елементарно позитивно електричество**.

Сл. 5.3.2. Ковалентни врски во кристална структура на чист силициум, претставени во една рамнина.

Создавањето на пар електрон-празнина се нарекува **генерација**. Некој друг електрон, кој исто така напуштил атом, може да ја пополни празнината.

Процесот на **пополнување на празнините** се нарекува **рекомбинација**. Од тоа произлегува дека електроните и празнините се движат во спротивни насоки.

Исто така следува заклучокот дека во чист полупроводник бројот на генерирани електрони  $n_i$  или празнини  $n_p$  секогаш е ист, сл. 5.3.2.

Проводноста на чистите полупроводници е многу мала. Затоа во пракса се користат полупроводници со примеси, со што се менуваат нивните својства.

### 5.3.2. Полупроводници од $n$ тип

Во пракса, проводноста на чистите полупроводници се зголемува со додавање на одредена примеса (нечистотија) со соодветни технолошки постапки. Додавањето на најмала концентрација од нечистотии значајно ја зголемува проводноста. Реално, концентрацијата на нечистотиите е во граници од  $10^{20}$  до  $10^{26}$  во кубен метар.

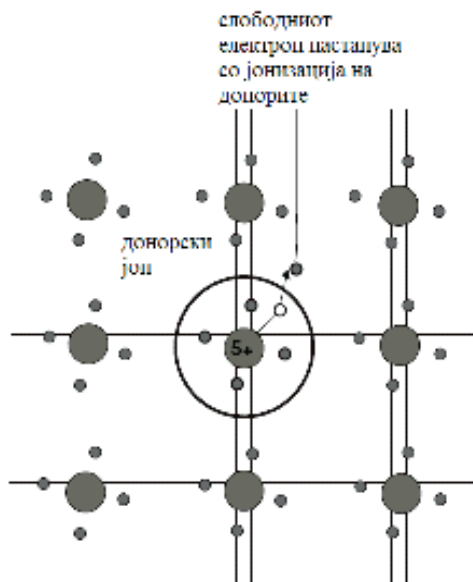
Примесите се елементи кои во надворешната орбита имаат 3 или 5 валентни електрони.

Полупроводник од  $n$  тип се добива кога на чистиот четривалентен силициум  $Si$  се додадат петвалентни примеси: фосфор, астатан, арсен, антимон и други.

Ако на чистиот кристал на полупроводникот му се додадат петвалентни примеси, кристалната структура се менува. Четирите електрони од петвалентниот елемент (на пр. антимон) влегуваат во ковалентни врски со соседните атоми од силициумот. Петтиот електрон не може да се вклопи во кристалната структура на атомот од силициумот и станува слободен. Поточно тој електрон од примесата може да го напушти атомот, ако му се даде мала енергија и да стане **слободен електрон** дури и на собна температура (сл. 5.3.3).

Овој слободен електрон може да се движи, додека позитивно наелектризираниот атом на примесата останува во кристалната структура на полупроводникот.

**Петвалентните примеси** се нарекуваат **донори**. Во кристалната решетка останува јонизиран донорски атом со позитивен полнеж.

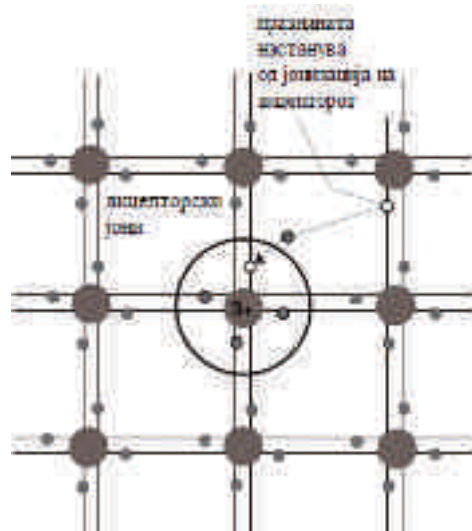


Сл. 5.3.3. Кристална структура на  $n$  тип полупроводник претставен во една рамнина.

Концентрацијата на слободните електрони е многу повисока од концентрацијата на празнините. Затоа вака добиениот полупроводник се нарекува полупроводник од  $n$  тип.

### 5.3.3. Полупроводници од $p$ тип

Слично, со додавање на тровалентен елемент се добива полупроводник од  $p$  тип. Во техничката пракса такви елементи се: бор, галиум, индиум и други. Тие се нарекуваат акцептори. Трите електрони формираат цврсти ковалентни врски, додека четвртата врска останува непополнета и тежи да се пополни со некој електрон од соседните атоми. На местото од тој електрон се јавува празнина. Таа празнина може да се пополни со друг електрон и тн. На сл. 5.34, е дадена кристалната структура на полупроводник од  $p$  тип.



Сл. 5.3.4. Кристална структура на  $p$  тип полупроводник претставен во една рамнина.

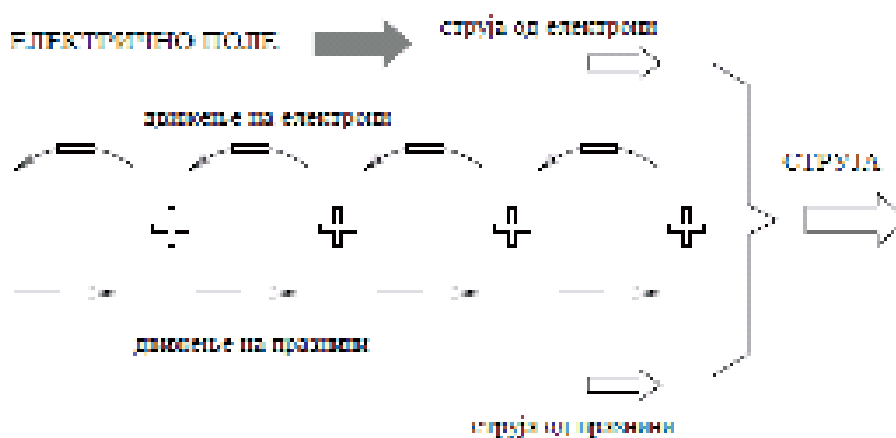
Кај полупроводниците од  $p$  тип, во валентната зона, концентрацијата на шуплините е многу поголема од онаа на слободните електрони. Затоа вака добиениот полупроводник се нарекува полупроводник од  $p$  тип.

Важно е да се напомене дека во полупроводниците од  $n$  тип и од  $p$  тип, во кои главни носители се слободните електрони и шуплините респективно, се појавуваат и таканаречени споредни (миноритетни) носители на електрицитет. Споредните носители на електрицитет се празнините во  $n$  тип полупроводник и слободните електрони во полупроводник од  $p$  тип. Исто така познато е дека подвижноста на празнините е трипати помала од подвижноста на слободните електрони.

Под дејство на електричното поле во полупроводникот се воспостаува движење на електроните во насока спротивна од насоката на електричното поле и "движење на празнините" во насока на електричното поле.

Струите кои се појавуваат како последица на овие движења алгебарски се собираат, секако земајќи го во предвид предзнакот на електрицитетот.

Сликовито прикажување на влијанието на електричното поле врз слободните електрони и празнините е дадено на сл. 5.3.5.



Сл. 5.3.5. Движење на електроните и празнините под влијание на електричното поле.

### Прашања:

1. Колку електрони може да има во последната орбита?
2. Што е ковалентна врска и како се остварува?
3. Како настанува пар електрон-празнина во чист полупроводник?
4. Што е рекомбинација на електроните и шуплините?
5. Како се добива полупроводник од  $n$  тип?
6. Кои елементи можат да послужат како примеси за добивање полупроводник од  $n$  тип?
7. Каква е проводноста на елементите со примеси?
8. Како се добива полупроводник од  $p$  тип?
9. Кои елементи се употребуваат како примеси за добивање полупроводник од  $p$  тип?

**ЗАПОМНИ:**

1. Електроните во орбитите имаат строго одредени енергии кои се нарекуваат дискретни енергии. Ако електронот преминува од една стационарна состојба во која има енергија  $E_a$  во друга стационарна состојба со енергија  $E_b$  (преминува од една на друга орбита), тој прима или оддава енергија.

2. Електроните од последната орбита кои најлесно можат да го напуштат атомот се нарекуваат валентни електрони. Електроните кои ја напуштаат орбитата во атомот, го продолжуваат движењето во просторот на атомот и преминуваат во слободни електрони.

3. Разликата на енергиите помеѓу две зони, се нарекува енергетски процеп или забранета зона. Според големината на енергетскиот процеп се дефинирани електричните својства на материјалите. Кај изолаторите, овој енергетски процеп е толку голем, а кај проводниците валентната и проводната зона се преклопуваат. Кај полупроводниците, енергетскиот процеп при номинална температура има вредност помеѓу онаа на изолаторите и проводниците.

4. Чист полупроводник е полупроводник кој нема примеси.

5. Полупроводник од *n* тип се добива кога на чистиот четиривалентен силициум *Si* се додадат петвалентни примеси: фосфор, астатан, арсен, антимон и други. Со додавање на тровалентен елемент (бор, галиум, индиум) на чистиот полупроводник се добива полупроводник од *p* тип.

## 6. Полупроводнички диоди

### 6.1. *PN* спој

#### 6.1.1. Создавање на *pn* спој

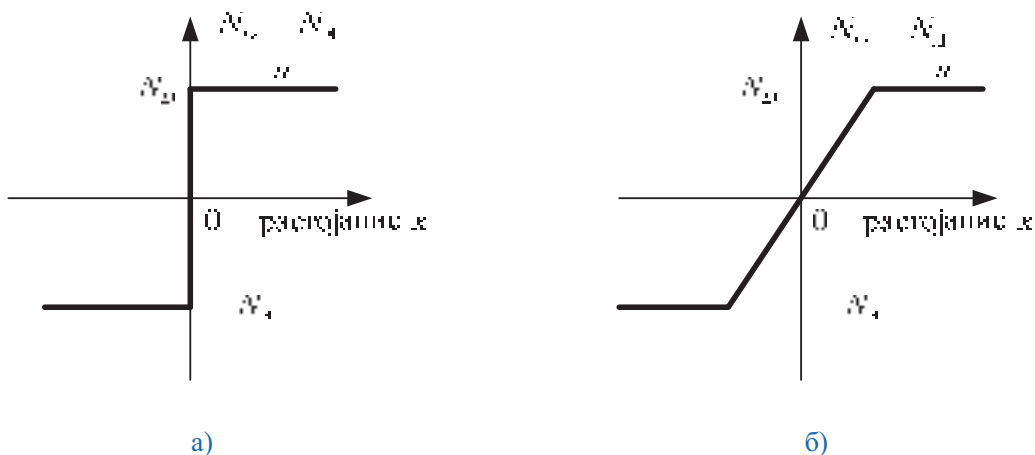
Повеќето полупроводнички компоненти, во суштина, се спој од два полупроводници од различен тип, односно спој на полупроводник од *p* тип и од *n* тип.

При соединувањето на полупроводници од *p* тип и од *n* тип се добиваат нови својства на полупроводнички компоненти, што наоѓаат примена во полупроводничката електроника. Соединувањето се прави со многу сложена технолошка постапка. При тоа, треба да се зачува монокристалната структура на материјалот и во еден дел од кристалот се додаваат акцепторски нечистотии, а во другиот донорски нечистотии.

Во полупроводникот, со  $N_D$  се означува концентрација на донорски атоми во единица волумен, а со  $N_A$  се означува концентрација на акцепторски атоми во единица волумен. Со  $n$  се означува концентрација на слободни електрони во кристалот, а со  $p$  концентрација на празнини во кристалот. Законот за електрична неутралност е претставен со равенката:

$$N_D + p = N_A + n. \quad (6.1.1)$$

Преминувањето на полупроводник од *p* тип во полупроводник од *n* тип, може да се изведе со постапка на легирање, каде се добива скоковит премин, сл. 6.1.1.а. и со извлекување, каде се добива постепен премин, сл. 6.1.1.б.



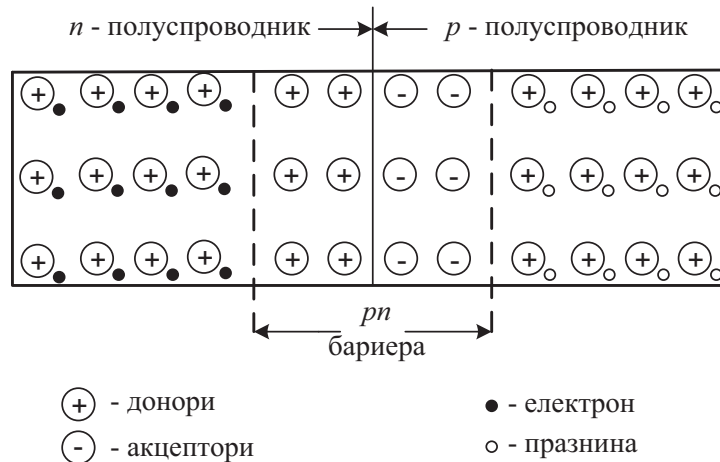
6.1.1. *pn* спој добиен по пат а) на легирање, б) со извлекување.

Кога  $pn$  спојот се наоѓа на константна температура, не е приклучен на напон и други надворешни влијанија, тој се наоѓа во рамнотежа и не тече струја.

На металуршката граница на полупроводниците, концентрацијата на електрони е многу поголема во полупроводникот од  $n$  тип од онаа во полупроводникот од  $p$  тип, а тоа предизвикува дифузно движење на електроните и празнините во насока од поголемата кон помалата концентрација. Ваквото движење има за цел да се изедначи концентрацијата на носителите на електрицитет во сите подрачја и се нарекува електрична струја од дифузија или **дифузиона електрична струја**.

Истото важи и за празнините кои се движат од  $p$  кон  $n$  спојот, што е прикажано на сл. 6.1.2. При движењето на едни кон други, на самата граница на спојот, доаѓа до рекомбинација, т.е. празнините се пополнуваат со електрони. Така, околу самиот спој, се создава **еден слој** кој го напуштиле и електроните и празнините и кој во еден дел претставува позитивен електрицитет (некомпензирани позитивни јони-десно од спојот), односно негативен електрицитет (некомпензирани негативни јони-лево од спојот), респективно (сл. 6.1.2).

Бидејќи околу спојот од една страна се формирал негативен електрицитет, а од другата позитивен електрицитет, во тој дел се воспоставува електрично поле, кое има насока од позитивниот кон негативниот електрицитет. Односно, се **формира електрично поле кое се спротиставува на понатамошното движење на електроните и празнините**. Ова поле е најсилно на местото на спојот.



Сл. 6.1.2.  $pn$  спој во момент на создавање и формирање на подрачје на потенцијална бариера.

Тогаш се вели дека внатре во  $pn$  спојот се формира **слој на просторен полнеж**,  $pn$  бариера или **преоден слој**.

Разликата на потенцијалите  $U_k$  помеѓу крајните точки на слојот се нарекува **контактна разлика на потенцијали** или **потенцијална бариера**.

На собна температура, разликата на потенцијали на оваа бариера изнесува 0,2 V за силициумот и 0,6 V за германиумот. Прикажаната концентрација на сл. 6.1.2 е за полупроводници од  $p$  и  $n$  тип со иста концентрација на примеси.



### 6.1.2. Директно поларизиран $pn$ спој

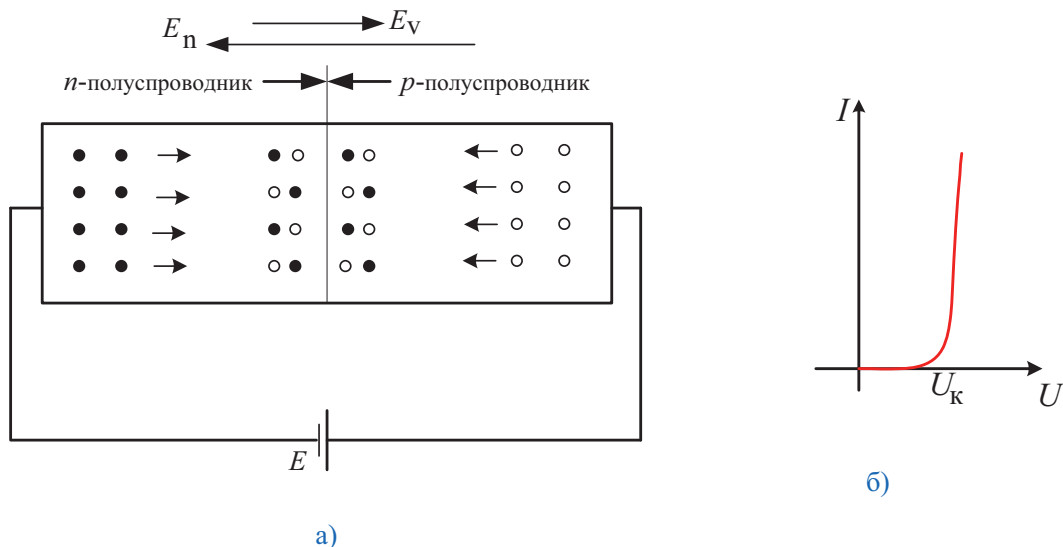
При директна поларизација на  $pn$  спојот се користи надворешен извор и позитивниот пол на изворот се приклучува на  $p$  страната, а негативниот пол на  $n$  страната.

Во  $p$  областа постојат многу подвижни празнини кои тука се главни носители, а во  $n$  областа постојат многу подвижни електрони кои се главни носители на електрицитет. Во  $pn$  спојот постои **просторен полнеж** кој создава, како што беше претходно кажано, свое внатрешно електрично поле  $E_v$  насочено од областа  $n$  кон областа  $p$ .

На вака формиранит  $pn$  спој, се приклучува надворешен извор кој создава електрично поле  $E_n$  насочено како на сл. 6.1.3.а. Под дејство на ова поле доаѓа до движење на слободните носители на електрицитет и тоа, празнините во насока на полето во  $p$  областа, а електроните во обратна насока од полето во  $n$  областа.

Ако приклучениот надворешен напон е поголем од напонот на потенцијалната бариера, надворешното поле е поголемо од внатрешното, па резултантното поле е во насока на надворешното поле. Ова поле ги потиснува празнините во  $n$  областа и електроните во  $p$  областа. Празнините кога ќе дојдат во  $n$  областа се рекомбинираат со електроните кои овде нормално се наоѓаат. На местото на рекомбинираните празнини постојано доаѓаат нови од  $p$  областа, а на местото на рекомбинираните електрони доаѓаат нови од металниот приклучок.

Слична појава се одвива и во  $p$  областа. Електроните од во  $n$  областа тука се рекомбинираат со празнините кои овде нормално се наоѓаат, на нивно место постојано доаѓаат нови електрони од во  $n$  областа, а на местото на рекомбинираните празнини доаѓаат нови, кои се добиваат со одење на електроните кон металниот приклучок.



Сл. 6.1.3. а) Директна поларизација на  $pn$  спој, б) карактеристика на  $pn$  спој при директна поларизација.

Ваквото постојано движење на главните носители на електрицитет под дејство на електричното поле од надворешниот извор, ја дава струјата низ  $pn$  спојот.

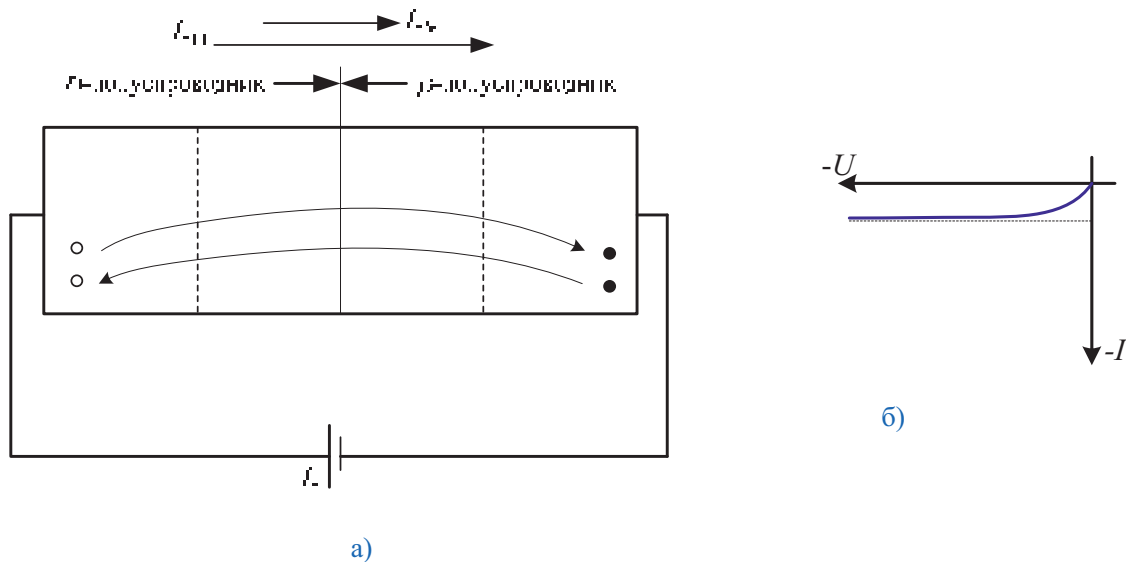
При директна поларизација доаѓа до намалување на потенцијалната бариера.

Ако надворешниот напон се зголемува, струјата нагло расте (сл. 6.1.3.б) и најчесто е од ред на големина mA или A. Од сл. 6.1.3.б се гледа дека напонот на директна поларизација треба да се зголеми до некоја вредност и дури тогаш да почне течење на поголема струја. Всушност, надворешниот извор треба да ја совлада потенцијалната бариера на *pn* спојот и дури тогаш да почне течењето на струја. Вредноста на напонот  $U_k (V_k)$  (6.1.3.б) се нарекува напон на праг (напон на колена) на *pn* спојот и кај силициумот е 0,6 V и 0,2 V за германиумот.

### 6.1.3. Инверзно поларизиран *pn* спој

Ако на *n* страната на спојот се приклучи позитивниот пол од надворешниот извор, а на *p* страната негативниот, се добива **инверзна поларизација** на *pn* спојот (сл. 6.1.3).

Во овој случај електричното поле на надворешниот извор има иста насока како и внатрешното поле кое потекнува од потенцијалната бариера и вредностите на две полиња се собираат. Ова засилено електрично поле уште повеќе ги потиснува електроните во *n* областа, а празнините во *p* областа. Областа на просторниот полнеж се шири. Со оддалечување на електроните и празнините од местото на спојот на *p* областа и *n* областа, се оневозможува нивна рекомбинација. Струја практично не тече низ *pn* спојот.



Сл. 6.1.3. а) Инверзна поларизација на *pn* спој, б) карактеристика на *pn* спој при инверзна поларизација.

Електричното поле при инверзна поларизација им одговара на миноритетните носители на електрицитетот, електроните во *p* типот и празнините во *n* типот полупроводници. Иако во мал број, овие носители на електрицитет постојат. Нивната рекомбинација овозможува протекување на многу мала струја (на пр. од 1nA кај силициумот), (сл.6.1.3.б). Оваа струја се нарекува инверзна струја и таа во сите практични анализи се занемарува. Оваа струја не зависи од напонот на надворешниот извор.

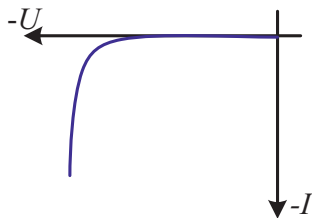
#### 6.1.4. Пробивање на $pn$ спојот

$Pn$  спојот може да биде пробиеен при директна и при инверзна поларизација. Постојат повеќе видови на пробој.

Топлинско пробивање на  $pn$  спојот се јавува при инверзна поларизација, ако приклучениот инверзен напон е многу голем. Поради висок инверзен напон тече инверзна струја која предизвикува дополнително загревање на  $pn$  спојот. Заради дополнителното загревање се зголемува бројот на парови електрон-празнина и се зголемува инверзната струја. Овие појави се потпомагаат меѓусебно, па постојано расте температурата на  $pn$  спојот. Кога температурата ќе помине одредена граница, доаѓа до пробивање на  $pn$  спојот. Ваквиот пробив е карактеристичен за германиумовите диоди, бидејќи кај силициумовите електрооди инверзната струја е многу мала.

И лавинското пробивање се јавува при инверзна поларизација. Електроните што на собна температура постојат во полупроводникот, при зголемен инверзен напон се забрзуваат во насока спротивна на насоката на надворешното електрично поле. Тие удираат во атомите и им ја предаваат енергијата, која пак предизвикува ослободување на вишок нови електрони. Тие пак се движат под дејство на надворешното електрично поле, се забрзуваат и пак удираат во атомите. Процесот продолжува и постојано се зголемува бројот на слободни електрони, што потсетува на лавина. Инверзната струја нагло се зголемува и предизвикува пробивање на  $pn$  спојот.

Карактеристиката на  $pn$  спојот во областа на пробив е многу стрмна и е прикажана на сл. 6.1.4.



Сл. 6.1.4. Карактеристика на  $pn$  спој при пробив.

#### Прашања:

1. Како се добива  $pn$  спој?
2. Какви технолошки постапки постојат за преминување од  $p$  во  $n$  спој?
3. Каква е насоката на електричното поле во  $pn$  спојот?
4. Како се нарекува разликата на потенцијалите  $V_k$  помеѓу крајните точки на слојот?
5. Кога доаѓа до директна поларизација на  $pn$  спојот?
6. Какви се насоките на надворешното и внатрешното електрично поле при директна поларизација?
7. Што е инверзна поларизација на  $pn$  спојот?
8. Каква струја тече при инверзна поларизација?
9. Кога доаѓа до топлински пробив?
10. Кога доаѓа до лавински пробив?

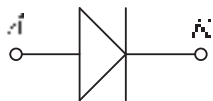
## 6.2. Диоди

Полупроводнички компоненти се диодите, транзисторите, тиристорите и други.

Генерално, тие се делат на **активни** и **пасивни** полупроводнички компоненти. Активните компоненти го засилуваат сигналот, трошејќи ја енергијата на надворешниот електричен извор, на кој е приклучена полупроводничката компонента.

Пасивните компоненти не го засилуваат сигналот, а имаат важна улога во обработката на временски променливите сигнали.

Полупроводнички **pn** спој со метални приклучоци претставува полупроводничка диода. Графичкиот симбол за диодата е даден на сл. 6.2.1.

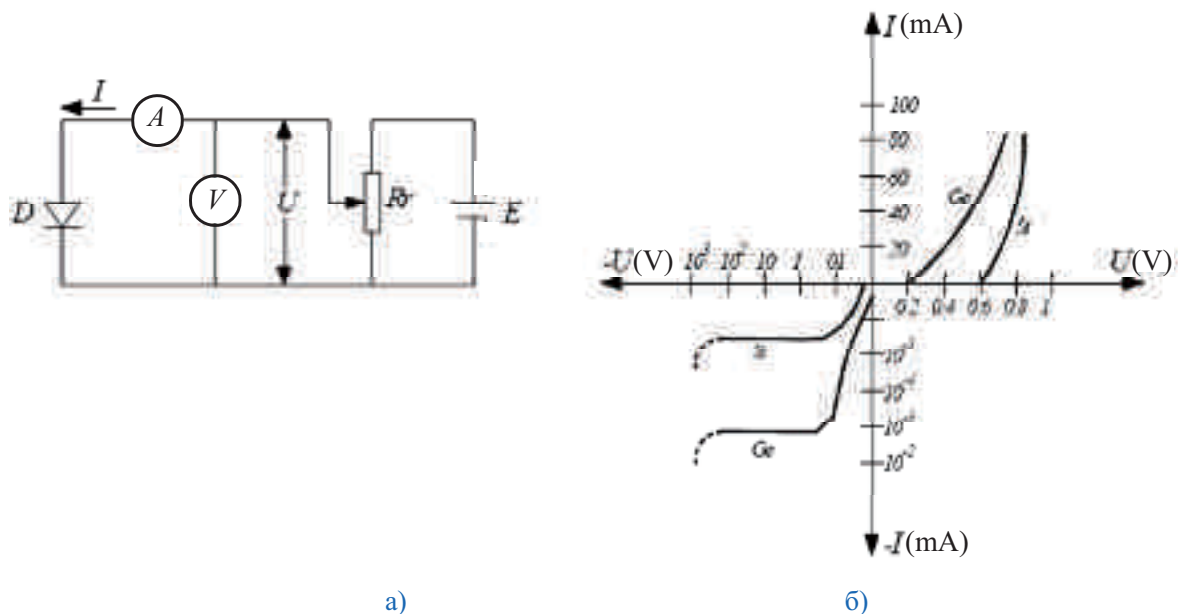


Приклучокот на *p* областа се нарекува **анода** и се обележува со *A*, а приклучокот на *n* областа се нарекува **катада** и се обележува со *K*.

Сл. 6.2.1. Графички симбол на диодата.

### 6.2.1. Струјно напонска карактеристика на диодата

Струјно-напонската карактеристика за диоди од силициум и германиум, најпрецизно може да се сними според мерната шема даден на сл. 6.2.2.а.



Сл. 6.2.2. а) Шема за добивање на струјно напонската карактеристика на *pn* спој од *Si* и *Ge*, б) струјно напонската карактеристика.

Со менување на положбата на лизгачот на променливиот отпор  $R$ , се променува напонот  $U$  на диодата  $D$ , кој се мери со волтметар и е обележан со  $V$  во шемата. Вредноста на јачината на струјата која протекува низ диодата  $I$ , се мери со амперметар и е означен на сликата со  $A$ . Поларизацијата на диодата на сл. 6.2.2. а, е директна. Инверзна поларизација

се добива со промена на поларитетот на изворот  $E$ . Вредностите на измерените напони и струи се внесуваат во табела, а потоа врз основа на тие податоци во размер се црта **струјно-напонската карактеристика** на диодата (сл. 6.2.2.б).

Струјата во силициумовата диода при директна поларизација може да биде изразена преку равенката:

$$I = I_S \left( e^{\frac{U}{V_T}} - 1 \right), \quad (6.2.1)$$

каде што:

$I_S$  - се нарекува струја на заситување, а тоа е струјата од миноритетни носители во *pn* спојот,

$U$  - е напон на надворешниот извор и

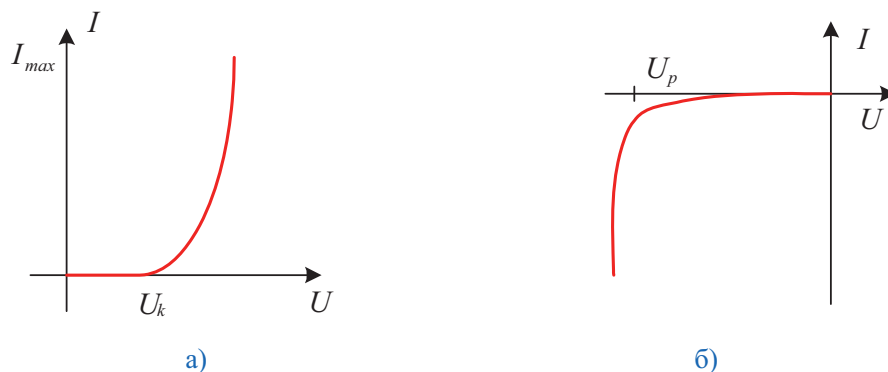
$V_T$  - е напонски еквивалент на температурата, кој се одредува со равенката:

$$V_T = \frac{T}{11600}. \quad (6.2.2)$$

Температурата во равенката 6.2.2 е зададена во степени келвинови ( $^{\circ}\text{K}$ ). За собна температура  $T=300^{\circ}\text{K}$ , а  $V_T=25\text{mV}$ .

Равенката за пресметување на струјата важи и за инверзна поларизација на силициумовата диода и за реална диода е помала од редот на  $\mu\text{A}$ .

Кривите во првиот квадрант (сл. 6.2.2.б) се за директна поларизација, а во третиот квадрант за инверзна поларизација (сл. 6.2.2.а). На струјно-напонската карактеристика на диодата можат да се воочат две карактеристични точки. Првата е **напон на колено** или **напон на праг**  $U_k$ , после кој напон, струјата во диодата нагло почнува да расте (сл. 6.2.3 а). Втората точка е точката на пробивање, која го дефинира напонот на пробивање  $U_p$  при инверзната поларизација, со кој би се уништила диодата (сл. 6.2.3 б). Под влијание  $U_p$  се зголемува температурата на диодата и се губат полупроводничките својства.



Сл.6.2.3. Струјно-напонска карактеристика на диода: а)  $U_k$  е напон на праг, б)  $U_p$  е напон на пробивање.

Прашања:

1. Што е диодата?
2. Што е струјно-напонска карактеристика на диодата?
3. Кои карактеристични точки се воочуваат на струјно-напонска карактеристика на диодата?
4. Што е напон на праг  $U_k$ , а што напон на пробивање  $U_p$ ?
5. Како се изразува струјата во силициумова диода при директна поларизација?
6. Како се пресметува напонскиот еквивалент  $V_T$ ?

## 6.2.2. Параметри на диодата

Параметрите на диодата се големини кои го карактеризираат нејзиното однесување. Нејзин основен параметар е **инверзната струја на заситување** која е во граници од  $10^{-8}$  до  $10^{-2}$  mA, за диоди конструирани од германиум и  $10^{-12}$  до  $10^{-6}$  mA, за диоди конструирани од силициум.

Друг основен параметар на диодата е нејзиниот отпор. Постои **статички** и **динамички** отпор на диодата.

Статички отпор е сооднос помеѓу напонот на диодата и струјата која протекува низ диодата и нема големо техничко значење.

Внатрешниот динамички отпор на диодата се дефинира за дадена точка од карактеристиката ( $U_0, I_0$ ), според равенката:

$$R_i = \frac{1}{\left. \frac{\Delta I}{\Delta U} \right|_{U=U_0}}. \quad (6.2.3)$$

Нареден значаен параметар е **максималниот инверзен напон на диодата**, при кој доаѓа до пробивање. Ако при пробивањето не се ограничи струјата низ диодата со некој надворешен отпор, кумулативното зголемување на струјата ќе го загрее **pn** спојот, така што ќе се уништи. Силициумските диоди имаат поголем инверзен напон од германиумските.

Карактеристиките на диодата многу зависат од температурата на **pn** спојот. Температурата на **pn** спојот зависи од дисипацијата на спојот, која е еднаква на производот од струјата низ спојот и напонот на спојот.

Максималната температура на **pn** спојот е основно ограничување при работата на полупроводничките диоди. Ако работната температура ја надмине максималната, доаѓа до пробивање и уништување на **pn** спојот.

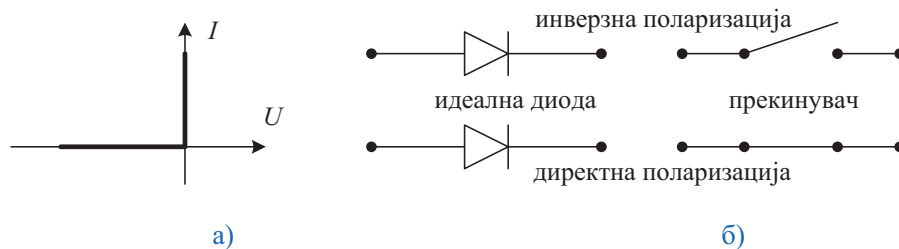
Прашања:

1. Кои се основни параметри на диодата?
2. Што претставува инверзната струја на заситување?

3. Што е статички отпор на диодата?
4. Како се пресметува динамичкиот отпор на диодата?
5. Од што зависат карактеристиките на диодата?
6. На што е еднаква дисипација?

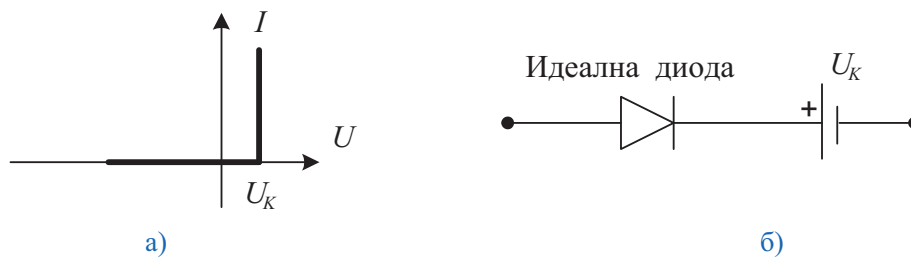
### 6.2.3. Апроксимации на диодата

Најгруба апроксимација на диодата е кога таа се поистоветува со идеален прекинувач. Кога диодата е поларизирана директно, таа се зема како затворен прекинувач во колото. Во случај на нејзина инверзна поларизација, диодата е отворен прекинувач во колото (сл. 6.2.4 а и б).



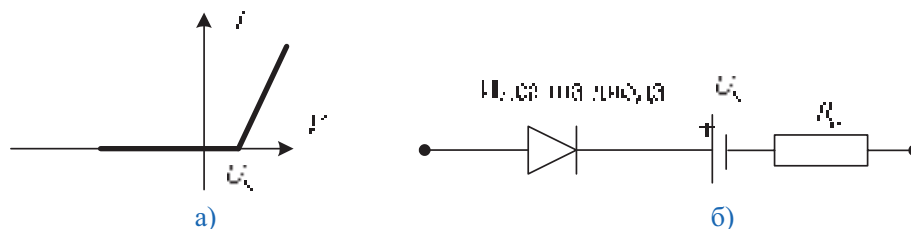
Сл. 6.2.4. Идеална диода: а) Струјно напонска к-ка, б) графичко претставување во електричните кола.

Ако напонот на изворот не е многу поголем од напонот на праг на диодата, таа се апроксимира со карактеристиките дадени на сл.6.2.5.а. Изворот прикажан во апроксимираното коло  $U_k$  (сл.6.2.5.б) е еквивалентен на дејствувањето на потенцијалната бариера.



Сл. 6.2.5. Втора апроксимација: а) Струјно напонска к-ка, б) еквивалентно коло.

Трета апроксимација се прави во случај кога отпорот на диодата е со исти ред на големина како и отпорите кои се приклучени во електричното коло. Во тој случај диодата се претставува како на сл. 6.2.6.

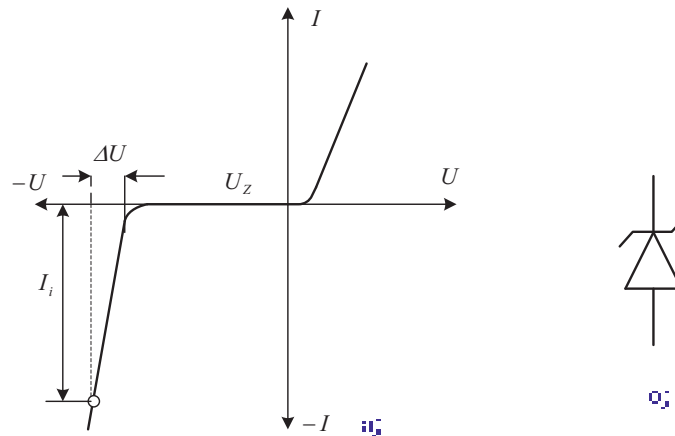


Сл. 6.2.6. Трета апроксимација: а) струјно напонска к-ка, б) еквивалентно коло.

### 6.2.4. Видови полупроводнички диоди

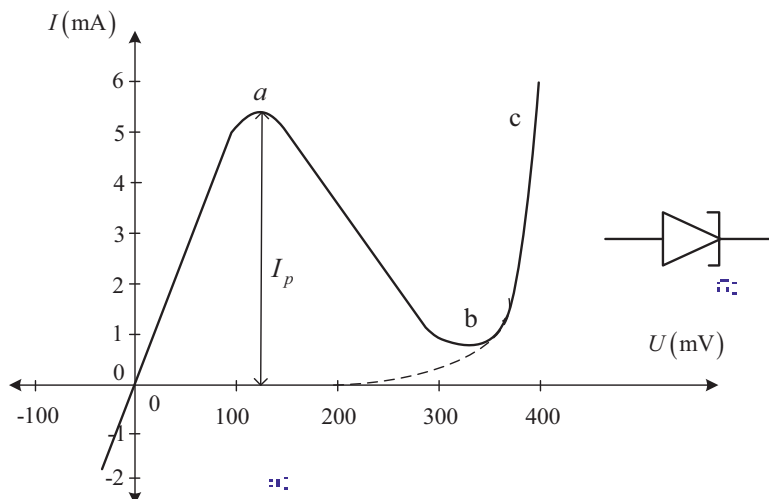
Постојат повеќе типови на диоди со различни својства и за различни примени. Една од нив е **Зенеровата диода**.

Номинален режим на работа на оваа диода е при инверзна поларизација, со напон на пробивање. Тој напон се нарекува Зенеров напон, а се бележи со  $U_z$  и изнесува околу 6 V. При постигнување на Зенеровиот напон, струјата почнува веднаш да расте. Тука при мала промена на напонот се добиваат многу големи промени на струјата. Оваа диода се користи за стабилизација на напонот, а нејзината струјно-напонска карактеристика е дадена на сл. 6.2.7.а. На сл.6.2.7. б, е даден нејзиниот графички симбол.



Сл.6.2.7. а) Струјно-напонска карактеристика на Зенер диода; б) симбол на Зенер диода.

Ако концентрацијата на нечистотии (примеси) во *pn* спојот е голема и изнесува над  $10^{19}$  по  $\text{cm}^3$ , тогаш струјно-напонската карактеристика добива посебни својства. Тоа е таканаречената тунел диода. Нејзината струјно-напонската карактеристика заедно со графичкиот симбол е дадена на сл. 6.2.8.а и б.



Сл.6.2.8.Тунел диода: а) струјно-напонска карактеристика, б) симбол на тунел диода.



Слободните носители на електричество и при мали инверзни напони успеваат да поминат низ тесниот слој на бариерата како низ тунел (тунелски ефект). Од тука е добиен и називот на овој полупроводнички елемент.

При инверзна поларизација струјата расте со зголемување на напонот и нема подрачје на инверзно заситување. Кај оваа диода, од интерес е подрачјето помеѓу точките  $a$  и  $b$ , при директна поларизација. Во ова подрачје, со растење на напонот струјата опаѓа, односно се јавува **подрачје на негативен отпор**. При повисоки напони доаѓа до израз дифузионата компонента на струјата и нејзината зависност е како кај обична диода. Подрачјето на негативен отпор овозможува таа да се користи како осцилатор, генератор на бранови, прекинувач.

Оваа диода се користи за многу високи фреквенции.

### Прашања:

1. Какви апроксимации се прават кај диодите?
2. Која е најгрубата нејзина апроксимација?
3. Што е Зенерова диода и каде се применува?
4. Кој е номинален режим на работа на Зенер диода?
5. Кој сегмент од струјно-напонската карактеристика е интересен кај тунел-диодата?

### 6.3. ДИФУЗЕН И БАРИЕРЕН КАПАЦИТЕТ НА ДИОДАТА

Кондензаторот е составен од две електроди. Кога на кондензаторот се приклучи напон, на електродите се акумулира електрицитет при полнење. На едната електрода се акумулира позитивно, а на другата негативно електричество. И  $pn$  спојот се однесува како кондензатор, бидејќи на една страна се концентрирани празнините, а на другата електроните. Постојат два типа на капацитет на  $pn$  спојот: **дифузен** и **бариерен**.

**Дифузен капацитет** се јавува кога  $pn$  спојот е **поларизиран пропусно** или **дирекно** и  $pn$  спојот се однесува како кондензатор. Објаснувањето е следно: кога  $pn$  спојот не е приклучен на напон, поголемиот број на празнини се наоѓа во  $p$  слојот, додека поголемиот број електрони се наоѓаат во  $n$  слојот.

При директна поларизација на  $pn$  спојот, на почетокот голем број празнини се движат кон  $n$  слојот, каде претходно практично не постоеле.

Кога  $n$  слојот ќе се наполни со празнини, нивното преминување ќе се намали на постојана вредност. Празнините постојано пристигнуваат во постојан број, се рекомбинираат и ја создаваат нормалната струја низ  $pn$  спојот.

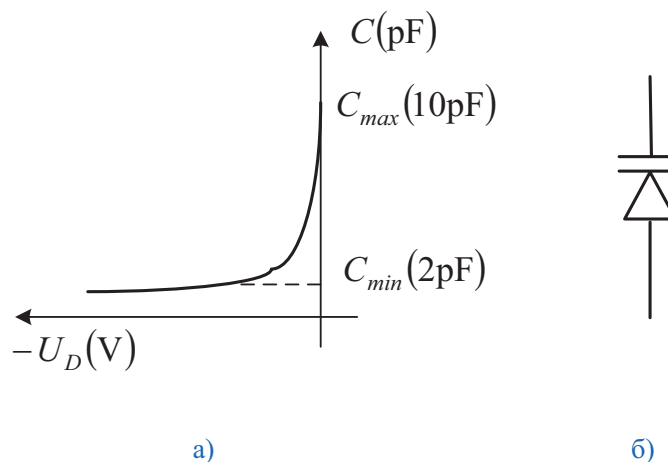
Почетното зголемено движење на празнините во  $n$  слојот, создава зголемена почетна струја, што се појавува и при полнење на кондензаторот.

Истата појава се случува со електроните кои биле придвижени од надворешното поле во  $p$  слојот. Со намалување на надворешниот напон од директна поларизација на  $pn$  спојот до вредност 0, исчезнало електричното поле, кое ги придвижило празнините во  $n$  слојот.

Празнините кои се затекнале во  $n$  слојот, треба да се вратат во  $p$  слојот. Тоа враќање е исто така постепено, па  $pn$  спојот се однесува како кондензатор кој се празни.

Типична вредност на дифузен капацитет е 100 pF. Покрај **дифузниот**, постои и **барьерен** капацитет. **Барьерен капацитет** се појавува при **инверзна поларизација** на **pn** спојот. Просторот на просторно електризирање всушност е кондензатор во кој нема ни слободни електрони ни празнини. Слоевите лево и десно од просторното електричество се проводни и ги создаваат плочите на кондензаторот.

Ако **pn** спојот се поларизира инверзно, растојанието помеѓу електроните и празнините се зголемува. Оваа појава одговара на кондензатор чии електроди се оддалечуваат, при што неговиот капацитет се намалува. Зависноста на капацитетот од инверзниот напон е дадена на сл. 6.3.1 а. Закривеноста на карактеристиката како и вредноста на капацитетот за напон  $U_D=0$ , значајно се разликува кај различни типови диоди.



Сл. 6.4.1. а) Карактеристика на Варикап диода, б) графички симбол.

Постојат посебни типови диоди кои се користат како променлив кондензатор. Нивниот капацитет се менува со помош на инверзниот напон, а се нарекуваат **варикап диоди**. Тие се применуваат во осцилаторните кола, во радио и тв уреди за висока фреквенција. Во електричните шеми се означува како на сл. 6.4.1. б.

Кај некои **варикап диоди** е релативно мал и малку се менува од 2 pF при напон од 25 V до 10 pF при напон од 3 V. Кај други, промените се поголеми.

Во областа на микробрановите се применуваат посебни **варикап диоди**, таканаречени **варактор диоди**, кои служат за мултиплицирање на фреквенцијата.

#### Прашања:

1. Зошто при директна поларизација **pn** спојот се однесува како кондензатор?
2. Ориентационо колку изнесува дифузниот капацитет?
3. Каде доаѓа до израз дифузниот капацитет?
4. Зошто постои барьерен капацитет на диодата?
5. Ориентационо колку изнесува барьерниот капацитет?
6. Каде се применува варактор диодата?

**ЗАПОМНИ:**

1. При соединувањето на полупроводници од  $p$  тип и од  $n$  тип се добиваат нови својства на полупроводнички компоненти, што наоѓаат примена во полупроводничката електроника.

2. При директна поларизација на  $pn$  спојот се користи надворешен извор и позитивниот пол на изворот се приклучува на  $p$  страната, а негативниот пол на  $n$  страната. Ако надворешниот напон се зголемува, струјата нагло расте и најчесто е од ред на големина  $mA$  или  $A$ .

3. Ако на  $n$  страната на спојот се приклучи позитивниот пол од надворешниот извор, а на  $p$  страната негативниот, се добива инверзна поларизација на  $pn$  спојот. Тогаш струјата практично не тече низ  $pn$  спојот.

4. Полупроводнички  $pn$  спој со метални приклучоци преставува полупроводничка диода. Приклучокот на  $p$  областа се нарекува анода и се обележува со  $A$ , а приклучокот на  $n$  областа се нарекува катода и се обележува со  $K$ . Струјно-напонската карактеристика на диодата ја претставува зависноста на струјата и напонот кај диодата.

5. Најгруба апроксимација на диодата е кога таа се поистоветува со идеален прекинувач. Кога диодата е поларизирана директно, таа се зема како затворен прекинувач во колото. Во случај на нејзина инверзна поларизација, диодата е отворен прекинувач во колото.

6. Номинален режим на работа на Зенеровата диода е при инверзна поларизација, со напон на пробивање (Зенеров напона  $U_z$ ) кој околу  $6 V$ . При постигнување на Зенеровиот напон, струјата почнува нагло да расте.

7. Во тунел диодата концентрацијата на нечистотии (примеси) во  $pn$  спојот е голема и изнесува над  $10^{19}$  по  $cm^3$  и нејзината струјно-напонска карактеристика добива посебни својства. Слободните носители на електричество и при мали инверзни напони успеваат да поминат низ тесниот слој на бариерата како низ тунел (тунелски ефект).

8. Дифузен капацитет се јавува кога  $pn$  спојот е поларизиран пропусно или директно и  $pn$  спојот се однесува како кондензатор. Типична вредност на дифузен капацитет е  $100 pF$ .

9. Бариерен капацитет се појавува при инверзна поларизација на  $pn$  спојот.

10. Постојат посебни типови диоди кои се користат како променлив кондензатор. Нивниот капацитет се менува со помош на инверзниот напон, а се нарекуваат варикап диоди.



## 7. ТРАНЗИСТОРИ И ТИРИСТОРИ

### 7.1. ТРАНЗИСТОРИ

#### 7.1.1. Општи поими

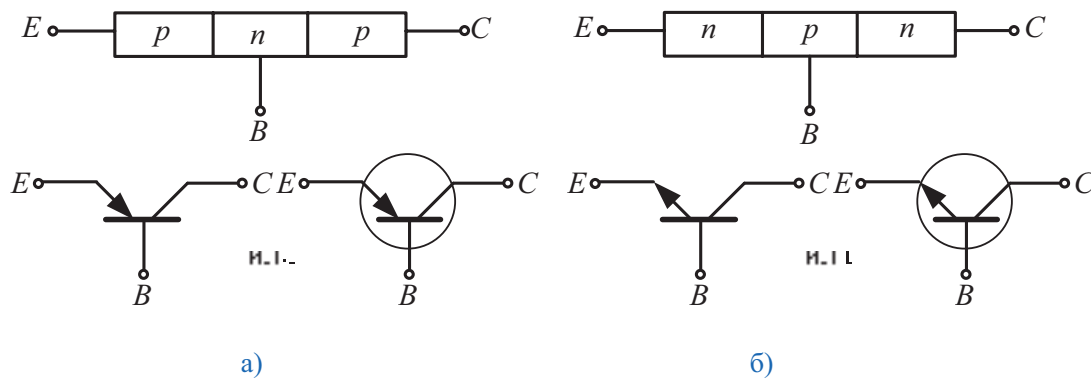
Транзисторот за прв пат бил конструиран во 1948 година во САД. Како нов полупроводнички елемент со два *pn* споеви бил наречен **Транзистор**. Името се добило со скратување на англиските зборови TRANSfer reSISTOR, што во превод би значело **преносен отпорник**. Во вкупната струја која тече низ транзисторот, учествуваат два вида на носители на електричество: мнозински и малцински. Затоа често може да се нарече **биполарен транзистор**. Големо подобрување на особините на транзисторот постигнал американскиот физичар Шокли (William Shockley) во 1951 година. Тој место транзистор со точкаст спој, создал транзистор со површински спој. Пронаоѓањето на транзисторот предизвикало голем напредок во електрониката, преносните комуникациски уреди со мали димензии и др.

Транзисторите во целост ги потиснале електронските цевки од употреба, заради нивните добри својства: подолг работен век, трошење на помала моќност, помало загревање, мали димензии, мала тежина, мали напони и струи, мала чувствителност на вибрации и др.

#### 7.1.2. Принцип на работа на транзисторите

**Транзисторот** е полупроводнички елемент, кој е составен од една заедничка плочка од силициум или германиум со дебелина околу 10 микрони. Таа може да биде полупроводник од *p* тип или од *n* тип. Ако на спротивните површини на слојот (плочката) на полупроводник од *p* тип, со специјална постапка се формираат два слоеви на полупроводник од *n* тип, се добива *npn* транзистор. Слично се добива и *pnp* транзистор. Тука, средната плочка (слој) е заедничка за двата споеви и се нарекува **база**, а се обележува со ***B***. Словите од едната и другата страна на базата, иако се од исти тип полупроводник, не се идентични. **Едниот слој е со поголема концентрација на примеси од другата**. Приклучокот на слојот со поголема концентрација на примеси се нарекува **емитер** и се бележи со ***E***, а на другата страна се наоѓа **колекторот** и е обележан со ***C***. Распоредот на полупроводничките слоеви и симболите за биполарен *pnp* и *npn* транзистор се дадени на сл. 7.1.1.a и 7.1.1.б.

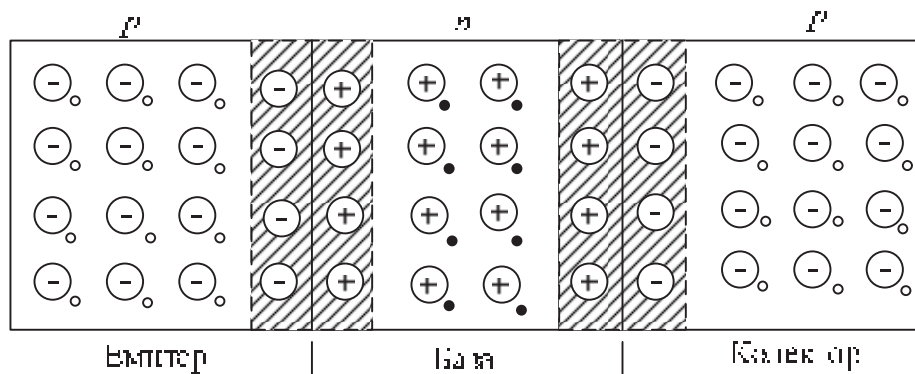
При формирањето на транзисторот во полупроводничкиот материјал се случуваат процеси кои се опишани во поглавие 6 од истиот ракопис, каде се објаснети појавите во *pn* споевите. По дифузијата, слободните носители на електричество, низ граничната површина на полупроводниците со различен тип и проводност, се формираат два *pn* споеви.



Сл.7.1.1.Распоред на полупроводнички слоеви во транзисторот и графички симболи: а) *pnp* транзистор, б) *npn* транзистор.

### 7.1.3. Неполаризиран транзистор

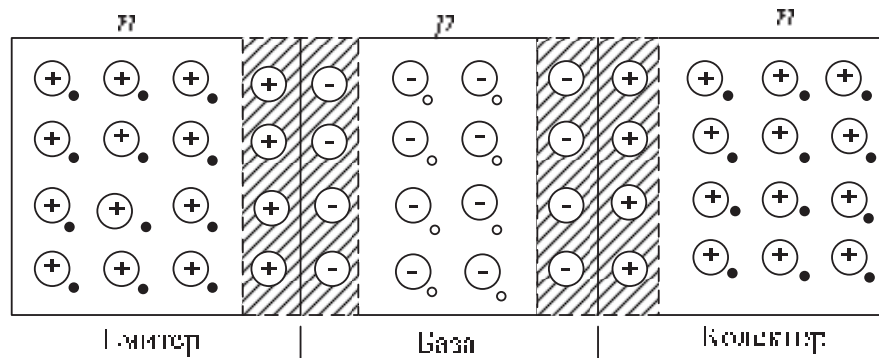
Ако транзисторот не е споен со надворешни извори за напојување (напони), тој е **неполаризиран**, сл. 7.1.2.



Сл. 7.1.2. Неполаризиран транзистор од *pnp* тип.

При ова, на границата помеѓу емитерот и базата се создава слој осиромашен од носители, што се нарекува **емитерска бариера**, додека помеѓу базата и колекторот се создава **колекторска бариера**. Во двете бариери се појавуваат внатрешни електрични полиња со соодветни контактни потенцијали. Тие полиња се спротставуваат на понатамошното движење на електроните и празнините, како мнозински носители на електрицитет, помеѓу различните типови полупроводници. Тоа е исто како кај *pn* спој во рамнотежа. Малцинските носители немаат никаква пречка за движење.

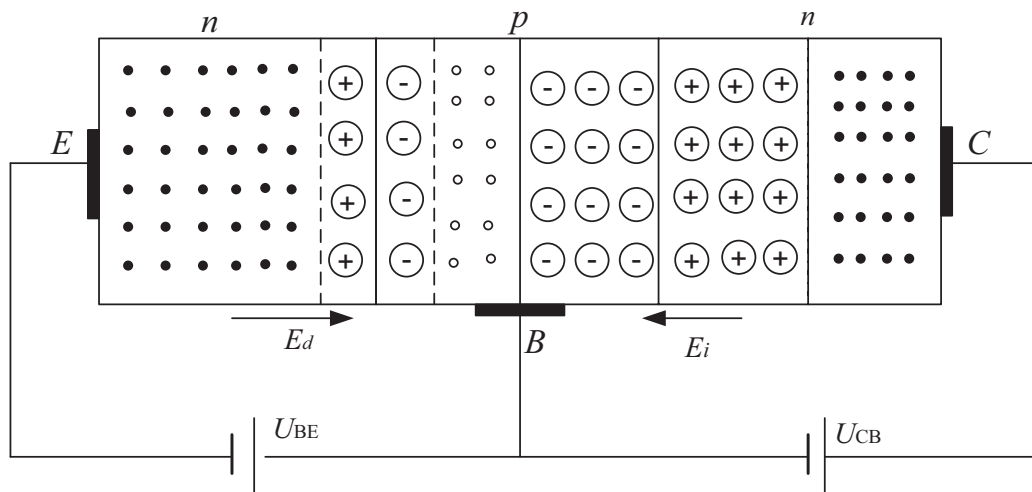
Неполаризиран транзистор од *npn* тип, е претставен на сл. 7.1.3.

Сл. 7.1.3. Неполаризиран транзистор од *npn* тип.

#### 7.1.4. Поларизација на *npn* транзистор и принцип на работа

Транзисторот најчесто работи во колата за засилување на електричните сигнали, во активен режим (кој ќе биде дефиниран).

Во активен режим на работа на *npn* транзистор, спојот база-емитер мора да биде директно поларизиран, додека спојот база-колектор треба да биде инверзно поларизиран како што е прикажано на сл. 7.1.4.

Сл.7.1.4. Принципиелна шема на *npn* транзистор, во активен режим на работа.

Тука, *pn* спојот емитер-база е директно поларизиран со напон  $U_{BE}$ , а *pn* спојот база-колектор е инверзно поларизиран со напон  $U_{CB}$ . Во емитерот главни носители на електрицитет се електроните, а во базата празнините. Кога *pn* спојот помеѓу емитерот и базата се поларизира директно (пропусно), низ него тече струја.

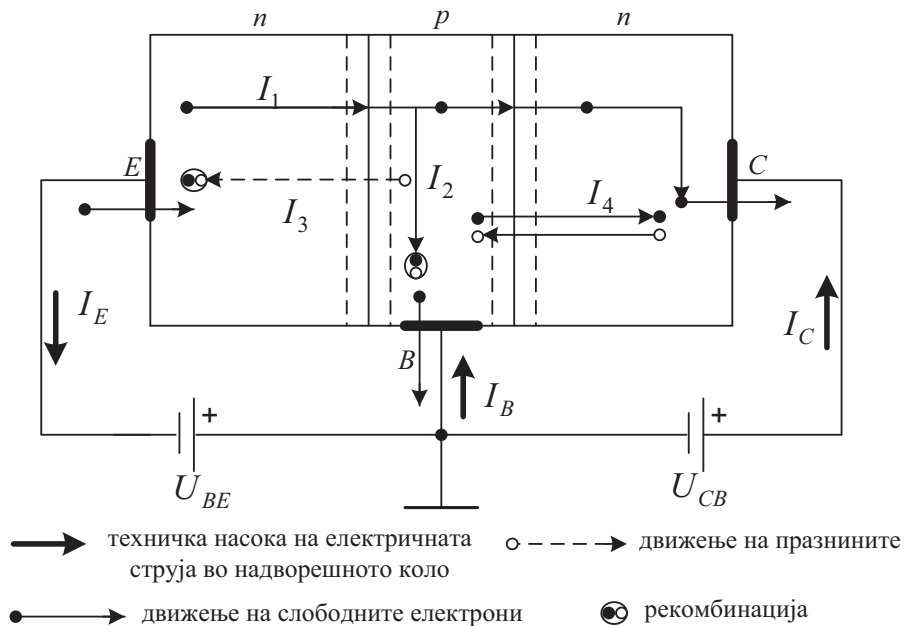
Во овој случај, електроните кои се главни носители во емитерот  $E$ , без пречки ја поминуваат потенцијалната бариера на спојот емитер-база (насоката на полето  $E_d$ ) и преминуваат во областа на базата. Празнините се движат од базата кон емитерот. Од тоа следи дека струјата ја сочинуваат две компоненти: првата компонента ја создаваат

празнините кои од базата преминуваат во емитерот, а другата компонента ја создаваат електроните кои од емитерот преминуваат во базата. Празнините кои од базата преминале во емитерот, се рекомбинираат со електроните во емитерот. Заради малата концентрација на примеси во базата, постојат мал број на празнини, заради тоа мал број празнини преминуваат во емитерот и оваа компонента на струјата е мала.

Заради големите примеси во емитерот, бројот на електрони во него е многу поголем од бројот на празнини. Бидејќи базата е полупроводник од  $p$  тип, би било очекувано во неа да се рекомбинираат голем број на електрони од емитерот. Но, тоа не се случува, бидејќи базата е технолошки изведена со мала ширина, што овозможува мал број електрони да се рекомбинираат во неа. Поголемиот број електрони кои не се рекомбинирале во базата, со дифузија продолжуваат да се движат до другиот спој база-колектор кој е инверзно поларизиран (неговото поле  $E_i$  е со насока спротива од насоката на движење на електроните). Тоа поле ги забрзува електроните и ги носи на колекторот  $C$ .

Ова движење на слободните електрони од емитерот, преку базата во областа на колекторот, всушност е главната струја на транзисторот.

Главната струја на транзисторот е означена со  $I_1$  на сл. 7.1.5, која го прикажува текот на слободните носители на електрицитет во транзистор од  $npr$  тип.



Сл. 7.1.5. Насоки на струите низ транзистор од  $npr$  тип.

Слободните електрони кои од емитерот поминуваат во базата се надоместуваат од надворешниот извор  $U_{BE}$ , преку изводот на емитерот. Тоа е струја на емитерот во надворешното коло на сл. 7.1.5, означена со  $I_E$ . На сликата е означена техничката насока на оваа струја, која е спротивна на насоката на движење на електроните.

Електроните кои од емитерот, преку базата, се собираат на колекторот, го напуштаат транзисторот преку изводот на колекторот и ја формираат струјата на колекторот  $I_C$ .



Колото низ кое тече колекторската струја, се затвора преку негативниот пол на изворот  $U_{CB}$ .

Струјата создадена од рекомбинацијата на електрони од емитерот со празнините во базата, на сл. 7.1.5, е означена со  $I_2$ .

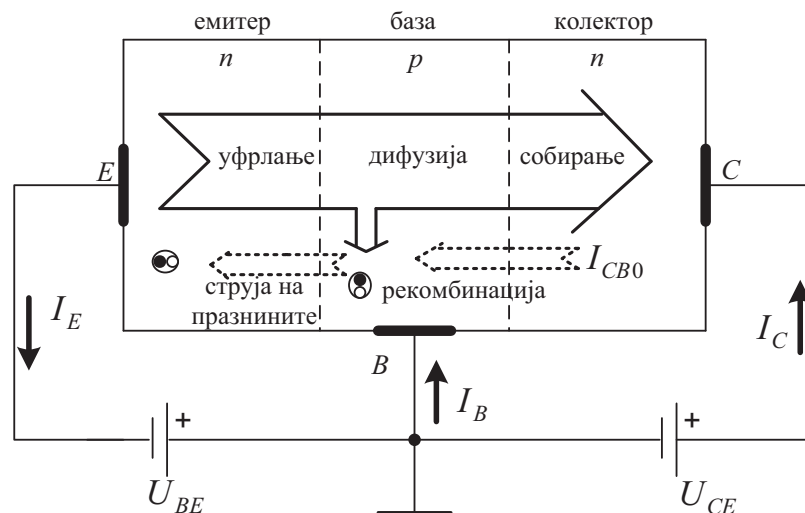
Споредната струја  $I_3$  е создадена од празнините во базата, кои како мнозински носители на електрицитет, преминуваат во емитерот, заради смалената потенцијална бариера на емитерот. Струјата  $I_3$  е мала и не зависи од напонот на поларизација на емитерскиот спој, туку од температурата на спојот.

Струјата  $I_4$  ја создаваат празнините (малцинските носители), кои од областа на колекторот, преминуваат во базата. Таа е со мал интензитет и независи од напонот на поларизација на колекторскиот спој, туку од температурата на полупроводникот. Оваа струја тече низ колекторскиот спој, кога колото на емитерот е отворено. Таа всушност е инверзна струја на заситување на спојот колектор-база и се означува со  $I_{CB0}$ .

Струјата  $I_{CB0}$  се нарекува инверзна струја на колекторскиот спој.

Надворешната струја на базата  $I_B$  е создадена од електроните кои “истекуваат” низ изводот на базата. На тој начин се надокнадуваат празнините, рекомбинирани со електроните кои пристигнале од емитерот.

Сите струи шематски се прикажани на сл. 7.1.6.



Сл. 7.1.6. Шематско прикажување на насоки на струите низ транзистор од *npn* тип.

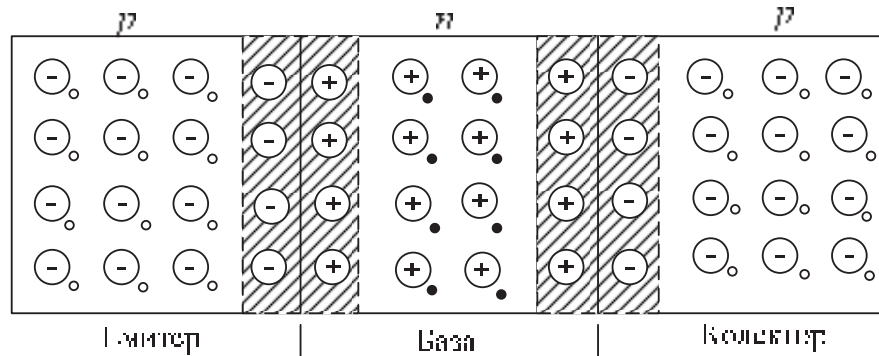
Денес за производство на транзистори се применува постапка на легирање и дифузно-планарна постапка и најприменет транзистор е од типот *npn*.

### 7.1.5. Поларизација на *npn* транзистор и принцип на работа

Во овој тип на транзистори, се менува видот на слободните носители на електрицитет, заради различниот распоред на споевите.

Поларизацијата на транзистор од *npn* тип е дадена на сл. 7.1.7. Емитерскиот спој е директно поларизиран, па потенцијалната бариера помеѓу емитерот и базата се намалува.

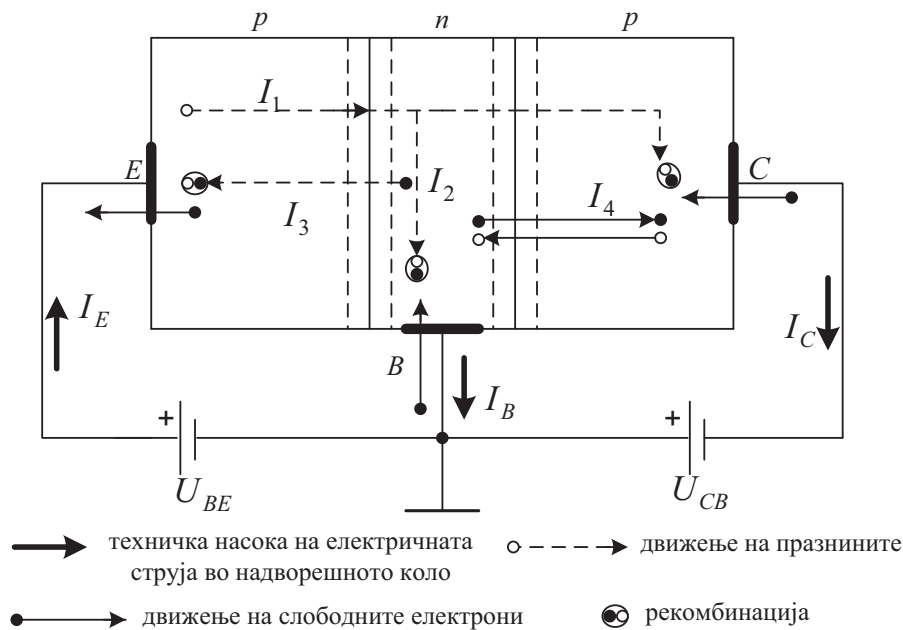
Колекторскиот спој е инверзно поларизиран, а потенцијалната бариера помеѓу колекторот и базата се зголемува.



Сл.7.1.7. Поларизација на *pnp* транзистор.

Тука, областа на емитерот е со поголема концентрација на акцепторски примеси од онаа на базата. Проводноста на колекторот е за малку помала од проводноста на емитерот. Напонот на поларизација на емитерот  $U_{BE}$  и намалената потенцијална бариера, овозможува празнините од емитерската област да преминат во областа на базата, каде имаат улога на малцински носители. Така концентрацијата на празнини во базата се зголемува значително во емитерскиот спој, отколку во колекторскиот спој.

Заради разликата во концентрацијата, празнините по пат на дифузија се движат низ областа на базата од емитерскиот кон колекторскиот спој и се собираат во областа на колекторот. Тие ја создаваат главната компонента на струјата на *pnp* транзисторот и е означена со  $I_1$  на сл. 7.1.8.



Сл. 7.1.8. Шематско прикажување на насоки на струите низ транзистор од *pnp* тип.

Намалувањето на празнините се надокнадува со електричното поле кое го создава надворешниот извор  $U_{BE}$ , се раскинуваат ковалентните врски во близина на изводот на емитерот и слободните електрони ја напуштаат областа на емитерот, оставајќи непополнети празнини. Во надворешното коло тие ја создаваат струјата на емитерот  $I_E$ .

Повеќето празнини кои преминале од емитерот во базата, стигнуваат во колекторот, заради малата концентрација во базата и заради малата ширина на базата.

Мал број на празнини се рекомбинираат со слободните електрони во базата, а таа е струјата  $I_2$  на сл. 7.1.8.

Намалената потенцијална бариера на спојот на емитерот, овозможува преминување на одреден број на електрони (мнозински носители) од базата во емитерот и се рекомбинираат со празнините. Таа е струјата  $I_3$  на сл. 7.1.8.

Струјата  $I_4$ , сл. 7.1.8 е создадена од слободните електрони (малцински носители), кои од колекторот преминале во базата. Другата компонента на струјата  $I_4$  ја создаваат празнините (малцинските носители), кои преминале од базата во колекторот. Струјата  $I_4$  е со мала вредност и не зависи од напонот на поларизација на колекторот, ами само од температурата на полупроводникот. **Таа струја постои и кога е отворено колото во емитерот и се нарекува инверзна струја на заситување на колекторскиот спој** и се означува со  $I_{CBO}$  или  $I_{C0}$ .

**Надворешната струја на базата  $I_B$**  ја сочинуваат електрони кои преку изводот на базата “влегуваат” во транзисторот и ги надополнуваат мнозинските носители во областа на базата, изгубени во процесот на рекомбинација на празнините во емитерот.

**Надворешната струја на колекторот  $I_C$**  ја сочинуваат слободните електрони кои “влегуваат” преку изводот на колекторот во транзисторот и во областа на колекторот се рекомбинираат со празнините. Тоа реално е главната струја во транзисторот.

#### 7.1.6. Параметри и статички карактеристики на транзисторот

Во транзисторските кола можат да се направат пресметувања, ако се познати одредени податоци за транзисторот и другите елементи во колото.

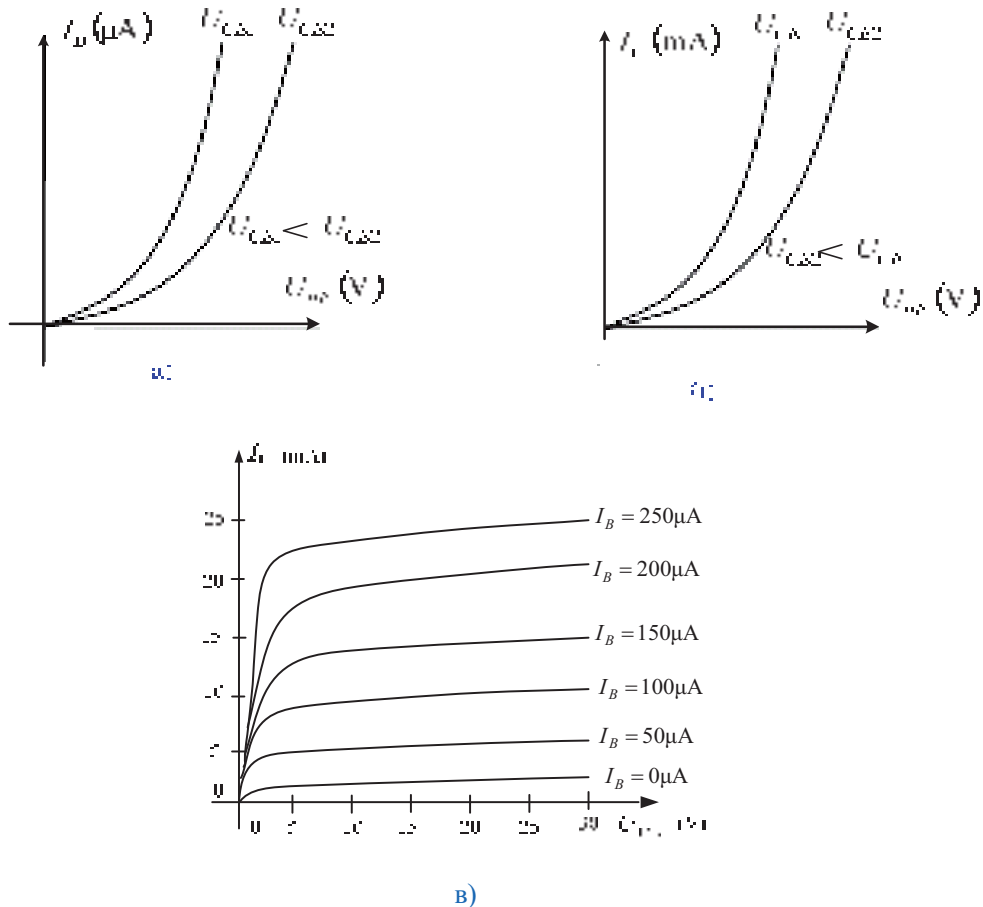
Ако доволни податоци за пасивните елементи во колото е доволно да се познати само одреден број податоци, за **транзисторот** како нелинеарен или **активен елемент** (активен елемент во колото е елементот кој може да ја засили моќноста на електричниот сигнал) во колото потребни се поголем број на податоци.

Значајни параметри на транзисторот се инверзните струи на заситување на колекторскиот и емитерскиот спој, коефициентот на струјното засилување и параметрите на еквивалентното коло, во случај транзисторот да се претставува како четворокрајник.

##### 7.1.6.1. Статичка карактеристика на транзисторот

Познавањето на статичките карактеристики на транзисторот овозможува подобро разбирање на неговата работа. Всушност, со нив графички се претставуваат соодносите на влезните и излезните струи или влезните и излезните напони. При анализата е потребно, една од електродите (приклучокот) да се земе за заедничка. Во случајот, таа нека биде емитерот.

Тогаш се вели дека транзисторот е во спој со заедничкиот емитер. Тој спој е најинтересен во праксата. Исто така постојат транзистори во спој: со заедничка база и со заеднички колектор. Вообичаениот изглед на влезните, преносните и излезните карактеристики при спој со заеднички емитер се дадени на сл. 7.1.9.а, б и в.



Сл. 7.1.9. Статички карактеристики на транзистор: а) влезна, б) преносна, в) излезна.

Од влезната карактеристика се заклучува дека со зголемување на напонот на колектор-емитер, со кој се врши инверзна поларизација на спојот база-колектор, струјата во базата се намалува, бидејќи со зголемување на напонот од инверзна поларизација, се зголемува ширината на потенцијалната бариера, а како последица на тоа се намалува ефективната ширина на базата, што ја намалува струјата од рекомбинација во базата и ја зголемува струјата од инверзно поларизираниот *pn* спој, а на тој начин се намалува и резултантната струја на базата.

Со зголемување на напонот колектор-емитер, се зголемува струјата на колекторот  $I_C$ , бидејќи во стеснетата база, се рекомбинираат помал број на електрони пристигнати од емитерот.

Кај транзисторот се разликуваат два режими на работа: заситен и активен.

При активен режим, колекторските струи практично се независни од напонот колектор-емитер. Од друга страна, режимот на заситување настапува при директна

поларизација на двата *pn* споеви (границата е при еднакви напони колектор-емитер и емитер-база, бидејќи во тој случај, напонот помеѓу колектор-база, што е разлика на двата напони, е еднаков на нула).

Од статичката карактеристика се гледа дека, во активен режим, колекторската струја зависи само од влезниот напон база-емитер, односно од влезната струја во базата, што не е случај за заситен транзистор.

При работа со транзистор, задолжително треба да се знаат ограничувањата кои постојат, во однос на доведениот напон на неговите краеве, како и струјата низ транзисторот, при кои нема да дојде до негово оштетување. Во ограничувањата се наоѓа т.н.р. **област на сигурна работа на транзисторот**. Таа област е ограничена со: максималната моќност на дисипација, на која транзисторот би се загревал до оштетување, напонот на пробивање на инверзно поларизиран *pn* спој и максималната струја при која не би прегореле врските во куќиштето на транзисторот.

### Прашања:

1. Како се добива транзисторот?
2. Како се добива *pnp* транзистор?
3. Што е база, што е емитерот, а што колекторот во транзисторот?
4. Кои се симболите за нивното обележување?
5. Нацртај скици и обележи ги со симболи, *npn* и *pnp* транзистор?
6. Наброј ги статичките карактеристики на транзисторот!
7. Кои ограничувањата треба да се познаваат кај транзисторот, за да не дојде до негово оштетување?

## 7.2. ТИРИСТОРИ

### 7.2.1. Општи поими

Тиристорот е **склоп** од **полупроводнички компоненти** со четири или повеќе слоеви од **различна** проводност, со **најмалку** три *pn* споеви и со **најмалку** три електроди.

Негова основна функција е да управува со големи јачини на електрични струи, преку мала возбудна струја во возбудното коло.

Тиристорите наоѓаат примена при насочување на наизменичните струи, при претворање на еднонасочните струи во наизменични (инвертори) и како претворувачи на фреквенција.

Исто така тие се користат за континуирана регулација на брзината на електромоторите.

Тиристорот има карактеристики многу блиски до идеален прекинувач, односно се користи како **безконтактен прекинувач** и е погоден за континуирано регулирање на електричната моќност.

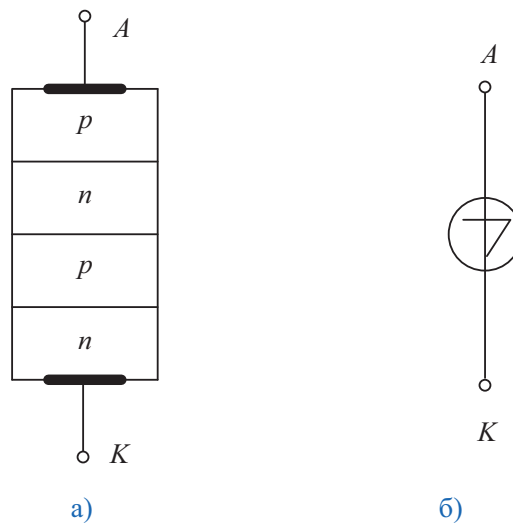
Во една состојба, импедансата на тиристорот е многу голема, а струјата низ него практично е еднаква на нула. Во друга состојба, импедансата на тиристорот е многу мала

и не претставува никаков отпор за течење на струјата. Струјата низ него практично е ограничена само со надворешен отпор.

Преминувањето од една во друга состојба е контролирано. Тиристорот се произведува за струи од неколку ампери до неколку килоампери и за напони од неколку десетини волти до неколку киловолти.

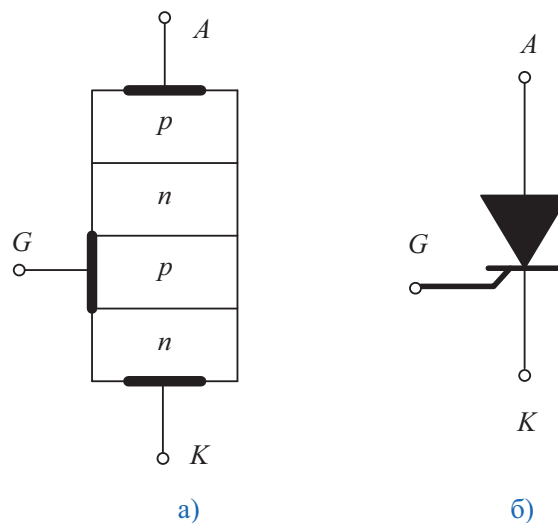
### 7.2.2. Типови на тиристри

Наједноставна изведба има **диодниот тиристор** или **динистор**, кој е составен од четири слоеви на полупроводници, со три *pn* споеви и со **две** електроди, сл. 7.2.1. а.



Сл.7.2.1. Шематско прикажување на диоден тиристор: а) структура, б) графички симбол.

Изводите се направени на надворешните полупроводнички слоеви. Надворешната област *p* се нарекува **анода** *A*, а надворешната област *n* е **катода** и се обележува со *K*.



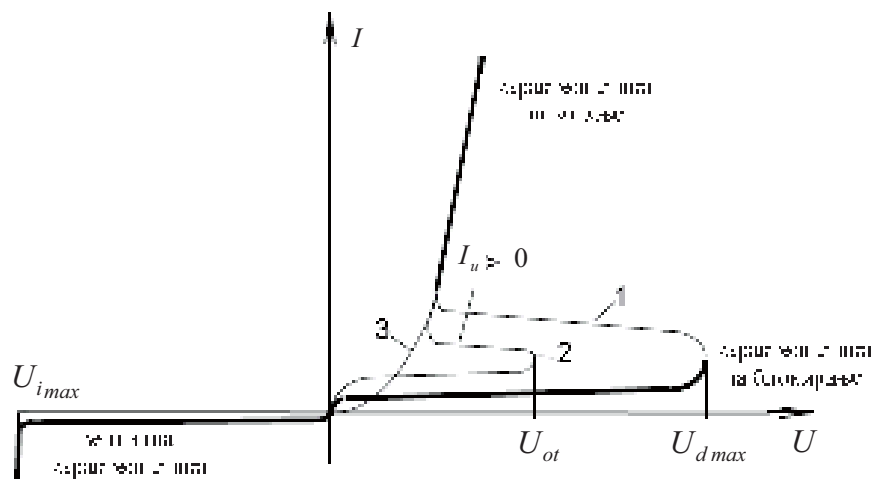
Сл. 7.2.2. Шематско прикажување на триоден тиристор: а) структура, б) графички симбол.

Тиристорот најчесто го сочинуваат четири слоеви од полупроводници  $pnpn$  и се нарекува **триоден тиристор** или **тринистор**. Во него, покрај анодата  $A$  и катодата  $K$ , постои уште една електрода наречена гејт ( $G$ - gate), на слојот  $p$ , која се нарекува управувачка електрода. Слојот  $p$  се изработува многу потенок од останатите слоеви.

Надворешните слоеви  $p$  и  $n$  се прават со голема концентрација на примеси, а внатрешните слоеви  $n$  и  $p$  со мала концентрација на примеси.

### 7.2.3. Статичка карактеристика на тиристорот

Кога анодата е на понизок потенцијал од катодата, тогаш споевите 1 и 3 се инверно поларизирани, тиристорот е затворен и низ него не може да тече струја (освен слаби инверзни струи). Тоа е состојба на инверзна карактеристика, сл. 7.2.3.



Сл. 7.2.3. Карактеристика на тиристорот.

Кога анодата е на повисок потенцијал од катодата, (колото на управувачката електрода е отворено), тогаш споевите 1 и 3 се директно поларизирани, тиристорот е затворен, низ него не тече струја, односно тече само струја еднаква на инверзната струја на слојот 2. Оваа состојба е претставена со **состојба на блокирање** на тиристорот.

На сл. 7.2.3, прикажан е типичен облик на карактеристиката на тиристорот. И во подрачјето на инверзната карактеристика и во подрачјето од карактеристиката на блокада, тиристорот практично претставува отворен прекинувач (импедансата му е многу голема, а струјата низ него е многу мала).

При **инверзен напон**  $U_i$  и при **директен напон**  $U_{dmax}$ , што се карактеристични параметри на тиристорот и кои по интензитет се приближно еднакви, доаѓа до **лавинско пробивање**. Не треба да се дозволи ова пробивање кај тиристорот, бидејќи тоа доведува до негово уништување.

Ако на управувачката електрода  $G$  се донесуваат различни надворешни напони, може да се управува со напонот на отварање "палење" на тиристорот  $U_{ot}$ . Кога управувачката електрода  $G$  е позитивна во однос на катодата  $K$ , во слојот  $p_2$  се внесуваат нови носители, а тоа овозможува тиристорот да премине од состојба на блокирање во состојба на спроведување. Тогаш тиристорот се набљудува како две диоди поврзани сериски. За

преминување од состојба на блокирање во состојба на спроведување на тиристорот може да се повлијае и со јачината на струјата во управувачката електрода  $G$ . Поголемата струја, предизвикува палење на тиристорот при понизок напон  $U_d$ . Премиот од една во друга состојба на тиристорот зависи и од температурата на споевите. При повисока температура, премиот се одвива при понизок директен напон. Ако температурата е недозволено висока, може да се случи тиристорот воопшто да не блокира. Затоа, посебно внимание треба да се посвети на ладењето на тиристорите.

Тиристорите имаат широк спектар на примена: како прекинувачи, исправувачи на наизменичната во еднонасочна струја и обратно, промена на фреквенцијата на наизменичните струи и др.

#### Прашања:

1. Како се добива тиристорот?
2. Каква е улогата на тиристорот во електричните кола?
3. Објасни ја структурата на тиристорот!
4. Во него, покрај анода  $A$  и катодата  $K$ , постои уште една електрода, како се нарекува и како се обележува?
5. Каде наоѓа примена тиристорот?
6. Што може да се случи со тиристорот при недозволено висока температура?



**ЗАПОМНИ:**

1. Транзистор претставува кристал од силициум, во кој слој на полупроводник од  $p$  тип е формиран и сместен меѓу два слоеви на полупроводник од  $n$  тип, при што се добива  $npr$  транзистор. Слично се добива и  $pnp$  транзистор. Областа заедничка за двата споеви се нарекува база и се обележува со  $B$ . Областите од едната и другата страна на базата, иако се од исти тип полупроводник, не се идентични. Едната е со поголема концентрација на примеси од другата. Приклучокот на областа со поголема концентрација на примеси се нарекува емитер и се бележи со  $E$ , а на другата страна се наоѓа колекторот, обележан со  $C$ .

2. Ако транзисторот не е споен со надворешни извори за напојување (напони), тој е неполаризиран.

3. Транзисторот најчесто работи во колата за засилување на електричните сигнали, во активен режим. Во овој режим на работа на  $npr$  транзистор, спојот база-емитер мора да биде директно поларизиран, додека спојот база-колектор треба да биде инверзно поларизиран.

4. Транзисторот се поврзува во спој со заеднички емитер, во спој со заедничка база и во спој со заеднички колектор. Статичките карактеристики на транзистор се влезни, преносни и излезни. Кај транзисторот се разликуваат два режими на работа активен и заситен.

5. Тиристорот е склоп од полупроводнички компоненти со четири или повеќе слоеви од различна проводност, со најмалку три  $pn$  споеви и со најмалку три електроди.

6. Наједноставна изведба има диодниот тиристор или динистор, кој е составен од четири слоеви на полупроводници, со три  $pn$  споеви и со две електроди.

7. Триодниот тиристор или тринистор го сочинуваат четири слоеви од полупроводници  $pnpn$ . Во него, покрај анодата  $A$  и катодата  $K$ , постои уште една електрода наречена гејт ( $G$ - gate), на слојот  $p$ , која се нарекува управувачка електрода. Слојот  $p$  се изработува многу потенок од останатите слоеви.



## 8. ФОТОЕЛЕКТРИЧНИ ЕЛЕМЕНТИ

Фотоелектричните појави ги открил францускиот физичар Бекерел во првата половина на деветнаесеттиот век. Испитувањето на овие појави станало поинтензивно дури во почетокот на дваесеттиот век, кога теоретски е објаснет **фотоелектричниот ефект**. Со пронаоѓањето на електронските цевки, направени се првите вакуумски фотокелии, а паралелно со развитокот на полупроводничката технологија, фотоелектрониката доживеала голем напредок.

### 8.1. ФИЗИЧКИ ОСНОВИ НА ФОТОЕЛЕКТРИЧНИТЕ ПОЈАВИ

Според Њутновата **корпускуларна** теорија за природата на светлината, поставена во средината на седумнаесеттиот век, светлината се објаснувала како движење на еластични честички емитирани од светлосен извор. Оваа теорија се применувала до половината на деветнаесеттиот век кога експериментално биле докажани појавите на интерференција, дифракција и поларизација на светлината. Тие не можеле успешно да се објаснат со корпускуларната теорија, па е поставена нова теорија (**бранова теорија**) според која светлината е електромагнетно зрачење со одредена бранова должина и фреквенција.

Пред крајот на деветнаесеттиот век се изведени некои експерименти кои не можеле да се објаснат со брановата теорија на светлината. Таков експеримент извел Херц со две електроди затворени во стаклен сад со разреден гас меѓу кои се јавува електрично празнење, кое се засилува ако металните електроди се осветлат со ултравиолетова светлина. Оваа е еден вид на **фотоелектричен ефект**.

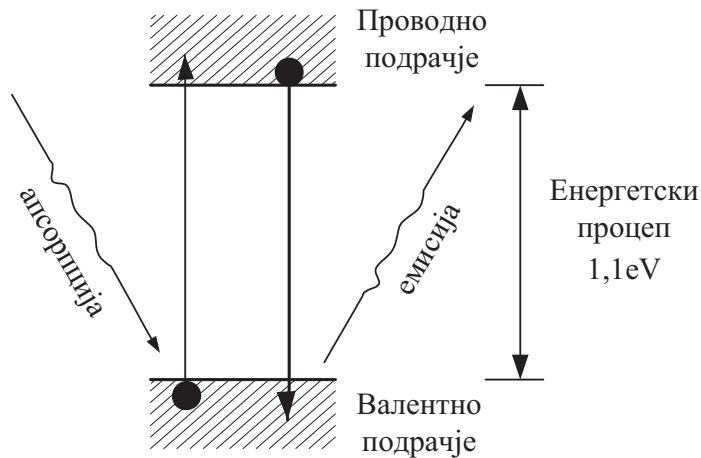
Алберт Ајнштајн 1905 го објаснил **фотоелектричниот ефект**. Користејќи ја **квантната теорија на Макс Планк**, тој вовел поим за светлосен квант, наречен **фотон**. Според квантната теорија светлината не се простира континуирано, туку во облик на кванти енергија-фотони. Фотонот има особини на ненаелектризирана честичка и се движи во вакуум со брзина на светлината ( $c = 3 \cdot 10^8$  m/s). Неговата енергија зависи од фрек-венцијата  $f$  или од брановата должина  $\lambda$  според следниот израз:

$$E = h f = \frac{hc}{\lambda}, \quad (8.1.1)$$

каде  $E$  е енергија на фотонот во (eV),  $h$  е Планкова константа  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  Js, а  $\lambda$  е бранова должина на светлината изразена во m.

**Фотоелектричниот ефект се објаснува со меѓусебно дејство на фотоните и електроните-те** во атомите, всушност со размена на енергија помеѓу фотоните и електроните. Енергијата помеѓу валентниот електрон и фотонот може да се размени во две насоки. Ако еден фотон дејствува со одредена енергија на еден валентен електрон и му ја предава својата енергија, електронот може да стане слободен носител на електричество.

Спротивен процес се одвива кога слободен електрон се враќа на надворешната патека, или кога преминува од патека со поголем радиус кон патека со помал радиус. Овој процес е проследен со емисија на еден светлосен квант (фотон). На сл. 8.1.1, се прикажани претходните појави со помош на дијаграмот за енергетските нивоа.



Енергијата што треба да ја прими електронот на силициумот од фотонот за да премине од валентно во проводно подрачје еднаква е на енергијата од ширината на енергетскиот процес меѓу овие две подрачја и изнесува 1,1 eV.

Сл.8.1.1. Појава на емисија и апсорпција.

Според равенката (8.1.1) брановата должина на светлината која може да го возбуди електронот на силициумот треба да биде помала од:

$$\lambda_{\max} \approx 1127,3 \text{ nm} \quad (8.1.2)$$

Ваквото меѓусебно дејство меѓу електроните и фотоните ги дава физичките основи на работата на фотоелектричните елементи.

Постојат повеќе типови на фотоелектрични елементи. Иако се среќаваат различни поделби на овие елементи, главно се разликуваат две основни групи: **фотодетектори** и **фотоелектронски извори на светлина**.

**Фотодетекторите** ја претвораат енергијата на светлосното зрачење во електрична енергија, и тука припаѓаат: фотоотпорниците, фотодиодите, фототранзисторите, фото-генераторите и др.

**Фотоелектронските извори на светлина** ја претвораат електрична енергија во светлосно зрачење и тука припаѓаат светлосните полупроводнички диоди и течните кристали.

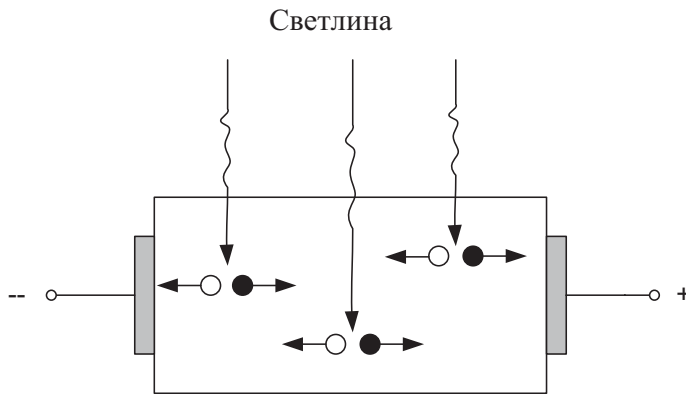
### Прашања

1. Што е фотонот?
2. Како се објаснува фотоелектричниот ефект?
3. Кои се две основни групи на фотоелектрични елементи?

## 8.2. ФОТОДЕТЕКТОРИ

Фотодетекторите се елементи кои ја претвораат енергијата на светлосното зрачење во електрична енергија или ги менуваат електричните својства под дејство на светлината.

Принципот на работа на фотодетекторите е објаснет со помош на сл.8.2.1, на која е претставен пресек на полупроводник. Неговата горна површина е осветлена и помеѓу двата негови спротивни краеве дејствува еднонасочен напон.



Сл. 8.2.1. Принцип на работа на фотодетекторите.

Фотоните кои ги погодуваат атомите на полупроводникот стапуваат во меѓусебно дејство со електроните. Валентните електрони апсорбираат енергија и стануваат слободни, а на нивното место во кристалната решетка на полупроводникот остануваат празнини. Значи, во полупроводникот фотоните создаваат парови слободен електрон-празнина.

Дејството на светлината го зголемува бројот на слободни носители на електрицитет и ја смалува електричната отпорност на полупроводникот.

За да не дојде до рекомбинација на генерираните парови слободни носители, т.е. до враќање на слободните електрони во валентното подрачје, на краевите на полупроводникот се приклучува извор на еднонасочен напон и во полупроводникот се создава електрично поле. Под дејство на силите на полето, слободните електрони ќе се движат кон позитивниот пол, а празнините кон негативниот пол. Јачината на создадената струја е пропорционална на енергијата на светлосното зрачење што паѓа на полу-проводникот.

Светлосните зраци се шират од изворот на светлината. Множеството на светлосни зраци кои поминуваат низ некоја површина го одредува светлосниот флукс  $\Phi$  низ таа површина. Светлосниот флукс се мери во лумени (lm).

Густината на светлосниот флукс е дефинирана како количник од флуксот  $\Phi$  и површината низ која поминува светлоста и се нарекува осветленост  $E$ . Единицата за осветленост е лукс (lx).

Чувствителноста на фотодетекторот е однос на јачината на струјата на осветлениот фотодетектор  $I_\Phi$  и светлосниот флукс  $\Phi$  која ја предизвикал таа струја:

$$S = \frac{I_\Phi}{\Phi} . \tag{8.2.1}$$

Спектралната карактеристика на фотодетекторот е зависност на неговата струја од брановата должина на светлината  $\lambda$  која ја предизвикува струјата.

Понатаму ќе бидат подетално проучени некои претставници на фотодетекторите.

Фотодетекторите обично се делат на следните три групи: фотоемисони елементи, фотоиндуктивни елементи и фотогенератори.

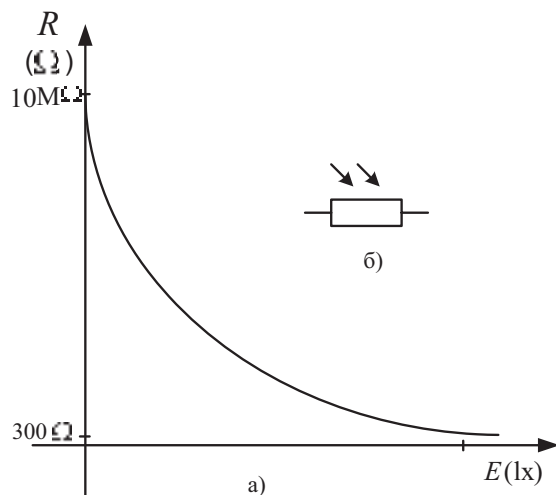
**Фотоемисионите елементи** се оние во кои под дејство на светлина се ослободуваат електрони и ја напуштаат површината на фоточувствителниот материјал. Оваа појава е посебно изразена ако материјалот се осветли во вакуум и е наречена **фотоелектронска емисија**. Најпознати фотоелектронски елементи се **фотодиодите (фотокелии)**.

**Фотоиндуктивните елементи** ја менуваат својата електрична проводност во зависност од светлосниот флукс кој паѓа на нивната површина. Во оваа група спаѓаат фотоотпорниците, полупроводничките фотодиоди и фототранзисторите.

**Фотогенераторските елементи** произведуваат електромоторна сила на своите изводи под дејство на светлосно зрачење. Познати се соларните келии, кои енергијата на сончевото зрачење директно ја претвораат во електрична енергија.

### 8.2.1. Фотоотпорник

**Фотоотпорникот** е полупроводнички елемент чиј електричен отпор се менува при промена на светлината која паѓа врз неговата површина. Најчесто се прави од кадмиум-сулфид. Во него нормално има малку слободни носители на електрицитет, доколку се наоѓа во темнина. Тогаш низ него тече "темна струја". Ако се осветли, фотоните кои ги погодуваат атомите на полупроводникот стапуваат во меѓусебно дејство со електроните. Се создаваат парови слободен електрон-празнина. Ако отпорникот се приклучи на надворешен извор на еднонасочен напон, се создава електрично поле во внатрешноста на фотоотпорникот. Силите на полето не дозволуваат да дојде до рекомбинација. Електроните се движат кон позитивниот пол, а шуплините кон негативниот пол. Тоа ја зголемува јачината на струјата во надворешното коло. Ако осветленоста е поголема, поголем е бројот на создадените парови електрон-празнина, а помал е електричниот отпор на отпорникот. Карактеристиката на фотоотпорникот и неговиот графички симбол се прикажани на сл. 8.2.2. Од неа се гледа дека отпорот опаѓа со зголемувањето на осветленоста по крива која е слична на хипербола.



Сл. 8.2.2. а) Карактеристика на фотоотпорник  
б) графички симбол на фотоотпорник.



Сл. 8.2.3. Фотоотпорник.

Фотоотпорниците се изработуваат со нанесување на фоточувствителен полупроводнички материјал на подлога од керамика со таложење или со синтерување на полупроводнички прав на висока температура. На краевите на плочката се формираат метални контакти, а на нив се прицврстуваат изводи. Полупроводничката плочка потоа се

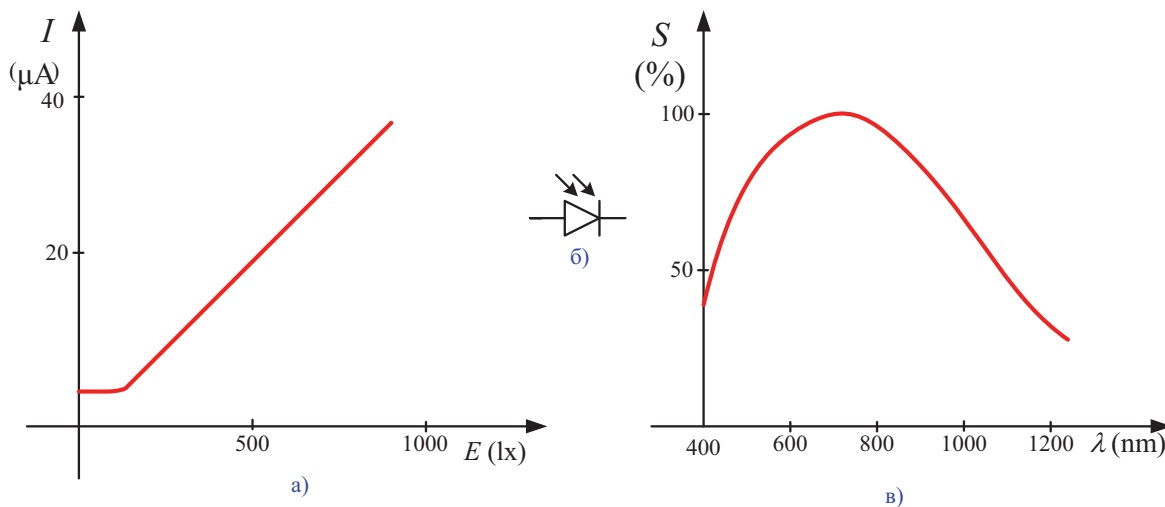
затвора во куќиште (пластично или метално), кое на горната површина има вградено прозорец од просирен материјал (стакло или пластика), низ кое поминува светлината.

Фотоотпорниците, во зависност од материјалот од кој се изработени, можат да бидат чувствителни на ултравиолетово зрачење (фототпорници од цинк-сулфид) и на инфрацрвено зрачење (од германиум или оловосулфид). Фотоотпорниците од силициум се најчувствителни на бранова должина од 1000 nm, а тие од кадмиум-сулфид реагираат на видлива светлина.

Фотоотпорниците имаат големо време на вклучување и исклучување (околу 1 ms) и тоа им е еден од главните недостатоци. Нивниот отпор се менува во многу широки граници, па често се употребуваат и за детекција на нивото на осветленост. Со нивна помош се прават автомати за вклучување на уличното осветление, светлечки реклами и др.

### 8.2.2. Фотодиода

Фотодиодата е исто така полупроводнички елемент со еден *pn*-спој и два изводи, чија електрична проводност се менува со промена на светлосниот флукс кој паѓа на површината на спојот. Нејзината градба е слична на обична диода. Разликата е во тоа што кај фотодиодата *pn*-спојот е откриен и на него паѓаат светлосните зраци. Фотодиодата се поларизира секогаш во инверзна насока. Кога инверзно поларизираната фотодиода не е осветлена, низ неа тече "темна струја", еднаква на инверзната струја на *pn*-спојот, која како што е познато е со мал интензитет.



Сл.8.2.4. а) Карактеристика на фотодиода, б) графички симбол за фотодиода, в) зависност на чувствителноста од брановата должина.

Кога диодата ќе се осветли, фотоните поминуваат низ слојот од провидна материја кој се наоѓа на горната страна од фотодиодата. Фотоните стапуваат во меѓусебно дејство со електроните од полупроводникот, и ако енергијата на фотоните е доволно голема, се создаваат парови електрон-празнина. Паровите слободни носители на електрицитет создадени во *p* или *n* областа можат да се рекомбинираат со други слободни носители. Напонот на инверзна поларизација на диодата создава електрично поле кое ја спречува рекомбинацијата. Слободните електрони се движат кон *n* областа, а шуплините преминуваат во *p* областа. Се зголемува инверзната струја на фотодиодата и таа е пропорционална на зголемената осветленост  $E$ .

Карактеристиката на фотодиодата, нејзиниот графички симбол и чувствителноста на фотодиодата во зависност од брановата должина е дадена на сл. 8.2.4. Од сл.8.2.4.а) може да се забележи дека струјата на фотодиодата расте приближно линеарно со зголемување на светлосниот флукс.

Фотодиодата нормално работи во подрачјето на видлива светлина и во инфрацрвено подрачје. Таа е најчувствителна на бранова должина од 800 nm. Времето на вклучување и на исклучување кај обичните фотодиоди е околу 1 $\mu$ s, а кај брзите фотодиоди може да биде пократко од 1ns.

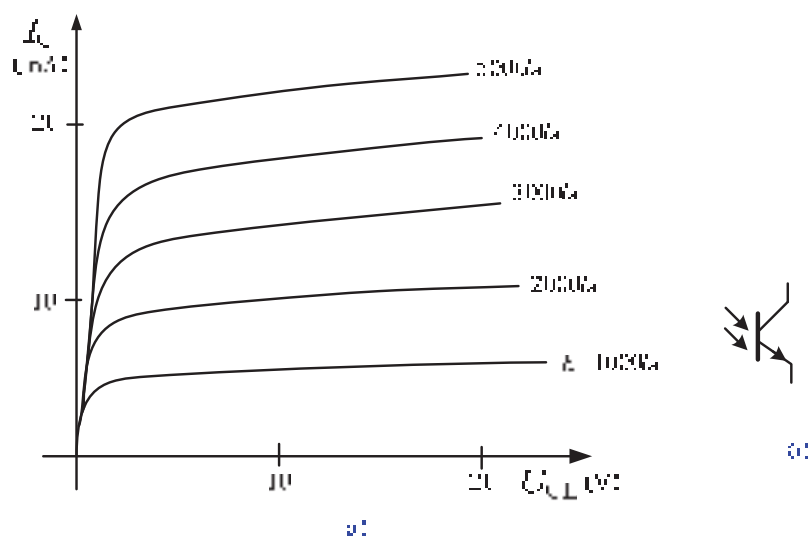


Сл. 8.2.5. Фотодиода.

Тие се употребуваат како детектори за постоење или непостоење на светлост и се применува кај сигналните уреди.

### 8.2.3. Фототранзистор

Фототранзистор е полупроводнички елемент со два *pn*-споја и три изводи. Тој е сличен со обичниот транзистор, а разликата е во тоа што на горната површина е формиран прозорец од проѕирен материјал низ кој паѓа светлината. Графичкиот симбол на фототранзисторот е даден на сл. 8.2.6.б).



Сл. 8.2.6. а) Карактеристика на фототранзистор б) графички симбол за фототранзистор.



При удар на светлосните зраци на *pn*-спојот база-колектор, низ него протекува зголемена инверзна струја. Оваа струја се засилува и се добива зголемена колекторска струја  $I_C$ . Со зголемување на осветленоста се зголемува инверзната колекторска струја, а исто така и струјата на колекторот. Струјно-напонската карактеристика на фототранзисторот е прикажана на сл. 8.2.6.a).

Фототранзисторот има многу поголема чувствителност од фотодиодата бидејќи струјата добиена со ударот на светлосните зраци врз него се засилува. Времето на воспоставување или на исчезнување на струјата низ транзисторот е многу поголемо отколку кај фотодиодите и изнесува околу 5  $\mu$ s.

Фототранзисторот ја обединува големата чувствителност на фотодиодата со зголемување на струјниот сигнал.

И кај фототранзисторите чувствителноста е најголема за бранова должина на светлината од 800 nm.

Тие, исто така, се применуваат како детектори за постоење или непостоење на светлост.



Сл.8.2.7. Фототранзистор.

Фотогенераторите се полупроводнички елементи со еден *pn*-спој и два изводи кои произведуваат електромоторна сила на своите изводи под дејство на светлосно зрачење. Познати се соларните ќелии, кои енергијата на сончевото зрачење директно ја претвораат во електрична енергија.

### Прашања

1. Што е светлосен флуks и во кои единици се мери?
2. Како се дефинира чувствителноста на фотодетекторите?
3. Како работат фотоотпорниците и каде се применуваат?
4. По што фотодиодата се разликува од обичната диода?
5. Како изгледа карактеристиката на фотодиодата?
6. Каде се користат фотодиодите?
7. Каква е разликата меѓу обичниот транзистор и фототранзисторот?
8. Каде се користат фототранзисторите?

### 8.3. ФОТОЕЛЕКТРОНСКИ СВЕТОСНИ ИЗВОРИ

#### 8.3.1. Светлечки полупроводнички диоди (LED)

Фотоелектронски светлосни извори се елементи кои електричната енергија ја претвораат во енергија на зрачење. Тие се користат за осветлување и за визуелно прикажување на информации.

Најзначајни фотоелектронски извори се светлечките полупроводнички диоди, кои покажуваат многу добри особини. За нив се употребува кратенката LED (Light Emitting Diode) што значи диода која емитира светлина.

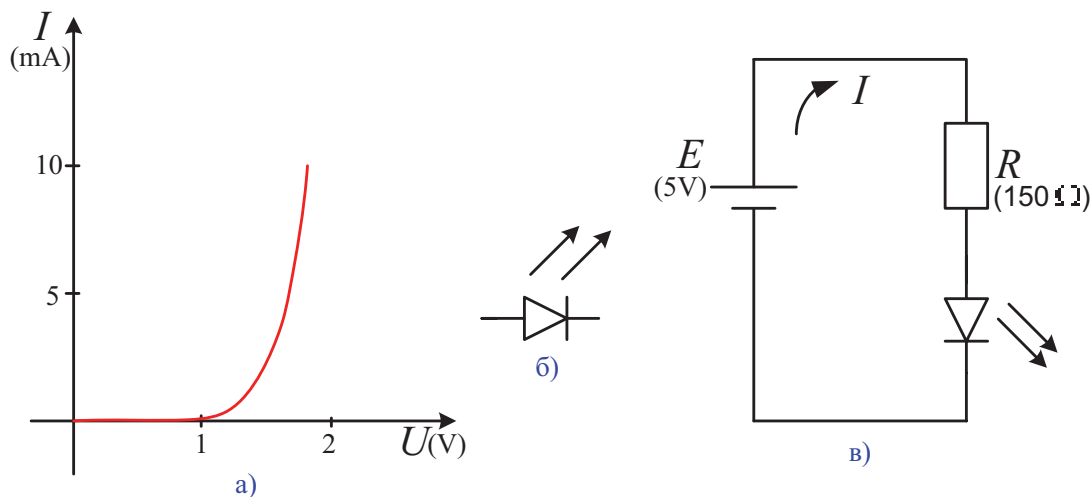
Светлечките полупроводнички диоди се поларизирани во пропусна насока. При рекомбинација на шуплините и електроните се ослободува енергија во вид на светлост. Светлосната енергија се добива за сметка на електричната енергија од еднонасочниот извор кој се користи за поларизирање на диодата.

Бојата на светлината зависи од употребениот полупроводнички материјал и од примесите. Еден од првите материјали бил галиум арсенид кој емитира инфрацрвена светлина. За изработка на LED со видлива светлина се употребува галиум фосфид (емитира црвена светлина) или галиум арсенид-фосфид (емитира зелена или жолта светлина).

Светлечката диода е многу слаб конвертор на енергија. Типичен степен на искористување е околу 0,5%, што значи дека само 5% од вложената енергија се претвора во светлина, а остатокот во топлина. Кај диодите кои работат во инфрацрвената област искористувањето е многу поголемо (10%).

Времето на вклучување и на исклучување на светлосните диоди е неколку наносекунди.

Графичкиот симбол на светлечката диода е прикажан на сл. 8.3.1.б, а нејзината струјно-напонска карактеристика во пропусното подрачје е прикажана на сл. 8.3.1.а. Дозволеният инверзен напон на овие диоди е низок (3V).



Сл.8.3.1. а) Карактеристика на светлечката диода б) Графички симбол за светлечка диода в) светлечката диода со извор и отпорник за ограничување на струјата

Типичен работен напон на светлечката диода е 1,5V до 2,5V, а струјата околу 10mA.

Диодата не се вклучува директно на генераторот  $E$ , туку преку отпорник поврзан сериски со неа, заради ограничување на струјата, сл 8.3.1.в.

Светлечките диоди се користат како индикатори на некоја состојба. Поради нивните добри особини, се употребуваат и во светлосните прикажувачи (display), кои служат за визуелно прикажување на информации во алфанумерички облик, т.е. во облик на низа букви или броеви (сл.8.3.3).

За прикажување на цифрите и некои букви се изработуваат елементи со седум сегменти. Секој сегмент е една диода со издолжена форма и сите седум сегменти емитураат светлина кога елементот треба да ја покаже цифрата 8, а за другите знаци се активираат различни негови комбинации.



Сл.8.3.3. Дисплеј вграден во електронски часовник.

#### Сл. 8.3.2. Светлечки диоди.

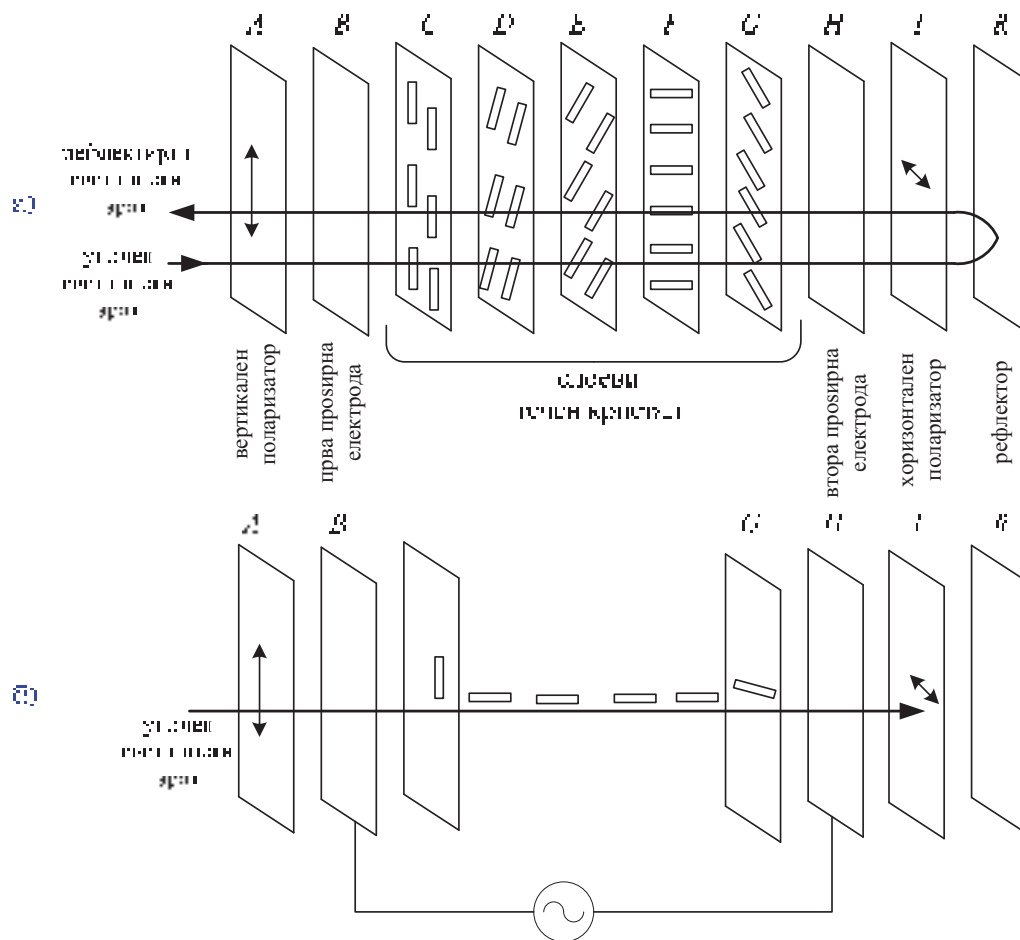
Нивната примена станува се поизразена и тоа во сложените светлосни прикажувачи на сигналните табли во командните центри, во авионите, бродовите, часовниците и др.

### 8.3.2. Светлосни прикажувачи со течен кристал (LCD)

Во последните неколку години е усовршена конструкцијата на светлосните прикажувачи (дисплеи) со течен кристал. Течните кристали се материи кои имаат особини на течност и на кристал: течни се и при собна температура можат да се прелеваат од еден сад во друг и светлоста различно се простира во различни правци, па се однесуваат како кристали.

Тие се од органско потекло и постојат многу материјали кои ги покажуваат овие својства. Молекулите на течните кристали се со издолжен облик. Едниот крај на молекулите е позитивен, а другиот негативен, а вкупниот молекул е неутрален. Под дејство на силите и на слабо електрично поле, молекулите на течните кристали можат да се насочат во насока на полето.

Сите молекули во еден слој се наредени во една насока. Ако повеќе вакви слоеви се постават меѓу две прозирни и проводни електроди, се добива сегмент на течен кристал (сл.8.3.4). На сл. 8.3.4, прозирните електроди се  $B$  и  $H$ , а слоеви на течен кристал се  $C$ ,  $D$ ,  $E$ ,  $F$  и  $G$ . Реално бројот на овие слоеви е многу поголем.

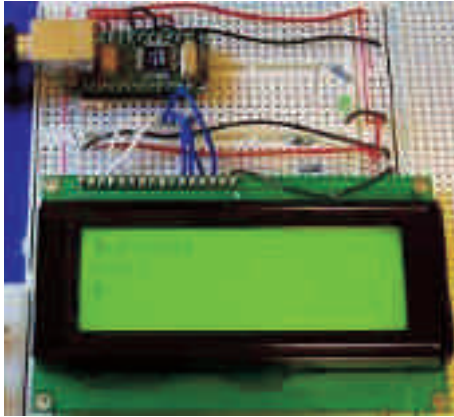


Сл. 8.3.4. а) Сегмент на течен кристал без вклучено електрично поле, б) сегмент на течен кристал со вклучено електрично поле.

Пред првата просирна електрода се поставува вертикален поларизатор (оптичка решетка) низ кој поминуваат светлосните зраци кои осцилираат само во вертикален правец. Овој светлосен бран поминува низ првата електрода и низ првиот слој на течен кристал непроменет. Следните слоеви *D*, *E* и *F* го завртуваат правецот на осцилирање на светлосниот бран кон десно, а слојот *G* го поставува во хоризонтална положба. Потоа светлосниот бран поминува низ другата електрода и доаѓа на хоризонталниот поларизатор *I* и тој го пропушта само светлосниот бран кој осцилира во хоризонтален правец. Овој светлосен бран удира на рефлекторот *R* (огледало) и се одбива назад и се враќа по истиот пат и доаѓа до местото од каде тргнал. Ако светлосниот бран тргне од некое место кон едно огледало и се врати по истиот пат назад, на неговиот пат не постојат препреки. Овој сегмент е невидлив.

Ако на просирните електроди се приклучи напон, меѓу нив постои електрично поле. Молекулите на течните кристали се насочуваат во насока на полето. Само молекулите кои се непосредно до просирната електрода остануваат во првобитна положба. Вака подредените молекули на течните кристали не го завртуваат светлосниот бран и тој доаѓа вертикално поларизиран до хоризонталниот поларизатор *I*. Низ него не може да помине и останува во

течниот кристал. Течниот кристал ја апсорбира светлоста и се однесува како дупка во која светлоста се губи, па има црна боја.



Сл. 8.3.5. Дисплеј со течен кристал.

Течниот кристал има типичен отпор од  $100 \text{ M}\Omega/\text{cm}^2$ . Густината на струјата која тече низ него е  $1\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Тоа значи дека потрошувачката му е мала. Тие се прават во седумсегментен облик за покажување на цифри. Се користат кај дигиталните часовници, електронските инструменти, дигитроните и др. Од течни кристали исто така се изработуваат екраните кај сметачите и телевизорите.

### Прашања

1. Како работат светлечките диоди?
2. Каде наоѓаат примена светлечките диоди?
3. Колкав степен на искористување имаат светлечките диоди?
4. Зошто течните кристали го добиле ова име?
5. Какви се молекулите на течните кристали?
6. Што се случува кога на течниот кристал ќе се приклучи напон?
7. Каде се користат течните кристали?

**ЗАПОМНИ:**

1. Фотодетекторите се елементи кои ја претвораат енергијата на светлосното зрачење во електрична енергија или ги менуваат своите електрични својства под дејство на светлината.

2. Фотоотпорникот е полупроводнички елемент чиј електричен отпор се менува при промена на светлината која паѓа врз неговата површина.

3. Фотодиодата е исто така полупроводнички елемент со еден *pn*-спој и два изводи, чија електрична проводност се менува со промена на светлосниот флукс кој паѓа на површината на спојот.

4. Фототранзистор е полупроводнички елемент со два *pn*-споја и три изводи. Тој е сличен со обичниот транзистор, разликата е во тоа што на горната површина е формиран прозорец од просирен материјал, низ кој паѓа светлината.

5. Фотогенераторите произведуваат електромоторна сила на своите изводи под дејство на светлосно зрачење.

6. Фотоелектронски светлосни извори се елементи кои електричната енергија ја претвораат во енергија на зрачење. Тие се користат за осветлување и за визуелно прикажување на информации. Најзначајни се светлечките полупроводнички диоди (LED).

7. Течните кристали се материи кои имаат особини на течност и на кристал: течни се и при собна температура можат да се прелеваат од еден сад во друг и светлоста различно се простира во различни правци, па се однесуваат како кристали. Тие наоѓаат примена во светлосните покажувачи со течен кристал.

## 7. ПРИЛОГ -ПРЕГЛЕД НА ОСНОВНИ ГОЛЕМИНИ И МЕРНИ ЕДИНИЦИ

Меѓународниот систем на единици (SI) во нашата земја се применува од 1981 година. Системот на мерни единици се состои од основни мерни единици и изведени мерни единици. Основните мерни единици и величините на кои тие се однесуваат се дадена во табела 1.

Табела 1. Основни мерни единици

големина	ознака	име	скратена ознака	димензија
должина	$l, s$	метар	m	m
маса	$m$	килограм	kg	kg
време	$t$	секунда	s	s
јачина на електрична струја	$I$	ампер	A	A
термодинамичка температура	$T$	келвин	K	K
интензитет на светлина		кандела	cd	cd
количина на материја		мол	mol	mol

Изведените мерни единици се образуваат од основните мерни единици со помош на алгебарски изрази, со употреба на математички симболи за множење и делење. Во табела 2 се дадени поважните општи изведени единици и изведените единици за електричните и магнетните големини.

Голем број од изведените единици имаат посебни имиња и ознаки. Од овие единици можат да се формираат нови изведени единици, на ист начин како и од основните.

Често пати мерните единици не се најпогодни во сите подрачја на примена. Заради тоа се користат и децимални мерни единици кои се добиват со додавање на префикс пред ознаките на мерните единици. Имињата на префиксите, нивните ознаки и бројни вредности дадени се во табела 3.

Физички константи кои се користат најчесто во изразите се следните.

Диелектрична константа на вакуумот  $\epsilon_0=8,85 \cdot 10^{-12}$  F/m

Магнетна пермеабилност на вакуумот  $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m

Елементарен електричен полнеж  $e=1,6 \cdot 10^{-19}$  C

Маса на електронот во мирување  $m_e=9,1 \cdot 10^{-31}$  kg

Маса на протонот во мирување  $m_p=1,67 \cdot 10^{-27}$  kg

Маса на неутронот во мирување  $m_n=1,67 \cdot 10^{-27}$  kg

Брзина на светлината во вакуум  $c=3 \cdot 10^8$  m/s

Табела 2. Поважни изведени мерни единици

големина	ознака	име	скратена ознака	димензија
агол во рамнина		радијан	rad	
просторен агол		стерадијан	sr	
линеарна брзина	$v$	метар во секунда	m/s	m/s
аголна брзина	$\omega$	радијан во секунда	rad/s	rad/s
забрзување	$a$	метар по секунда на квадрат	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>
сила	$F$	њутн	N	kgm/s <sup>2</sup>
притисок	$p$	паскал	Pa	kgm/s <sup>2</sup>
механички момент	$M$	њутн-метар	Nm	kgm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
работа, енергија и количина на топлина	$A, W$	џул	J	kgm <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
моќност (моќ, снага)	$P$	ват	W	kgm <sup>2</sup> /s <sup>3</sup>
електричен полнеж (количество на електрицитет)	$q, Q$	кулон	C	As
јачина на електрично поле	$E$	волт по метар	V/m	kgm/As <sup>3</sup>
електрично поместување (електрична индукција)	$D$	кулон по кв. метар	C/m <sup>2</sup>	As/m <sup>2</sup>
диелектрична поларизација	$P$	кулон по кв. метар	C/m <sup>2</sup>	As/m <sup>2</sup>
ел. потенцијал, напон, ЕМС	$V, U, E$	волт	V	kgm <sup>2</sup> /As <sup>3</sup>
капацитет	$C$	фарад	F	A <sup>2</sup> s <sup>4</sup> /kgm <sup>2</sup>
електричен отпор	$R$	ом	$\Omega$	kgm <sup>2</sup> /A <sup>2</sup> s <sup>3</sup>
густина на ел. енергија	$J$	ампер по кв. метар	A/m <sup>2</sup>	A/m <sup>2</sup>
електрична проводност	$G$	сименс	S	A <sup>2</sup> s <sup>3</sup> /kgm <sup>2</sup>
јачина на магнетно поле	$H$	ампер по метар	A/m	A/m
магнетна индукција	$B$	тесла	T	kg/As <sup>2</sup>
флуks на магнетна индукција	$F$	вебер	Wb	kgm <sup>2</sup> /As <sup>2</sup>
магнетомоторна сила	$NI$	ампер	A	A
магнетен отпор	$Rm$	ампер по волт секунда	A/Vs	A <sup>2</sup> s <sup>2</sup> /kgm <sup>2</sup>
индуктивитет	$L, M$	хенри	H	kgm <sup>2</sup> /A <sup>2</sup> s <sup>2</sup>
фреквенција	$f$	херц	Hz	1/s

Табела 3. Префикси

име	ознака	фактор	име	ознака	фактор
екса	$E$	10 <sup>18</sup>	деци	$d$	10 <sup>-1</sup>
пета	$P$	10 <sup>15</sup>	центи	$c$	10 <sup>-2</sup>
тера	$T$	10 <sup>12</sup>	мили	$m$	10 <sup>-3</sup>
гига	$G$	10 <sup>9</sup>	микро	$\mu$	10 <sup>-6</sup>
мега	$M$	10 <sup>6</sup>	нано	$n$	10 <sup>-9</sup>
кило	$K$	10 <sup>3</sup>	пико	$p$	10 <sup>-12</sup>
хекто	$h$	10 <sup>2</sup>	фемто	$f$	10 <sup>-15</sup>
дека	$da$	10 <sup>1</sup>	ато	$a$	10 <sup>-18</sup>



## ЛИТЕРАТУРА

1. Стојановски П., **Основи на електротехниката, I дел електростатика**, Технички факултет Битола, 1988.
2. Јанев Љ., Ололовска-Гагоска Л., **Основи на електротехниката-1**, Просветно дело, Скопје, 1990.
3. Сурутка Ј., **Основи електротехнике-електромагнетизам**, Академска мисао, Београд, 2003.
4. Сурутка Ј., **Основи електротехнике-електростатика и сталне једносмерне струје**, Академска мисао, Београд, 2003.
5. Радевска-Попниколова М., Ацевски Н., **Електротехника**, Технички факултет- Битола, 2004.
6. Пешевска-Тримоска Р., **Збирка задачи по основи на електротехниката 1 и 2**, Скопје, 1995.
7. Поповиќ Б., **Основи електротехнике I**, Граѓевинска књига, Београд, 1989.
8. Поповиќ Б., **Основи електротехнике II**, Граѓевинска књига, Београд, 1978.
9. Поповиќ Б., Ѓорѓевиќ А., **Основи електротехнике III**, Граѓевинска књига, Београд, 1982.
10. Б. Митриновиќ, **Трансформатори**, Научна књига, Београд, 1964.
11. Пиотровски Л. М, **Електричне машине**, Техничка књига, Загреб.
12. Nikilic N., Dilberovic N., **Elektricne masine**, Zbirka zadataka, Naucna Knjiga, Beograd, 1969.
13. Митраковиќ Б., **Комутаторни мотори**, Начна књига, Београд, 1979.
14. Угуровски З., **Основи на електротехниката 2**, за втора година ,Скопје, 1991 година.
15. Опачиќ Р, **Електроника 1**, за други разред електротехничке школе, Завод за уџбенике и наставна средства, Београд, 2002.
16. Камиловски М., **Електронски елементи**, Скопје, 1999.

## Содржина

Предговор .....	2
<b>1. Општи поими во електротехниката.....</b>	<b>1</b>
1.1. Историски почетоци .....	1
1.2. Структура на материјата .....	2
1.3. Електрични својства на материјата .....	3
1.4. Проводници и изолатори.....	4
1.5. Систем на мерни единици.....	5
1.5. Грешки при мерење .....	6
<b>2. Електростатика .....</b>	<b>11</b>
2.1. Кулонов закон .....	11
2.2. Електростатичко поле.....	13
2.3. Електричен потенцијал и напон .....	17
2.4. Диелектрици и нивни својства .....	19
2.5. Кондензатори и електричен капацитет .....	21
2.6. Поврзување на кондензатори.....	24
2.6.1. Паралелна врска на кондензатори.....	24
2.6.2. Сериска (редна) врска на кондензатори .....	25
2.6.3. Комбинирана врска на кондензатори.....	26
2.7. Енергија на електростатичкото поле.....	28
<b>3. Еднонасочни струи .....</b>	<b>33</b>
3.1. Поим за електрична струја.....	33
3.2. Омов закон, електричен отпор и проводност.....	36
3.3. Специфичен електричен отпор и специфична проводност .....	38
3.4. Поврзување на отпорници .....	41
3.4.1. Сериско поврзување на отпорници.....	41
3.4.2. Паралелно поврзување на отпорници.....	42
3.5. Мерење на некои електрични големини .....	45
3.5.1. Мерење на електрична струја .....	45
3.5.2. Мерење на електричен напон .....	46
3.5.3. Мерење на електричен отпор.....	47
3.6. Џулов закон и негова примена .....	49
3.7. Електромоторна сила и внатрешен отпор на генераторот.....	51
3.8. Струјно коло составено од еден извор и еден отпорник.....	53
3.9. Просто струјно коло составено од повеќе извори и отпорници.....	54
3.10. Напон меѓу две точки во струјно коло .....	56
3.11. Сложено електрично коло.....	58
3.12. Прв и втор Кирхофов закон .....	58

3.13. Примена на првиот и вториот Кирхофов закон за решавање на сложени електрични кола.....	61
<b>4. Наизменични струи .....</b>	<b>67</b>
4.1. Добивање и прикажување на наизменичните големини.....	67
4.1.1. Општи поими.....	67
4.2. Параметри на простопериодични големини .....	68
4.2.1. Фаза на наизменичните големини.....	68
4.2.2. Периода на наизменичните големини.....	69
4.2.3. Фреквенција на наизменичните големини .....	70
4.2.4. Моментална и максимална вредност на наизменични големини .....	71
4.2.5. Ефективна вредност на наизменичните големини .....	72
4.2.6. Средна вредност на наизменичната струја.....	74
4.2.8. Собирање и одземање на наизменичните струи и напони кои имаат иста фреквенција .....	77
4.3. Определување на промената на електричната струја и моќноста во електрично коло со отпорник, калем и кондензатор .....	80
4.3.1. Анализа на однесување на отпорник, калем и кондензатор во коло со наизменичен напон $u(t) = U_m \sin \omega t$ .....	80
4.3.2. Електрично коло со активен отпор $R$ .....	82
4.3.3. Електрично коло со идеален индуктивен калем $L$ ( $R=0$ ) .....	85
4.3.6. Електрично коло со идеален кондензатор $C$ ( $R=0$ ).....	90
<b>5. Структура и електрични особини на материјата .....</b>	<b>97</b>
5.1. Структура на материјалите .....	97
5.2. Електрични својства на материјата .....	99
5.3. Полупроводници .....	101
5.3.1. Чисти полупроводници.....	102
Сл. 5.3.2. Ковалентни врски во кристална структура на чист силициум, претставени во една рамнина. ....	102
5.3.2. Полупроводници од $n$ тип .....	103
5.3.3. Полупроводници од $p$ тип .....	104
<b>6. Полупроводнички диоди.....</b>	<b>107</b>
6.1. $pn$ спој .....	107
6.1.1. Создавање на $pn$ спој .....	107
6.1.2. Директно поларизиран $pn$ спој .....	109
6.1.3. Инверзно поларизиран $pn$ спој .....	110
6.1.4. Пробивање на $pn$ спојот .....	111
6.2. Диоди .....	112
6.2.1. Струјно напонска карактеристика на диодата .....	112
6.2.2. Параметри на диодата .....	114
6.2.3. Апроксимации на диодата .....	115
6.2.4. Видови полупроводнички диоди .....	116
6.3. Дифузен и бариерен капацитет на диодата .....	117

<b>7. Транзистори и тиристори</b> .....	121
7.1. Транзистори.....	121
7.1.1. Општи поими.....	121
7.1.2. Принцип на работа на транзисторите .....	121
7.1.3. Неполаризиран транзистор .....	122
7.1.4. Поларизација на <i>npr</i> транзистор и принцип на работа .....	123
7.1.5. Поларизација на <i>pnr</i> транзистор и принцип на работа .....	125
7.1.6.1. Статичка карактеристика на транзисторот.....	127
7.2. Тиристори .....	129
7.2.1. Општи поими.....	129
7.2.2. Типови на тиристори .....	130
7.2.3. Статичка карактеристика на тиристорот .....	131
<b>8. Фотоелектрични елементи</b> .....	135
8.1. Физички основи на фотоелектричните појави .....	135
8.2. Фотодетектори .....	136
8.2.1. Фотоотпорник .....	138
8.2.2. Фотодиода.....	139
8.2.3. Фототранзистор.....	140
8.3. Фотоелектронски светлосни извори .....	142
8.3.1. Светлечки полупроводнички диоди (LED) .....	142
8.3.2. Светлосни прикажувачи со течен кристал (LCD).....	143
<b>Литература</b> .....	149