

## SADRŽAJ

1.1	Pojam i podjela naboja .....	2
1.2	Očuvanje i akumuliranje naboja .....	2
1.3	Razdioba električnih naboja .....	3
2.1	Područje primjene i formulacija .....	4
2.2	Utjecaj materijalne sredine .....	4
3.1	Osnovni pojmovi i veličine .....	5
3.2	Elektrostatsko polje tačkastog naboja .....	5
3.3	Linije elektrostatskog polja .....	5
3.4	Aditivnost elektrostatskog polja .....	5
3.5	Homogeno elektrostatno polje .....	6
5.1	Električni potencijal polja tačkastog naboja .....	7
5.2	Definicija električnog napona .....	8
5.3	Napon u polju tačkastog naboja .....	8
6.1	Električni kapacitet i kapacitivnost .....	8
6.2	Električni kondenzatori .....	8
6.3	Pločasti kondenzatori .....	9
6.4	Kuglasti kondenzatori .....	9
6.5	Cilindrični kondenzatori .....	9
7.1	Paralelno vezivanje kondenzatora .....	10
7.2	Serijsko vezivanje .....	10
7.3	Mješovito vezivanje .....	11
1.1	Definicija i priroda nastanka .....	12
1.2	Jačina (jakost) električne struje .....	13
1.3	Gustoća električne struje .....	13
1.4	Stalna i promjenjiva istosmjerna struja .....	13
2.1	Električni otpor, otpornost i otpornik .....	14
2.2	Otpornost vodiča i temperaturna ovisnost .....	14
2.3	Formulacija i značenje Ohmovog zakona .....	15
4.1	Uslovi proticanja električne struje .....	15
4.2	Izvori, prijemnici i vodiči .....	15
4.3	Topologije električnih krugova .....	16

4.4	<i>Pojmovi značajni za električni krug</i> .....	16
4.1	<i>Galvanski elementi</i> .....	16
4.2	<i>Akumulatori</i> .....	16
5.1	<i>Podjela prijemnika</i> .....	17
5.2	<i>Pružanje otpora istosmjernoj struji</i> .....	18
6.1	<i>Serijska veza</i> .....	18
6.2	<i>Paralelna veza</i> .....	18
6.3	<i>Mješovita veza</i> .....	19
9.1	<i>Prvi Kirchhoffov zakon</i> .....	20
9.2	<i>Drugi Kirchhoffov zakon</i> .....	21
9.1	<i>Pojam električne snage</i> .....	21
9.2	<i>Algebarski predznak snage</i> .....	21

---

---

*Elektrostatika* je oblast elektronike koja izučava fizičke pojave unutar okruženja u kome se nalaze samo oni električni naboji koji u tom prostoru miruju i čiji se iznos ne mijenja - nema nikakve dinamike.

U svom proučavanju koristi se isključivo *makroskopskim pristupom* koji podrazumjeva razmatranje predmetnih fizikalnih promjena koje su usrednjenje unutar malih zapremina i tokom malih vremenskih intervala.

## 1. ELEKTRIČNI NABOJ

### 1.1 Pojam i podjela naboja

**Električni naboj** ( $q$  ili  $Q$ ) predstavlja fizikalnu veličinu kojom se opisuje temeljno svojstvo čestica koje uzajamno djeluju električnim silama. Naziva se još *električno opterećenje* ili količina elektriciteta. Jedinica za izražavanje električnog naboja je jedan *kulon* (C). (Jedan kulon je jedna amper sekunda)

Opšteprihvaćenim dogovorom ustanovljena je podjela električnih napona na "*pozitivne*" i "*negativne*". Za određeno tijelo kažemo da ima "pozitivan" električni napon ukoliko sadrži veći broj pozitivnih čestica (protona) u odnosu na negativne čestice (elektrone). Istom analogijom "negativan" električni napon će imati tijelo koje sadrži veći broj negativnih čestica.

Postoje i *neutralni* električni naboji. Za određena tijela kažemo da imaju "neutralni" električni naboj ukoliko sadrže jednak broj pozitivnih čestica (protona) i negativnih čestica (elektrona).

U elektrotehnici, za slučaj prostorno nepomičnih i vremesnki nepromjenjivih električnih naboja  $q_1$  i  $q_2$  čije su geometrijske dimenzije mnogo manje u odnosu na njihovo najmanje rastojanje između centara naboja, uz pretpostavku da je sredina u kojoj se nalaze homogena, izotropna i linearna sa dielektričnom konstantom  $\epsilon$ , mehaničko međudjelovanje, po osnovu postojanja elektomagnetske sile, opisuje se relacijom:

$$F = \frac{q_1 * q_2}{r_{12}^2} * r_{012}$$

( $r_{12}$  najkraće međusobno rastojanje između  $q_1$  i  $q_2$ ,  $r_{012}$  jedinični vektor usmjeren od  $q_1$  prema  $q_2$ ,  $k=1/4\pi\epsilon$  konstanta koja pokazuje utjecaj sredine za vakum je  $k=8,98*10^9 Nm^2/C^2$ )

Iz ove jednačine još zaključujemo da je sila obrnuto proporcionalna kvadratu rastojanja između ova dva naboja.

U elektrotehnici opće prihvaćeno je da dijelimo naboje da **POZITIVNE I NEGATIVNE**.

**KVANT ELEKTRIČNOG NABOJA** ili **OSNOVNI ELEMENTARNI PREDSTAVNIK** negativnog naboja je electron i njegov naboj iznosi

$$e=-1,6*10^{-19}C$$

Svaki naboj u prirodi može se predstaviti kao i samo kao cjelobrojni proizvod naboja elektrona (ili kvanta električnog naboja). To se predstavlja relacijom:

$$Q = N e$$

$$e - \text{naboj jednog elektrona} = -1,6 \cdot 10^{-19} C$$

$$N \in \mathbb{Z}.$$

### 1.2 Očuvanje i akumuliranje naboja

Zakon očuvanja električnog naboja u izoliranom sistemu predstavlja temeljni zakon elektrostatičke. *Ukupan električni naboj u izolovanom sistemu tokom vremena ostaje nepromijenjen.*"

Akumuliranje električnih naboja na materijalnim tijelima u pravilu se vrši dovodenjem ili odvođenjem elektrona. To se postiže:

- *trenjem jednog materijalnog tijela o drugo*
- *elektrostatskom indukcijom*
- *nabijanjem elektroda električnog kondenzatora električnim nabojem*

U smislu akumuliranosti električnih naboja, neko tijelo može biti:

- *električki pozitivno nabijeno* - količina pozitivnog električnog naboja veća je od količine negativnog električnog naboja
- *električki negativno nabijeno* - količina pozitivnog električnog naboja manja je od količine negativnog električnog naboja
- *električki neutralno* – ista količina pozitivnog i negativnog električnog naboja

Materijalna tijela, sa aspekta pomjeranja električnih naboja unutar njih, možemo podijeliti na:

- *vodiče* - ostvaruje se konstantno usklađeno pomjeranje električnih naboja unutar samih tijela čak i pri izlaganju tijela slabom električnom polju.
- *izolatore* – (dielektrici) ne ostvaruje se konstantno usklađeno pomjeranje električnih naboja unutar samih tijela čak i pri izlaganju tijela jakom električnom polju.
- *poluvodiče* - ostvaruje se konstantno usklađeno pomjeranje električnih naboja unutar samih tijela samo u slučaju izlaganja tijela jakom električnom polju.

Važno je voditi računa da je materijalna sredina: homogena, izotropna i linearna.

- **HOMOGENA SREDINA**- u svim elementarnim dijelovima zapremine ima iste fizičke osobine
- **IZOTROPNA SREDINA**- unutar svake svoje elementarne zapremine ima iste osobine u svim pravcima
- **LINEARNA SREDINA**-elektromagnetske osobine promatrane sredine nisu u funkciji intenziteta vanjskog djelovanja, bilo da su one električne ili magnetne prirode

### 1.3 Razdioba električnih naboja

Sa aspekta razdiobe električnih naboja u postoru formalno se može razlikovati:

- *tačkasta razdioba* – električni naboj akumuliran je na materijalnom tijelu čije su geometrijske dimeznije višestruko manje od geometrijskih dimenzija sistema unutar kojeg se analizira ponašanje tog naboja. Tačkasti naboj je takav električni naboj čije se elementi mogu zanemariti vezano za tijelo u kojem se nalazi, ali električni naboj ne može. Kvantitativna mjera je električni naboj (Q). Izražava se u kulonima (C).
- *Linijaska razdioba* - električni naboj uskladišten je na trodimenzionalnom materijalnom tijelu kod kojeg je jedna njegova dimenzija puno dominantnija u odnosu na druge dvije. Primjer linijske razdiobe je obični kabal. Kvantitativna mjera je linijska gustoća naboja ( $\lambda$ ). Izražava se u kulonima po metru (C/m).
- *površinska razdioba* - električni naboj uskladišten je na trodimenzionalnom materijalnom tijelu kod kojeg su njegove dvije dimenzije međusobno

usporedive i dominantne u odnosu na onu treću. Primjer za površinsku razdiobu je tanka vodljiva ploha. Kvantitativna mjera je površinska gustoća naboja ( $\sigma$ ). Izražava se u kulonima po kvadratnom metru ( $C/m^2$ ).

- *prostorna razdioba* - električni naboj uskladišten je na trodimenzionalnom materijalnom tijelu koje ima konačnu zapreminu (sve tri njegove dimenzije međusobno su usporedive). Kvantitativna mjera je prostorna ili zapreminska gustoća naboja ( $\rho$ ). Izražava se u kulonima po kubnom metru ( $C/m^3$ ).

Od svih navedenih razdiobi samo je *prostorna* razdioba fizički moguća, dok ostale tri čine njene specijalne slučajeve.

## 2. COULOMBOV ZAKON

### 2.1 Područje primjene i formulacija

*Coulombov zakon* predstavlja jedan od temeljnih zakona elektrostatičke. Definirao ga je Charles-Augustin de Coulomb 1785. Godine. Ovim zakonom opisuje se mehaničko djelovanje između tačkastih električnih naboja koji miruju u prostoru i čija se količina električnog naboja ne mijenja u toku vremena pri čemu osnovni uzrok tog djelovanja leži u elektromagnetnim svojstvima sistema. Coulombovim zakonom određuje se intenzitet, smjer i pravac sile međudjelovanja dva tačkasta naboja.

Coulombov zakon kaže da *veličina elektrostatičke sile između dva tačkasta naboja upravo je razmjerna proizvodu (umnošku) veličine oba naboja i obrnuto razmjerna kvadratu udaljenosti  $r$  između njih.*

Coulombov zakon možemo izraziti relacijom:

$$F_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}^2} \quad \begin{array}{l} \mathbf{k} - \text{konstanta} \\ \mathbf{F} - \text{elektrostatička sila} \\ \mathbf{q_1, q_2} - \text{tačkasti naboji} \\ \mathbf{r} - \text{udaljenost između naboja} \end{array}$$

U slučaju istog algebarskog znaka kod oba električna naboja, elektrostatička sila će imati takav smjer kojim će se nastojati povećati najkraća međusobna udaljenost između tih naboja. U slučaju različitih algebarskih znakova smjer sile će biti usklađen s težnjom smanjenja međusobne najkraće udaljenosti između naboja.

### 2.2 Utjecaj materijalne sredine

Coulombov zakon pokazuje da materijalna sredina u kojoj se električni naboji nalaze bitno utiče na njihovo međudjelovanje. Tako imamo relaciju:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon} \quad \begin{array}{l} \epsilon - \text{dielektrična propustljivost ili dielektrična} \\ \text{permitivnost} \end{array}$$

Parametar  $\epsilon$  naziva se dielektrična propustljivost ili dielektrična permitivnost i izražava karakteristiku sredine. Parametar  $\epsilon$  za vakuum ima vrijednost  $\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$ . Izražava se kroz relaciju:

$$\epsilon_R = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad \epsilon_R - \text{relativna dielektrična konstanta}$$

Relativna dielektrična propustljivost je pozitivan realan broj koji pokazuje koliko puta je dielektrična propustljivost tog dielektrika veća od dielektrične propustljivosti vakuma. Kada na kraju uvrstimo sve gore navedene veličine dobićemo novu formulu za Coulombov zakon:

$$F_{12} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon r_{12}^2} r_{012}$$

Može se pokazati da je resultantna Kulonova sila koja djeluje na naboj  $q_1$  jednaka vektorskom zbiru Kulonovih sila kojima naboji  $q_2$  i  $q_3$  pojedinačno djeluju na naboj  $q_1$ .

Kulonov zakon vrijedi na udaljenostima od  $10^{-18}$  m pa do nekoliko kilometara.

### 3. ELEKTROSTATSKO POLJE

#### 3.1 Osnovni pojmovi i veličine

**ELEKTRIČNO POLJE-** Električno polje je prostor u kojem električni naboj djeluje privlačnom (odnosno odbojnom) silom na drugo električno tijelo.

*Elektrostatsko polje* se definiše kao naročito fizičko stanje prostora u okolini nepomičnih i vremenski nepromjenjivih električnih naboja unutar kojeg se registrira djelovanje mehaničkom silom na druge električne naboje kada se oni unesu u taj prostor. Osnovna kvantitativna mjera elektrostatskog polja je vektor jačine elektrostatskog polja (**E**). Jedinica mjere intenziteta jačine elektrostatskog polja je volt po metru (**V/m**).

#### 3.2 Elektrostatsko polje tačkastog naboja

Elektrostatsko polje samo jednog tačkastog električnog naboja (**q**) na udaljenosti (**r**) u vakumu glasi možemo izračunati pomoću izraza:

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} r_0$$

Ako se u elektrostatsko polje jačine **E** unese tačkasti električni naboj **q<sub>0</sub>** na njega će djelovati Coulombova sila što možemo predstaviti formulom:

$$F_0 = q_0 E$$

Vektori Coulombova sile i elektrostatskog polja su jednakog pravca. Smjer tog pravca određuje algebarski znak električnog naboja **q<sub>0</sub>** tako da ako je on pozitivan onda su vektori **F<sub>0</sub>** i **E** jednakog smjera, a ako je negativan onda su suprotnog smjera.

Smjer vektor jakosti elektrostatskog polja zavisi od algebarskog znaka električnog naboja. Ukoliko je **q<sub>0</sub>** pozitivno tada će vektor jakosti elektrostatskog polja imati smjer od tog električnog naboja ka okolnom prostoru, dok ukoliko je **q<sub>0</sub>** negativno, tada će vektor jakosti elektrostatskog polja imati smjer od okolnog prostora ka tom električnom naboju.

#### 3.3 Linije elektrostatskog polja

*Vektor jakosti elektrostatskog polja* spada u klasu izvornih vektorskih polja. Grafički se predstavlja linijama polja. To su krive linije kod kojih se u svakoj tački tangenta podudara s pravcem vektora polja. Linije polja su prekidne. One izviru iz pozitivnih električnih naboja, a poniru u negativne električne naboje. Pozitivni električni naboj je izvor polja, negativni električni naboj je njegov ponor. Linije polja ne mogu se međusobno sijeći. Gustoća linija polja koristi se kao vizualni pokazatelj njegovog intenziteta.

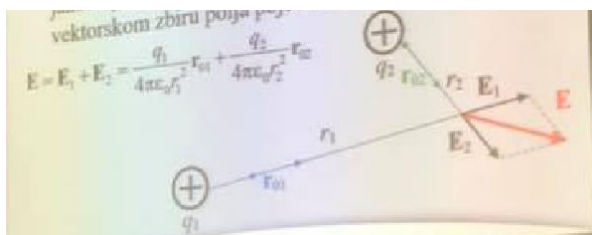
### 3.4 Aditivnost elektrostatskog polja

Zbir električnih naboja u jednoj tački jednak je jednak zbiru pojedinačnih naboja.

Ako se u prostoru nalaze električni naboji ( $q_1$ ) i ( $q_2$ ) koji stvaraju elektrostatska polja  $E_1$  i  $E_2$  tada je ukupna jačina polja  $E$  u proizvoljnoj tački prostora jednaka vektorskom zbiru polja pojedinačnih naboja. To možemo predstaviti formulom:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2$$

$$\mathbf{E} = \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_1^2} \mathbf{r}_{01} + \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r_2^2} \mathbf{r}_{02}$$



Slika 1: Grafički prikaz formule

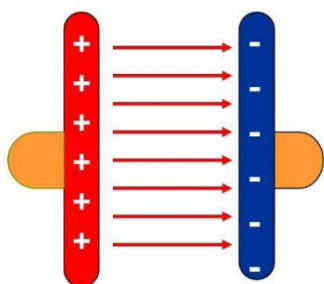
### 3.5 Homogeno elektrostatno polje

Ukoliko sistem našeg elektrostalnog polja obuhvata dva pozitivna tačkasta električna naboja tada možemo primjetiti da se polja međusobno odbijaju tako da u prostoru neposredno između naboja nema linija polja, to jest polja su se poništila.

Ukoliko sistem našeg elektrostalnog polja obuhvata jedan pozitivan i jedan negativan tačkasti električni naboj tada možemo primjetiti da se polja međusobno podupiru tako da su u prostoru neposredno između naboja linije polja veoma gusto raspoređene.

Elektrostatsko polje kod kojeg je vektor jačine elektrostatskog polja ( $\mathbf{E}$ ) konstantan nazivamo *homogeno elektrostatsko polje*. Linije homogenog elektrostatskog polja su paralelne i konstantne gustoće.

Važno je napomenuti da se često homogeno polje kod kojeg je vektor jačine polja ( $\mathbf{E}$ ) konstantan miješa sa poljem kod koje je intenzitet jačine polja ( $\mathbf{E}$ ) konstantan. Ove dvije veličine treba dobro razlikovati.



Slika 2: Grafički prikaz šeme homogenog elektrostalnog polja

## 4. GAUSOV TEOREM

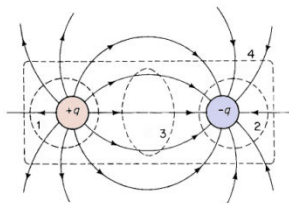
Broj linija elektrostatskog polja koji prodiru kroz neku površinu nazivamo tokom ili fluksom elektrostatskog polja. Fluks se označava sa ( $\Phi$ ). Jedinica mjere toka elektrostatskog polja je veber ( $\mathbf{Wb}$ ). Kod homogenog elektrostatskog polja fluks računamo po formuli:

$\Phi$  - fluks

$$\Phi = \mathbf{E} \cdot \mathbf{S} = E S \cos(\angle \mathbf{E}, \mathbf{n}_0)$$

$E$  – jačina elektrostatskog polja  
 $S$  - površina

Gausov teorem kaže da je *tok vektora jačine elektrostatskog polja ( $\mathbf{E}$ ) kroz zatvorenu površinu u sredini jednak količniku algebarskog zbira naboja obuhvaćenih tom površinom i dielektrične popustljivosti te površine.*



**Slika 3:** Grafički prikaz šeme Gausovog teorema

Ako je elektrostatičko polje homogeno i jačine intenziteta ( $\mathbf{E}$ ) u vakuumu, a površina ( $S$ ) okomita na to elektrostatičko polje, teorem se može matematički interpretirati formulom:

$$\mathbf{E} S = \frac{\sum Q}{\epsilon_0}$$

## VODIČI U ELEKTROSTATSKOM POLJU

Da bi u makroskopskom smislu nastupilo ravnotežno stanje, odnosno prostorno mirovanje slobodnih el naboja neophodno je u vodljivim tijelima ispuniti sljedeće uvjete:

1. u unutrašnjosti vodiča  $E=0$  (vektor jakosti el polja jednak nuli)
2. tangencijalna komponenta vektora jakosti el polja neposredno uz površinu vodiča mora biti jednaka nuli
3. sve tačke vodljivog tijela su na istom električnom potencijalu. U elektrostatici su sve tačke površine u istom potencijalu i onda se površina zove ekvipotencijalna;
4. normalna komponenta vektora jakosti el polja u sredini koja okružuje vodljivo tijelo proporcionalna je površinskoj gustoći el naboja raspoređenog po površini vodiča
5. unutar vodiča nema slobodnih naboja.

Kad se vodljivo tijelo izloži stranom el polju, kratko dođe do pomjeranja u vodiču kako bi novi raspored naboja u vodiču zadovoljio uvjete ravnoteže. Nakon preraspodjele linije polja se mijenjaju.

**ELEKTROSTATSKA INDUKCIJA-** Pojava da se pod utjecajem stranog elektrostatskog polja na električni neutralnom vodljivom tijelu uspostavlja nova razdioba električnih naboja  
**INDUCIRANI ELEKTRIČNI NABOJI-** naboji koji se pri elektrostatskoj indukciji pojave na jednom i na drugom kraju vodiča

Ova razdioba zavisi od dvije stvari: 1. geometrijskog oblika površine vodiča i 2. načina na koji je izvršeno nabijanje vodiča. (Na šiljatim tijelima je mnogo veća površinska gustoća el naboja)

## 5. ELEKTRIČNI POTENCIJAL I NAPON

### 5.1 Električni potencijal polja tačkastog naboja

*Električni potencijal* je potencijalna energija koju u nekoj tački elektrostatičkog polja ima jedan jedinični naboj. Označava se sa ( $V$ ). Jedinica mjere za električni potencijal je jedan volt ( $V$ ).



U slučaju elektrostatnog polja stvorenim tačkastim nabojem  $q$ , električni potencijal tačke na minimalnoj udaljenosti  $r$  od tačkastog naboja, u odnosu na daleku tačku izračunava se po formuli:

$$V = E \cdot r = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r}$$

U slučaju polja ( $n$ ) prostorno raspoređenih tačkastih naboja ( $q_n$ ), električni potencijal ( $V$ ), tačke udaljene ( $r_i$ ) od naboja ( $q_i$ ) za  $i=1,2,3,\dots,n$  dobijamo relaciju:

$$V = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i}$$

Ova formula naziva se još i *formula za aditivnost potencijala*.

### 5.2 Definicija električnog napona

Električni napon između tačaka **A** i **B** definišemo kao razliku električnih potencijala tih tačaka  $V_A$  i  $V_B$  u elektrostatnom polju. Električni napon označava se sa (**U**). Jedinica mjere električnog napona je jedan volt (**V**).

$$U_{AB} = V_A - V_B$$

Ova definicija je postojana samo ako su potencijali izračunati za istu referentnu tačku. U praksi se za referentnu tačku najčešće uzima daleka tačka, ali ne mora obavezno biti tako.

### 5.3 Napon u polju tačkastog naboja

Električni napon elektrostatnog polja tačkastog naboja ( $q$ ) računamo po formuli:

$$U_{AB} = V_A - V_B = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_B} \right)$$

Izraz iz formule će predstavljati električni napon samo ako su potencijali ( $V_A$ ) i ( $V_B$ ) izračunati u odnosu na istu referentnu tačku.

Ukoliko su **A**, **B** i **C** proizvodne tačke posmatranog elektrostatnog polja tada vrijedi tzv. *konzervativnost elektrostatnog polja* koja se može izraziti sljedećim izrazom:

$$U_{BA} = -U_{AB}$$

$$U_{AC} = V_A - V_C = (V_A - V_B) + (V_B - V_C) = U_{AB} + U_{BC} = U_{AB} - U_{CB}$$

## 6. ELEKTRIČNI KAPACITET

### 6.1 Električni kapacitet i kapacitivnost

*Električni kapacitet* nekog tijela ili sistema vodljivih tijela možemo definisati kao sposobnost tog (tih) tijela da pri djelovanju električnog napona (**U**) akumulira na sebe određenu količinu naboja. Označava se sa (**C**). Jedinica mjere za električnu kapacitivnost je jedan farad (**F**). Jedan farad je veoma velika većina pa se u praksi koriste mnogo manje vrijednosti.

### 6.2 Električni kondenzatori

*Električni kondenzator* predstavlja namjenski konstruisan uređaj koji je, unutar svoje strukture, u stanju akumulirati određenu količinu naboja, odnosno određeni iznos elektrostatne energije. Između napona (**U**) na koji je priključen kondenzator, naboja (**Q**) koji se tom prilikom akumulira na njemu i njegove kapacitivnosti (**C**) vrijedi relacija:

$$Q = U C$$

$Q$  – elektrostatski naboj  
 $U$  – električni napon  
 $C$  – električna kapacitivnost

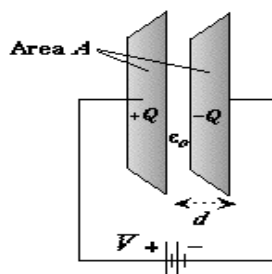
Energiju koja se akumulira u kondenzatoru možemo tada možemo izraziti formulom:

$$W = \frac{CU^2}{2}$$

### 6.3 Pločasti kondenzatori

Pločasti kondenzatori čine dvije paralelne vodljive ploče gdje je na jednoj jednoliko raspoređen naboj  $+Q$ , a na drugoj  $-Q$ . Ploče kondenzatora nazivaju se i elektrode. Između ploča se nalazi homogeno elektrostatsko polje intenziteta koji možemo izraziti kao:

$$E = U/d$$



**Slika 4:** Grafički prikaz šeme pločastog kondenzatora

Ako se između elektroda nalazi zrak tada kažemo da se radi o zračnom pločastom kondenzatoru. Njegova kapacitivnost izračunava se po formuli:

$$C = \epsilon_0 \frac{S}{d}$$

$S$  – površina elektrode pločastog kondenzatora  
 $d$  – udaljenost između elektroda

### 6.4 Kuglasti kondenzatori

Kuglasti kondenzator čine dvije koncentrične vodljive kugle poluprečnika  $r_1 < r_2$  koje su nabijene jednoliko po svojoj površini električnim nabojem  $+Q$ , odnosno  $-Q$ , respektivno. Naziva se još i sverni kondenzator. Ako se između dvije sfere nalazi zrak tada kažemo da se radi o zračnom kuglastom kondenzatoru. Njegova kapacitivnost izračunava se po formuli:

$$C = \frac{4\pi\epsilon_0}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}}$$

### 6.5 Cilindrični kondenzatori

Cilindrični kondenzator čine dva vodljiva koaksijalna šuplja cilindra, poluprečnika  $r_1 < r_2$  koje su nabijene jednoliko po svojoj površini električnim nabojem  $+Q$ , odnosno  $-Q$ , respektivno. Ako se između cilindara nalazi zrak tada kažemo da se radi o zračnom

cilindričnom kondenzatoru čija se kapacitivnost u slučaju dužine cilindra  $l$  izračunava po formuli:

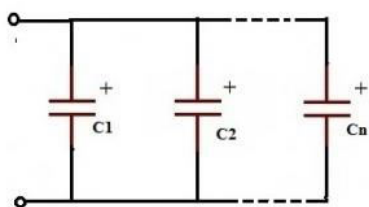
$$C = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad l - \text{dužina cilindra}$$

## 7. POVEZIVANJE KONDENZATORA

Kondenzatori se proizvode u serijama. U stvarnim sistemima oni se moraju međusobno povezivati. Dva osnovna načina povezivanja kondenzatora su : paralelno i serijski povezivanje. Ova dva načina mogu se međusobno kombinovati.

### 7.1 Paralelno vezivanje kondenzatora

Paralelno vezivanje kondenzatora nastaje tako što sve početke vezemo u jednu zajedničku tačku, a sve krajeve u drugu zajedničku tačku. Kod paralelnog vezivanja svi električni kondenzatori su izloženi djelovanju napona ( $U$ ) istog iznosa.



Slika 5: Grafički prikaz šeme paralelne veze kondenzatora

Ukupni električni naboj ovakve kombinacije jednak je zbiru naboja pojedinih kondenzatora.

$$Q_{eq} = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n$$

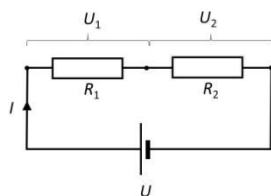
$$Q = C_{eq} U$$

Paralelnu vezu kondenzatora karakteriše elektrostatična kapacitivnost koja je jednaka algebarskoj sumi kapacitivnosti svih pojedinačnih kondenzatora. To možemo prikazati izrazom:

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + \dots + C_n = \sum_{k=1}^n C_k$$

### 7.2 Serijsko vezivanje

Serijsko vezivanje kondenzatora nastaje kada završetak (kraj) prvog kondenzatora vezemo za početak drugog kondenzatora i sve tako do posljednjeg kondenzatora.



Slika 6: Grafički prikaz šeme serijske veze kondenzatora

Svi serijski povezani kondenzatori imaju istu količinu elektrostatičnog naboja. To možemo izraziti relacijom:

$$Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q$$

Ukupni električni napon ovakve kombinacije jednak je zbiru napona pojedinih kondenzatora.

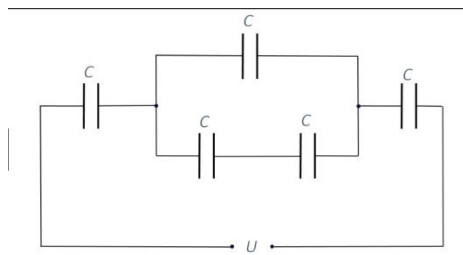
$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$$

Elektrostatna kapacitivnost kondenzatora serijskog vezivanja izračunava se pomoću izraza:

$$\frac{1}{C_{eq}} + \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{C_k}$$

### 7.3 Mješovito vezivanje

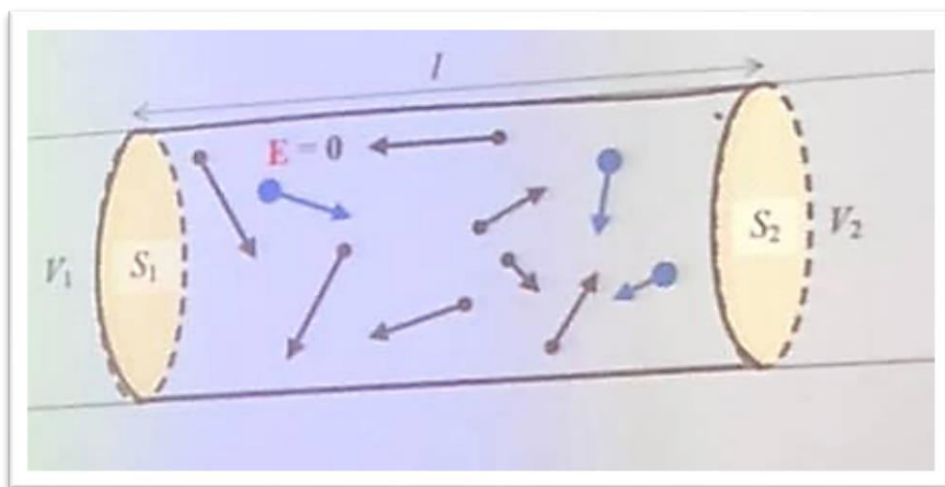
U praksi postoji i mješovito vezivanje kondenzatora koje predstavlja kombinaciju serijskog i paralelnog vezivanja kondenzatora.



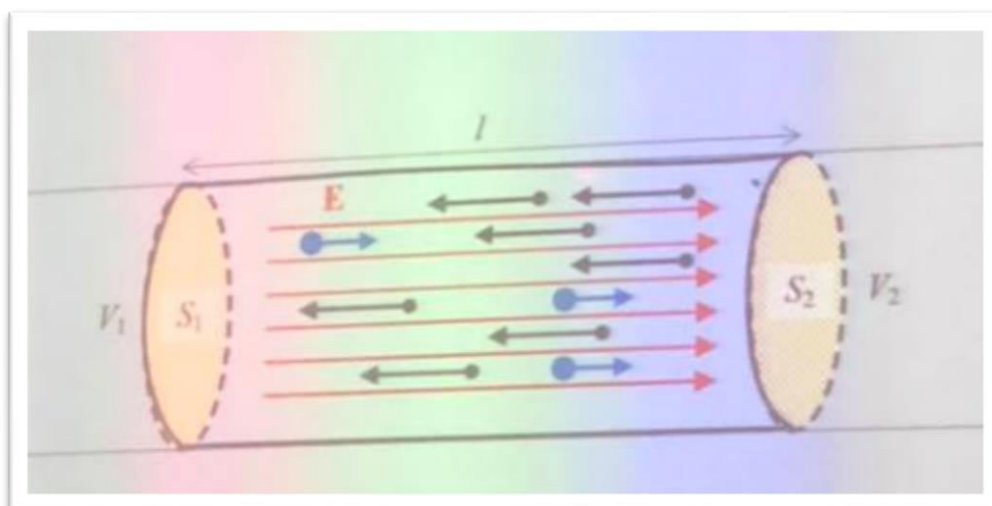
**Slika 7:** Grafički prikaz šeme serijske veze kondenzatora

### 1. POJAM ELEKTRIČNE STRUJE

#### 1.1 Definicija i priroda nastanka



**Slika 8:** Vodljiva sredina u odsustvu električnog polja



**Slika 9:** Vodljiva sredina u odsustvu električnog polja

Pod pojmom električna struja podrazumijevamo svako usmjereno gibanje slobodnih električki nabijenih čestica (elektrona i iona) u materijalnoj sredini.

S obzirom na prirodu nastanka, razlikuje se:

- *kondukcijsku struju ili struju vodljivosti* - izazvana djelovanjem električnog polja
- *struja dielektričnog pomjeranja* - izazvana djelovanjem polja nastalog polarizacijom dielektrika,
- *konvekcijska struja* - izazvana mehaničkim silama

Ovisno o vrsti slobodnih nabijenih čestica koje svojim usmjerenim gibanjem tvore električnu struju, razlikuju se:

- *elektronska struja* - izazvana usmjerenim gibanjem slobodnih elektrona. Pojava ovakvih struja najčešće se manifestuje u metalnim vodičima

- *jonska struja* - izazvana usmjerenim gibanjem slobodnih pozitivnih i negativnih slobodnih iona. Pojava ovakvih struja najčešće se manifestira u ioniziranim vodljivim plinovima.

### 1.2 Jačina (jakost) električne struje

Za kvantitativno opisivanje električne struje uobičajeno se koristi naziv jačina električne energije. Označava se sa (**I**). Jačina električne energije je u praksi skalarna veličina. Jedinica mjere za jačinu električne struje je amper (**A**).

Jačina električne struje (**I**) koja prolazi kroz neku površinu (**S**) jednaka je omjeru Električnog naboja (**Q**) koji protekne kroz tu površinu tokom intervala vremena (**t**). Možemo je izraziti po formuli:

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

**I** – jačina električne struje  
**Q** – električni naboj  
**t** - interval vremena

### 1.3 Gustoća električne struje

Jačinu struje možemo posmatrati kao fluks nekog vektora i tada kažemo da električna struja predstavlja tok (fluks) vektora gustoće struje (**J**) kroz promatranu površinu. Jedinica mjere intenziteta vektora gustoće struje (**J**) je amper po kvadratnom metru (**A/m<sup>2</sup>**).

Kada je vektor gustoće struje konstantan onda se jačina električne struje određuje na osnovu izraza:

$$I = \mathbf{J} \cdot \mathbf{S} = J S \cos \angle (\mathbf{J}, \mathbf{n}_0)$$

**I** – jačina električne struje  
**J** – vektor gustoće struje  
**S** – površina

Kada je površina **S**, normalna na pravac vektora gustoće struje tada vrijedi relacija:

$$I = J S$$

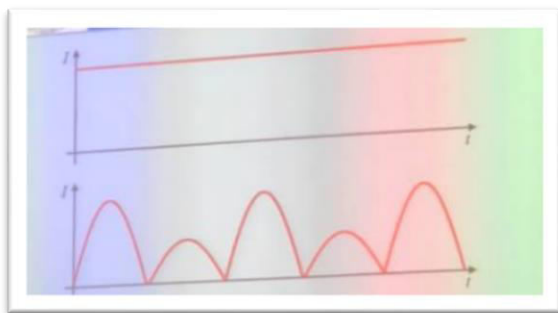
**I** – jačina električne struje  
**J** – vektor gustoće struje  
**S** – površina

Ova formula se može koristiti u slučajevima tankih linijskih vodiča i to kada kroz njih teče stalna istosmjerna električna struja.

### 1.4 Stalna i promjenjiva istosmjerna struja

Električna struja koja u svakom trenutku ima isti smjer naziva se istosmjerna struja. Može se podijeliti na:

- *stalna istosmjerna struja* – istosmjerna struja čiji se intenzitet ne mijenja u vremenu (primjer ove struje je struja koja se dobiva iz raznih baterija i akumulatora).
- *promjenjiva istosmjerna struja* - istosmjerna struja čiji se intenzitet mijenja u vremenu (primjer ove struje je struja koja se dobiva iz raznih ispravljača, punjača za mobitele, laptope i slično).



**Slika 10:** Stalna i promjenljiva istosmjerna struja

## 2. OHMOV ZAKON

### 2.1 Električni otpor, otpornost i otpornik

Elektrostatski naboji mogu biti:

- slobodni – oni koji nisu vezani za atome
- vezani – vezani za atome

Slobodni naboji u vodiču sudaraju se sa atomima kristalne rešetke i predaju im dio svoje kinetičke energije. Ta energija troši se na zagrijavanje vodiča. Električni otpor predstavlja sposobnost vodiča da se suprotstavlja protjecanju električne struje kroz sebe, odnosno sposobnost pretvaranja primljene električne energije u toplinsku.

Fizička veličina koja kvantitativno karakterizira električni otpor naziva se električna otpornost (**R**). Jedinica mjere za električnu otpornost naziva se om (**Ω**). Uređaj koji je namjenski konstruisan da pretvara električnu energiju u toplinsku naziva se *električni otpornik*.

### 2.2 Otpornost vodiča i temperaturna ovisnost

Otpornost tankog homogenog linijskog vodiča, cilindričnog poprečnog presjeka (**S**), dovoljno velike dužine (**l**) (znatno veće od dužine presjeka) računa se po formuli:

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

$\rho$  – specifična električna otpornost  
 $l$  – dužina  
 $S$  – cilindrični poprečni presjek  
 $R$  – električna otpornost

Specifična električna otpornost i električna otpornost vodiča mijenja se u zavisnosti od temperature okoline, u skladu sa zakonitošću izraženim izrazima:

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_0 (1 + \alpha (T - T_0)) = \rho_0 (1 + \alpha (\vartheta - \vartheta_0)) \\ R &= R_0 (1 + \alpha (T - T_0)) = R_0 (1 + \alpha (\vartheta - \vartheta_0)) \end{aligned}$$

**R** – električna otpornost

**ϑ** - temperatura

**ρ** – specifična električna otpornost

**ρ<sub>0</sub>** – specifična električna otpornost na apsolutnoj temperaturi

**T** – temperatura

**α** – temperaturni koeficijent otpornosti je reda  $10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

**T<sub>0</sub>** - 300 K (**ϑ<sub>0</sub>** - 200C)

**ϑ<sub>0</sub>** - 200C

### 2.3 Formulacija i značenje Ohmovog zakona

Ovim zakonom definiše se veza između napona, struje i otpornosti, između bilo koje dvije tačke u električnom krugu. Ohmov zakon glasi: *jačina električne struje koja protječe u dijelu električnog kruga proporcionalna je naponu između njegovih krajeva, a obrnuto proporcionalna električnoj otpornosti toga dijela kruga.*

Izražava se relacijom:

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

**I** – jačina električne struje

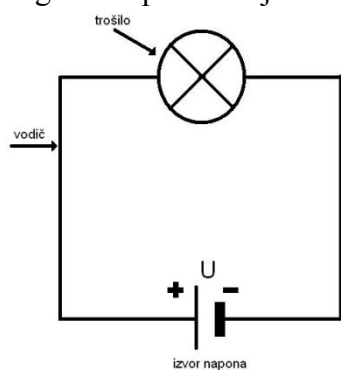
**U** – električni napon

**R** – električna otpornost

Ova relacija vrijedi u krugovima stalne istosmjerne struje.

### 3. ELEMENTI ELEKTRIČNOG KRUGA

Električni krug predstavlja skup izvora i prijemnika koji su pomoću vodiča povezani u zatvorenu strujnu petlju u kojoj se uspostavlja električna struja, odnosno u kojoj je ostvarena mogućnost pretvaranja električne energije izvora u druge oblike energije u prijemnicima.



Slika 11: Šematski prikaz električnog kruga

#### 4.1 Uslovi proticanja električne struje

Da bi se uspostavila (potekla) električna struja potrebno je da istovremeno budu zadovoljeni svi navedeni uslovi:

- postojanje slobodnih naboja (nositelja elektriciteta), odnosno postojanje vodljive sredine,
- postojanje izvora električne energije, koji je u stanju da u kontinuitetu stvara i održava stalnu potencijalnu razliku na svojim polovima
- postojanje prijemnika električne energije koji je u stanju da u kontinuitetu vrši pretvaranje električne energije iz izvora u neki drugi oblik energije ili vrši rad na račun te energije.
- postojanje zatvorene strujne petlje, to jest električnog kruga.

#### 4.2 Izvori, prijemnici i vodiči

Izvori električne energije su uređaji koji hemijsku, mehaničku, hidrauličku, termičku ili neku drugu formu energije transformišu u električnu. U izvore električne energije spadaju: generatori, akumulatori, baterije, galvanski elementi i slično.

Prijemnici električne energije nazivaju se još i trošila. To su uređaji koji električnu energiju transformišu u toplotnu, svjetlosnu, mehaničku ili neku drugu formu energije.

Vodiči su elementi koji povezuju izvore i prijemnike električnog kruga u zatvorenu petlju i izrađuju se od dobrih vodljivih materijala poput bakra, aluminijuma i dugih.



### 4.3 Topologije električnih krugova

S obzirom na topologiju električni krug može biti:

- *električni krug proste konfiguracije* – sastoji se iz jednog izvora i jednog trošila.
- *električni krug složene konfiguracije* – sastoji se od više izvora i više trošila koji mogu biti povezani na različite načine. Možemo reći da se krug složene konfiguracije sastoji od više povezanih krugova proste konfiguracije.

### 4.4 Pojmovi značajni za električni krug

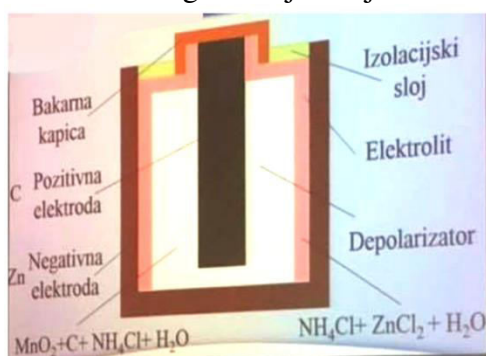
Postoji nekoliko pojmova značajnih za električni krug koje je potrebno definisati. To su:

- *grana* - predstavlja prosti dio električnog kruga u kome su elementi vezani jedan za drugim (na kraj prvog vezan je početak drugog, na kraj drugog početak trećeg i tako dalje) i kroz čije elemente protječe ista električna struja.
- *čvor* - predstavlja mjesto u krugu u kome se (susreću) sijeku tri ili više grana.
- *kontura* - predstavlja zatvorenu električnu petlju u kojoj se uspostavlja električna struja i koja buhvata dvije ili više grana.

## 4. IZVORI ELEKTRIČNE ENERGIJE

### 4.1 Galvanski elementi

Galvanski elementi predstavljaju sisteme u kojima se hemijska energija pretvara u električnu i kao rezultat toga nastaje struja.



Slika 12: Leclancheov cilindrični suhi Galvanski elementi

Galvanske elemente možemo podijeliti na:

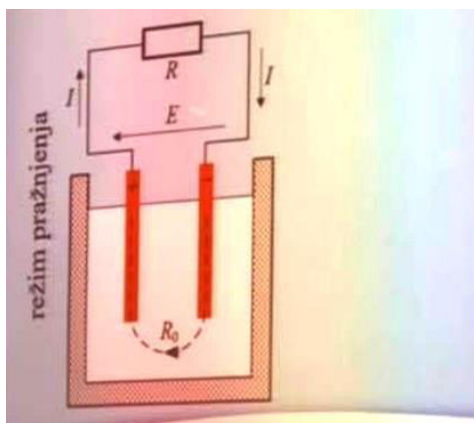
- *primarne* - galvanski elementi koji nisu obnovljivi. Nazivaju se još i jednokratni. Primjer ovih galvanskih elemenata su jednokratne baterije.
- *sekundarne* – galvanski elementi koji se mogu obnavljati i dopuniti. Primjer ovih galvanskih elemenata su akumulatori i baterije za mobitel.

Pored ove podjele postoji još jedna podjela galvanskih elemenata. Oni se mogu podijeliti na:

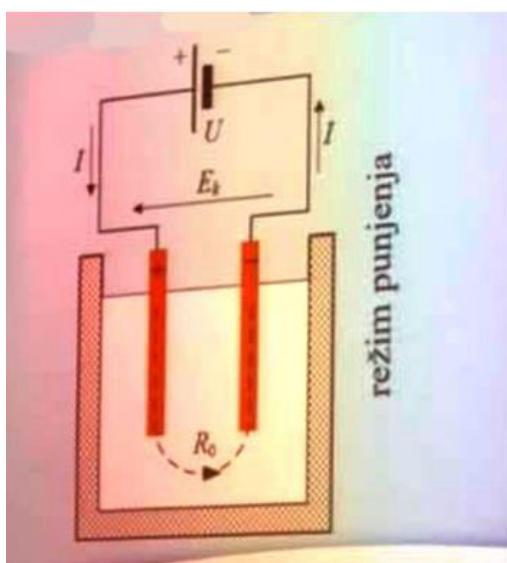
- *suhe* – galvanski elementi koji se mogu okretati
- *mokre* – galvanski elementi koji moraju stajati vodoravno

### 4.2 Akumulatori

Akumulator predstavlja sekundarni izvor električne energije kod kojeg je elektrohemijsko djelovanje reverzibilno, to jest odvaja se u oba smjera.



Slika 13: Šema akumulatora u režimu pražnjenja



Slika 14: Šema akumulatora u režimu punjenja

Akumulatori se tradicionalno dijele na:

- olovne akumulateure,
- alkalne akumulateure,
- čelične akumulateure.

U novije vrijeme sve se masovnije koriste suhi akumulatori.

## 5. PRIJEMNICI ELEKTRIČNE ENERGIJE

Prijemnici električne energije definišu se kao elementi električnog kruga koji primaju električnu energiju iz izvora i pretvaraju je u neki drugi vid energije. Nazivaju se još i električnim trošilima.

### 5.1 Podjela prijemnika

Prijemnike električne energije (trošila) možemo podijeliti u tri grupe:

- *rezistivne ili omske* – koji električnu energiju iz izvora nepovratno i trajno pretvaraju u toplinsku. Predstavljaju elemente čija je osnovna električna karakteristika njihov električni otpor. Zbog toga se ova trošila nazivaju *električnim otpornicima*. Njihova kvantitativna mjera je otpornost (**R**). Jedinica mjere električne otpornosti je om (**Ω**).

- *kapacitivne* - koji električnu energiju iz izvora pretvaraju u energiju elektrostatskog polja. Predstavljaju elemente čija je osnovna električna karakteristika njihov električni kapacitet. Zbog toga se ova trošila nazivaju *električnim kondenzatorima*. Njihova kvantitativna mjera je kapacitivnost (**C**). Jedinica mjere električne kapacitivnosti je farad (**F**).
- *induktivne* - koji električnu energiju iz izvora pretvaraju u energiju elektromagnetskog polja. Predstavljaju elemente čija je osnovna električna karakteristika njihov električni induktivitet. Zbog toga se ova trošila nazivaju *električnim svitcima*. Njihova kvantitativna mjera je induktivnost (**L**). Jedinica mjere električne induktivnosti je henri (**H**).

## 5.2 Pružanje otpora istosmjernoj struji

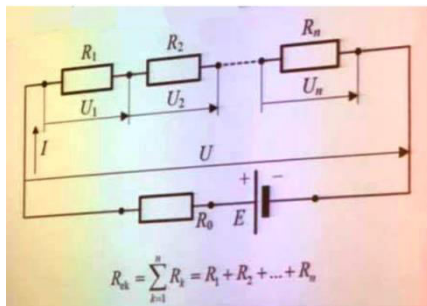
Električni prijemnici se u krugovima stalne istosmjerne struje, u smislu pružanja otpora struji, ponašaju različito pa tako imamo:

- *električni otpornik* - se ponaša kao trošilo koje električnu energiju izvora trajno i bespovratno pretvara u toplinsku. Njegova otpornost je konačna i veća je od nule.
- *električni kondenzator* - se ponaša kao prekid strujnog kruga. Njegova otpornost je beskonačno velika.
- *električni svitak* - se ponaša kao kratki spoj strujnog kruga. Njegova otpornost jednaka je nuli.

## 6. POVEZIVANJE OTPORNIKA

### 6.1 Serijska veza

Za niz električnih otpornika kažemo da su vezani serijski ako je završetak prvog vezan za početak drugog, završetak drugog vezan za početak trećeg i tako sve redom dok ne dođemo do posljednjeg gdje je završetak predzadnjeg vezan za početak zadnjeg. Početak prvog otpornika vezan je za jedan pol, a završetak zadnjeg otpornika za drugi pol izvora električne energije.



**Slika 15:** Primjer šeme serijske veze

Kroz sve otpornike protiče jednaka struja (**I**). Ukupan napon jednak je zbiru napona nad pojedinačnim otpornicima. Ovu vezu predstavljamo sljedećom relacijom:

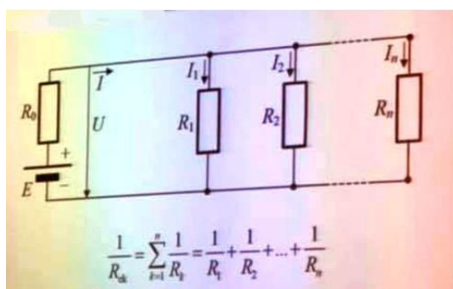
$$R_{eq} = \sum_{k=1}^n R_k = R_1 + R_2 + \dots + R_n$$

### 6.2 Paralelna veza

Za niz električnih otpornika kažemo da su vezani paralelno ako su svi njihovi počeci vezani u jednu, a završetci (krajevi) u drugu tačku. Zajednički početak svih otpornika vezan je za jedan, a zajednički završetak za drugi pol izvora električne energije.

Kroz sve otpornike jednak je napon (**U**). Ukupna struja (**I**) jednak je zbiru svih struja po pojedinačnim otpornicima. Ovu vezu predstavljamo sljedećom relacijom:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

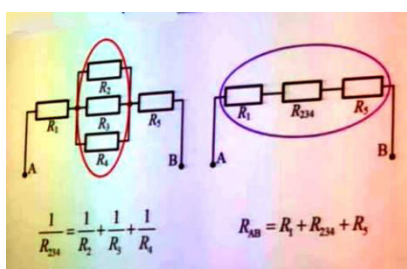


Slika 16: Primjer šeme paralelne veze

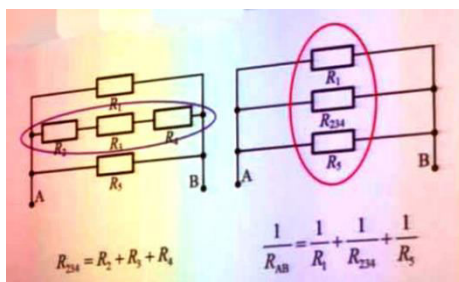
### 6.3 Mješovita veza

U redovnoj praksi veoma se često srećemo sa vezama otpornika koje nisu ni serijske ni paralelne. Takve veze nazivaju se *mješovite veze*.

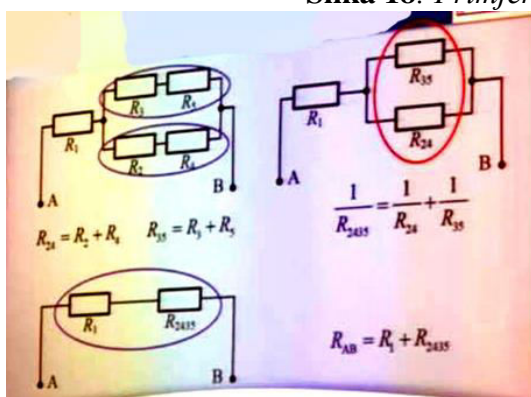
Ekvivalentnu otpornost u slučaju mješovite veze računamo tako da se rješavamo pojedinačnih veza sve dok ne dobijemo samo serijsku ili samo paralelnu vezu.



Slika 17: Primjer šeme mješovite veze



Slika 18: Primjer šeme mješovite veze



Slika 19: Primjer šeme mješovite veze

## 7. JOLUEOV ZAKON

U dovoljno izolovanoj posudi mjerena je temperatura u odnosu na razine jačine struje. Električni vodiči su se zagrijavali tokom prolaska električne struje kroz njih. Tu pojavu prvi je objasnio i dokazao James Joule.

Joulov zakon kaže da *količina toplinske energije koja u dijelu električnog kruga otpora (R), kroz koji prolazi stalna istosmjerna struja jačine (I), proporcionalna je proizvodu tog otpora i kvadrata jačine stalne istosmjerne struje u tom dijelu kruga*

Izražava se relacijom:

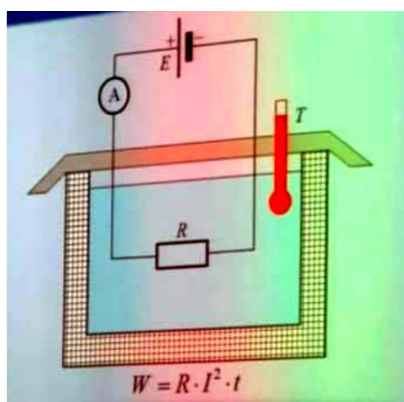
$$W = R I^2 t$$

**I** – jačina električne struje

**t** – vrijeme trajanja procesa

**R** – električna otpornost

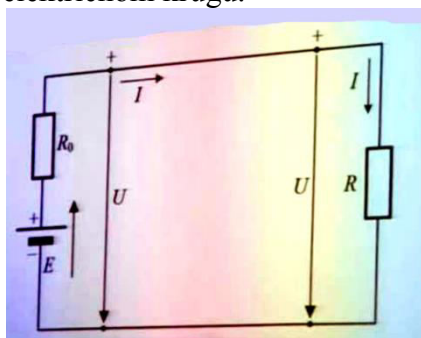
**W** – količina toplinske energije



Slika: Šema Joulov pokusa

## 8. KIRCHHOFFOVI ZAKONI

Predstavljaju temeljne zakone elektrotehnike kojima se uspostavljaju odnosi između struja u granama i napona, odnosno padova napona u konturama i elementima kruga u složenom električnom krugu.



Slika: Šematski prikaz Kirchhoffovih zakona

### 9.1 Prvi Kirchhoffov zakon

Prvi Kirchhoffov zakon daje relaciju između struja u granama električnog kruga i čvorova koji te grane povezuju. Prvi Kirchhoffov zakon kaže da *algebarski zbir struja u granama koje se stječu u neki čvor jednak je nuli*. Treba obavezno istaći kako formulacija prvog Kirchhoffovog zakona vrijedi samo u krugu stalne istosmjerne struje.

Možemo ga izraziti relacijom:

$$\sum I_k = 0$$

Ukoliko se proizvoljno pretpostave smjerovi struja tako da se strujama koje "dolaze u čvor" odnosno koje su "usmjerene ka čvoru" pripisuje negativan predznak, strujama koje "odlaze iz čvora" odnosno koje su "usmjerene od čvora" pripisuje pozitivan predznak, tada će formulacija prvog Kirchhoffovog zakona glasiti da je *zbir struja koje dolaze u neki čvor u električnom krugu jednaka zbiru struja koje odlaze iz tog istog čvora*. Ove dvije formulacije prvog Kirchhoffovog zakona su ekvivalentne.

## 9.2 Drugi Kirchhoffov zakon

Drugi Kirchhoffov zakon daje relaciju između padova napona na elementima zatvorene konture električnog kruga i elektromotornih sila koje tu djeluju. Drugi Kirchhoffov zakon kaže da je algebarski zbir padova napona na elementima neke zatvorene konture električnog kruga jednak algebarskom zbiru elektromotornih sila koje tu djeluju. Treba obavezno istaći kako formulacija drugog Kirchhoffovog zakona vrijedi samo u krugu stalne istosmjerne struje. Elementi zatvorene konture u slučaju krugova stalnih istosmjernih struja su trošila (otpornici) kao i unutarnje otpornosti izvora elektromotornih sila (baterije).

Možemo ga izraziti relacijom:

$$\sum R_n I_n = \sum E_n$$

## 9. SNAGA U KRUGU ISTOIMENE STRUJE

### 9.1 Pojam električne snage

Pojam električne snage možemo definisati kao rad izvršen u jedinici vremena. Oznaka za snagu je (**P**). Jedinичna mjera snage je vat (**W**).

Ovakvu definiciju snage možemo izložiti sljedećom formulom:

$$P = U I$$

**I** – jačina električne struje  
**U** – električni napon  
**P** – snaga

Snagu možemo izraziti i na drugi način. Ako između krajeva otpornika otpornosti (**R**), vlada električni napon (**U**), a pri tom protječe stalna istosmjerna struja jačine (**I**), tada se prema Jouelovom zakonu utrošila (oslobodila) određena energija, to jest izvršio se određeni rad. U tom slučaju možemo reći da se u tom dijelu kruga razvila snaga (**P**) koju možemo izraziti relacijom:

$$P = R I^2$$

**I** – jačina električne struje  
**R** – električni otpor  
**P** – snaga

Snaga je pozitivna veličina.

### 9.2 Algebarski predznak snage

U složenom električnom krugu ukupna snaga jednaka je algebarskom zbiru snaga nad pojedinim elementima. Algebarski predznak snage određuje se po određenim pravilima. Ova pravila nisu stvar dogovora i treba ih se strogo pridržavati. Znači:

- ako u grani postoje samo otpornici, snaga u toj grani uvijek se uzima kao pozitivna.
- ako u grani postoji elektromotorna sila koja daje energiju ostatku kruga (ponaša se kao izvor) snaga u toj grani se uzima kao pozitivna,
- ako u grani postoji elektromotorna sila koja troši energiju iz ostatka kruga (ponaša se kao trošilo) snaga u toj grani se uzima kao negativna.

## SKRIPTA 2

### OSNOVE ELEKTROTEHNIKE I ELEKTRONIKE

## SADŽRAJ

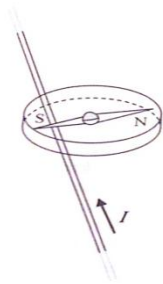
Magnetizam .....	2
Magnetsko polje .....	3
Sila na električni naboj u gibanju .....	3
Moment magnetnog dipola .....	3
Biot-Savartov zakon .....	4
Amperov zakon .....	4
Specijalni slučajevi magnetskog polja .....	4
Pojam fluksa i Gausov zakon .....	5
Podjela magnetskih materijala .....	5
Osnovni magnetski krugovi .....	6
Elektromagnetna indukcija .....	6
Faradayev zakon EMI .....	7
Samoindukcija i uzajamna indukcija .....	7
Jednofazne ismjenične struje .....	8
Osnovni kvantitativni parametri .....	9
Period, frekvencija .....	9
Trenutna, efektivna i srednja vrijednost .....	9
Sinusoidne izmjenične struje .....	10
Fazna razlika izmjeničnih veličina .....	10
Srednja i efektivna vrijednost .....	11
Parametri izmjeničnih krugova .....	11
Aktivni otpornik .....	11
Kondenzator .....	11
Svitak .....	12
Prosti krugovi izmjenične struje .....	12
Serijska RLC veza .....	12
Paralelna RLC veza .....	13
Kompleksni prikaz veličina .....	14
Simbolički pristup analizi krugova .....	14



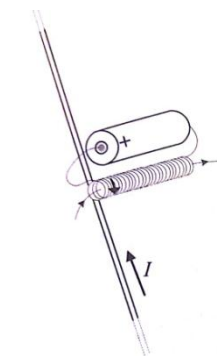
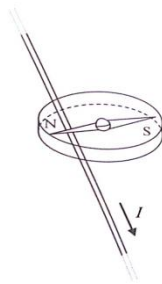
Kompleksna impedancija .....	14
Priroda kompleksne impedancije .....	14
Kompleksna admitancija .....	15
Priroda kompleksne admitancije .....	15
Kompleksni napon i struja .....	15
Ohmov zakon .....	16
Kirchhoffovi zakoni .....	16
Povezivanje impedancija .....	16
Snaga u kompleksnom obliku .....	16

## Magnetizam

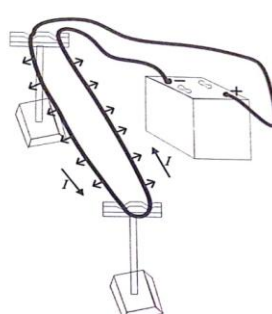
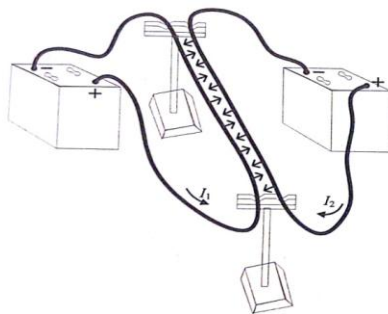
Erstedovi pokusi su bili sa magnetnom iglom i vodljivom žicom pri čemu je došao do zaključka da se magnetno polje stvara ukoliko su vodič i magnetna igla paralelni, i da položaj igle zavisi od smjera struje kroz vodič.



Slika 3.1: Prikaz Ørstedova pokusa s magnetskom iglom



Slika 3.2: Prikaz Ørstedova pokusa s lako pokretnim svitkom



Slika 3.3: Prikaz sila magnetskog polja između dva tanka linijska vodiča

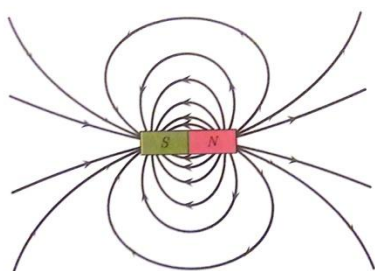


## Magnetsko polje

Fizičko stanje materijalne sredine u okolini stalnih magneta ili vodiča kroz koje protječe električna struja koje se manifestira kao djelovanje mehaničkom silom na drugi stalni magnet ili drugi vodič kroz koji protječe električna struja naziva se **magnetsko polje**.

**Kvantitativna mjera** magnetskog polja je **vektor magnetske indukcije B**. Jedinica mjere intenziteta vektora magnetske indukcije je **TESLA [T]**.

**Linije vektora B** su neprekidne i usmjerene linije, zatvorene same u sebe bez izvora i ponora, a gustoća je proporcionalna intenzitetu vektora magnetne indukcije u pojedinim dijelovima analiziranog prostora. Orijentacija linija polja je od sjevernog ka južnom magnetskom polu. Nemoguće je razdvojiti južni i sjeverni pol, a razlog tome je duboko u subatomskej strukturi.



Slika 3.4: Prikaz linija magnetskog polja stalnog magneta

**Homogeno magnetsko polje** je polje kod koga je vektor magnetske indukcije konstantan, tj linije polja su paralelne i jednako guste. Polje čiji je intenzitet vektora magnetske indukcije konstantan ( $B = \text{const}$ ) u općem slučaju ne predstavlja homogeno magnetsko polje.

Magnetsko polje izaziva protjecanje električne struje, a protjecanje električne struje zahtijeva zatvorenu petlju između izvora, vodiča i trošila. Zato linije magnetskog polja moraju biti neprekidne.

## Sila na električni naboj u gibanju

- Sila na naboj  $q$  koji se u električnom polju jakosti  $E$  i magnetskom polju indukcije  $B$  giba srednjom brzinom  $v$  (**Lorentzov izraz za silu**)  $F_q = q \cdot E + q(v \times B)$
- Sila na ravni vodič dužine  $l$  i poprečnog presjeka  $S$  kroz koga protječe stalna istosmjerna struja  $I$  u homogenom polju indukcije  $B$  (**Laplaceov izraz za silu**)  $F = I \cdot (l \times B)$
- Sila između dva paralelna linijska vodiča jednakih dužina  $l$ , na udaljenosti  $r$  u vakuumu kroz koji protječu stalne istosmjerne struje  $I_1$  i  $I_2$  (**Amperov izraz za silu**)

$$F_{12} = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi r} \quad \mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ H/m} \text{ magnetska permeabilnost vakuuma}$$

## Moment magnetnog dipola

$$m = I S n_0$$

Ukupni moment  $M = \mathbf{r} \times \mathbf{F} = I \mathbf{r} \times \mathbf{l} \times \mathbf{B}$   $M = \mathbf{m} \times \mathbf{B}$  (ako su vektor napadne tačke sile i jedinični vektor osi vodiča normalni)

### Biot-Savartov zakon

Ovaj zakon kaže da u slučaju veoma dugih žičanih vodiča, postavljenih u zraku, intenzitet uspostavljenog magnetnog polja je obrnuto proporcionalan udaljenosti računane od mjesta u kojem se polje mjeri.

$$\mathbf{B} = \mu_0 \frac{I \Delta \mathbf{l} \times \mathbf{r}_0}{4\pi r^2}$$

### Amperov zakon

Cirkulacija vektora magnetske indukcije  $\mathbf{B}$  po zatvorenoj konturi  $C$  u vakuumu jednaka je algebarskom zbiru svih struja koje prolaze vodičima obuhvaćenim konturom  $C$  pomnoženom sa  $\mu_0$ .

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \iint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{S} = \mu_0 \sum I$$

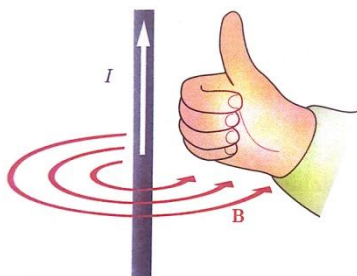
### Specijalni slučajevi magnetskog polja

1. Tanki pravocrtni vodič beskonačne dužine kroz koga protječe stalna istosmjerna struja

I. Intenzitet magnetne indukcije na razdaljini  $x$  od vodiča  $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi x}$

Linije polja određuju se pravilom desne ruke.

Pravac i smjer vektora  $\mathbf{B}$  je tangenta na linije polja.



Slika 3.6: Pravilo desne ruke

2. Kontura u obliku istostraničnog trokuta dužine stranice  $a$ , kroz koju protječe stalna istosmjerna struja  $I$ .

Intenzitet magnetske indukcije u težištu tog trokuta je:  $B = \frac{9\mu_0 I}{2\pi a}$

3. Kontura u obliku kvadrata dužine stranice  $b$  kroz koju protječe stalna istosmjerna struja

I. Intenzitet magnetne indukcije u sjecištu dijagonala je:  $B = \frac{2\sqrt{2}\mu_0 I}{\pi b}$

4. Kružna kontura poluprečnika dužine  $r$  kroz koju protječe stalna istosmjerna struja  $I$

Intenzitet magnetne indukcije u tački na aksijalnoj osi na udaljenosti  $z$  od središta konture je:  $B = \frac{\mu_0 I r^2}{2\sqrt{(r^2 + z^2)^3}}$  Intenzitet magnetne indukcije u središtu konture je  $B = \frac{\mu_0 I}{2r}$

## Pojam fluksa i Gausov zakon

**Magnetski tok**(fluks) je broj linija vektora magnetske indukcije koje prodiru kroz neku površinu  $S$ . U slučaju homogenog magnetskog polja magnetski fluks računa se po formuli:  $\Phi = B \cdot S$

Jedinica mjere magnetskog fluksa je veber [Wb].

**GAUSOV ZAKON:** Fluks vektora magnetske indukcije kroz bilo koju zatvorenu površinu jednak je nuli  $\oint B \cdot dS = 0$

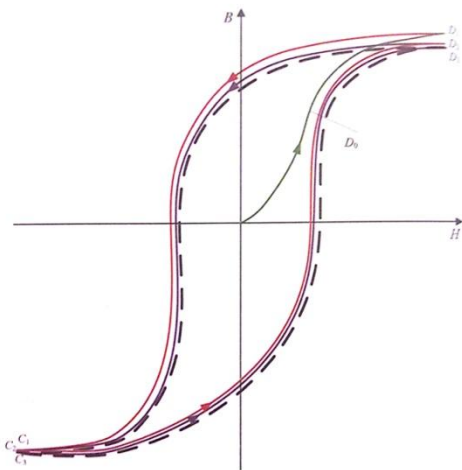
## Podjela magnetskih materijala

- Dijamagnetski materijali ( $H_2O$ , Cu, Pb, C...), kada se izlože djelovanju stranog magnetskog polja stvaraju vlastito magnetsko polje koje slabi strano polje ( $\mu_r < 1$ )
- Paramagnetski materijali (Na, Al, CuS...), kada se izlože djelovanju stranog magnetskog polja stvaraju vlastito magnetsko polje koje jača strano polje ( $\mu_r > 1$ )
- Feromagnetski materijali (Fe, Ni, Co,...), kada se izlože djelovanju stranog magnetskog polja stvaraju vlastito magnetsko polje koje pojačava strano polje ali znatno izražajnije nego paramagnetski materijali ( $\mu_r \gg 1$ )

## Feromagnetski materijali

Feromagnetski materijali pokazuju svojstvo “memorije” u smislu da magnetska propustljivost zavisi ne samo od intenziteta vektora jakosti magnetskog polja nego i od ranijeg magnetskog stanja analiziranog materijala.

Intenzitet vektora magnetske indukcije  $B$  poprima različite vrijednosti pri istim iznosima intenziteta vektora jakosti magnetskog polja  $H$  ukoliko je način uspostave magnetskog polja ili pak prethodno stanje analiziranog materijala različit- histereza.



Slika 3.8: Uz objašnjenje histereze

Objašnjenje slike strana 90 i 91

## Osnovni magnetski krugovi

Magnetski krug je skup materijalnih tijela ili sredina kroz koje se usmjerava zatvara magnetski tok.

Tri osnovne veličine koje opisuju stanja tog kruga:

- Magnetski tok (fluks)  $\Phi$  [Wb]
- Magnetomotorna sila  $F_M$  [A]
- Magnetska otpornost (reluktancija)  $R_M$  [1/H]

Ove tri veličine povezuje Ohmov zakon za magnetski krug. Vrijedi formalna analogija između veličina magnetskog i električnog kruga  $\Phi \longleftrightarrow I$ ,  $F_M \longleftrightarrow E$  i  $R_M \longleftrightarrow R$ .

$$\Phi = \frac{NI}{\frac{l}{\mu S}} = \frac{NI}{R_M} = \frac{F_M}{R_M} \quad F_M = R_M * \Phi \quad R_M = \frac{F_M}{\Phi}$$

Prvi Kirchhoffov zakon za magnetski krug: algebarska suma magnetskih flukseva koji se stječu u neki čvor jednaka je nuli  $\sum \Phi_K = 0$ , ili = Zbir magnetskih flukseva koji dolaze u čvor magnetskog kruga jednak je zbiru magnetskih flukseva koji odlaze iz tog istog čvora.

Drugi Kirchhoffov zakon za magnetski krug: algebarska suma padova magnetnog napona u nekoj konturi jednaka je algebarskoj sumi magnetomotornih sila koje djeluju u toj istoj konturi:  $\sum_i R_M * \Phi = \sum_j F$

## Elektromagnetna indukcija

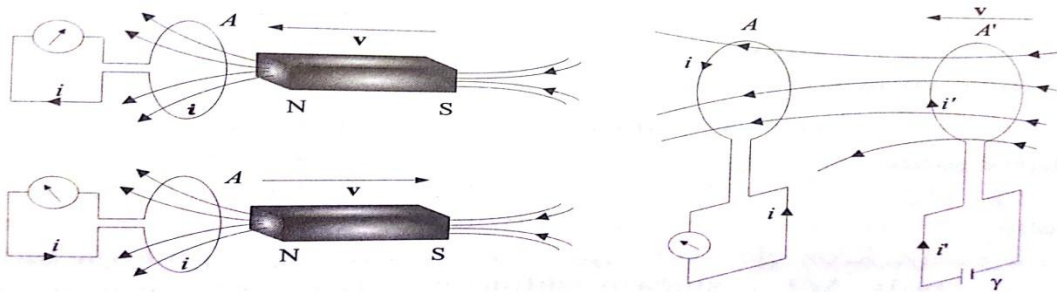
Vodič sa stalnom istosmjernom strujom stvara oko sebe stalno magnetsko polje.

Vodič sa promjenjivom strujom stvara oko sebe promjenjivo magnetsko polje, pri čemu promjene polja "prate" promjene struje.

Može li stalno magnetsko polje u kome se nađe vodič izazvati protjecanje stalne istosmjerne struje u vodiču? Može li promjenjivo magnetsko polje u kome se nađe vodič izazvati protjecanje stalne promjenjive struje u vodiču?

Dinamična i statična elektromagnetska indukcija

Tok električnog naboja kroz konturu ima jedan smjer kada se povećava intenzitet magnetskog toka kroz nju, a drugi smjer kada se smanjuje intenzitet magnetskog toka kroz tu istu konturu. (Uglavnom, bitno je da se magnet ili kontura pomjera, te se tek tad očituje struja).



Slika 3.10: Uz objašnjenje dinamičke elektromagnetske indukcije

### Faradayev zakon EMI

Elektromotorna sila koja se inducira u zatvorenoj konturi obuhvaćenoj magnetskim tokom proporcionalna je negativnoj vrijednosti brzine promjene tog toka:

$$\Delta Q = I \cdot \Delta t = -\frac{\Delta \Phi}{R} \quad E = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

Negativni predznak znači da inducirana elektromotorna sila pokušava uspostaviti struju koja će svojim vlastitim magnetskim tokom djelovati tako da nastoji spriječiti mijenjanje stranog magnetskog toka koji obuhvata upravo tu vodljivu konturu.

### Samoindukcija i uzajamna indukcija

Električni induktivitet je sposobnost vodiča da kad kroz njega protječe električna struja  $I$  u prostoru oko sebe stvara magnetski tok  $\Phi$ .

Kvantitativna mjera električnog induktiviteta je fizička veličina koju nazivamo električna(samo)induktivnost  $L$ .

Jedinica mjere električne induktivnosti je henri [H].

Između magnetskog toka, struje koja je stvorila taj tok i električne induktivnosti postoji veza

$$\Phi = L \cdot I$$

Element namjenski konstruiran da stvara magnetski tok oko sebe naziva se svitak(zavojnica, kalem).

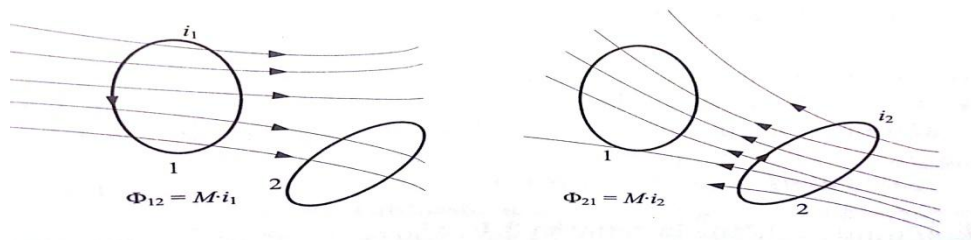
Samoinduktivnost svitka je određena geometrijskim i električnim karakteristikama ako je svitak bez jezgre ili s paramagnetskom ili dijamagnetskom jezgrom.

Kod svitka koji ima feromagnetsku jezgru samoinduktivnost može biti i funkcija intenziteta uspostavljenog magnetskog polja.

Energija magnetnog polja akumulirana u svitku inuktivnosti  $L$  kad kroz njega protječe struja  $I$

$$je : W = \frac{L \cdot I^2}{2}$$

Uzajamna induktivnost  $M = M_{12} = M_{21} = k \cdot \sqrt{L_1 \cdot L_2}$



Slika 3.11: Uz objašnjenje uzajamne indukcije

## Jednofazne ismjenične struje

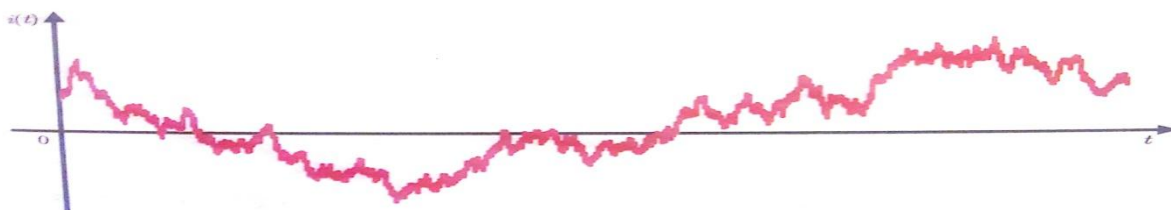
Pod pojmom promjenjiva struja podrazumijevamo onu električnu struju čiji se intenzitet i smjer kretanja mijenja u vremenu.

Slično se definiraju promjenjivi napon i snaga.

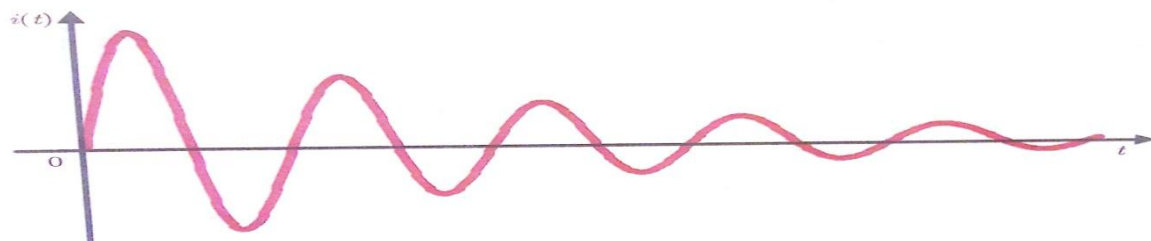
Promjene intenziteta i smjera mogu biti:

- Stohastičke (ne mogu se opisati matematskom funkcijom)
- Determinističke (mogu se opisati matematskom funkcijom)

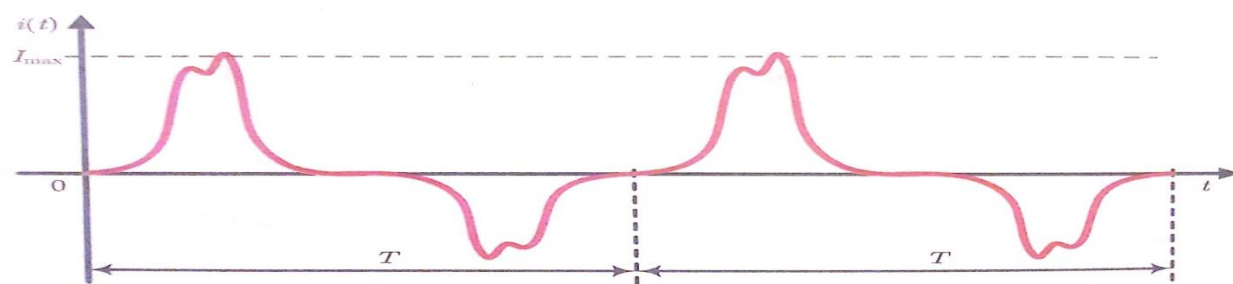
Periodična struja- ako je  $i(t) = i(t + nT)$



Slika 4.1: Stohastička promjenljiva struja



Slika 4.2: Deterministička promjenljiva struja



Slika 4.3: Periodična promjenljiva struja

## Osnovni kvantitativni parametri

### Period, frekvencija

Kod periodičnih promjena, vrijeme perioda  $T$  je vrijeme za koje ta veličina izvrši sve svoje promjene. Kažemo da je promatrana veličina izvršila jedan ciklus.

Omjer broja ciklusa i vremena u kome se oni ostvaruju naziva se obična ili tehnička frekvencija:  $f=N/t$ , gdje je  $N$  broj ciklusa koje promjenjiva veličina ostvari za vrijeme  $t$ , dok je kružna frekvencija  $\omega=2\pi f$

Za  $N=1$  je  $t=T$ , pa je  $f=1/T$

Jedinica mjere za frekvenciju je  $[1/s]$  tj recipročna sekunda, a u slučaju tehničke frekvencije ima poseban naziv- herc  $[Hz]$ .

### Trenutna, efektivna i srednja vrijednost

Intenzitet promjenjive veličine u nekom trenutku vremena naziva se trenutnom vrijednosti te veličine u tom trenutku vremena.

Maksimalna vrijednost promjenjive veličine je najveća vrijednost koju ta veličina doseže u jednom ciklusu.

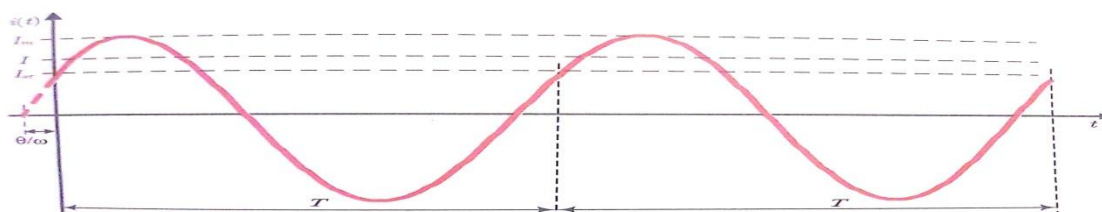
Srednja vrijednost promjenjive veličine je ona vrijednost koja s vremenskom osom ograničava površinu istu kao i njena apsolutna vrijednost na jednom periodu.

Efektivna vrijednost je ona vrijednost stalne istosmjerne struje  $I$ , koja u vremenskom intervalu dužine jednog perioda na otporniku jedinične otpornosti razvije istu količinu toplotne energije kao što to učini stalna istosmjerna struja jakosti jednake upravo toj efektivnoj vrijednosti promjenjive struje  $i(t)$ .

Geometrijski, površina koju kvadrat efektivne vrijednosti struje ograničava s vremenskom osom jednaka je površini koju kvadrat promjenjive struje ograničava s vremenskom osom za vrijeme od jednog perioda.

## Sinusoidne izmjenične struje

Prosta harmonijska ili čista harmonijska ili prostoperiodična ili sinusoidna izmjenična struja je promjenjiva električna struja čiji se intenzitet i smjer mijenja u zavisnosti od vremena po zakonu



Slika 4.6: Prosta harmonijska promjenljiva struja

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \theta_i)$$

- $i(t)$  - trenutna vrijednost struje
- $I_m$  - max vrijednost struje
- $\omega = 2\pi/T$  - kružna frekvencija
- $\omega t + \theta_i$  - faza ili fazni stav
- $\theta_i$  - početna faza

Slični izrazi vrijede i za izmjenični napon, izmjeničnu elektromotornu silu i izmjenični magnetski tok:

$$u(t) = U_m \cos(\omega t + \theta_u)$$

$$e(t) = E_m \cos(\omega t + \theta_e)$$

$$\Phi(t) = \Phi_m \cos(\omega t + \theta_\Phi)$$

Pod pojmom izmjenična struja (napon, EMS, fluks), podrazumijevat ćemo prostu harmonijsku sinusoidalnu električnu struju (napon, EMS, fluks).

## Fazna razlika izmjeničnih veličina

Fazna razlika između bilo koje dvije izmjenične veličine definira se izrazom  $\Delta\theta = (\omega_1 - \omega_2)t + (\theta_1 - \theta_2)$

Ako izmjenične veličine imaju iste frekvencije tada je fazna razlika jednaka razlici početnih faza:  $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$



Ako je  $\Delta\theta=0$  izmjenične veličine su u fazi, ako je  $\Delta\theta\neq 0$  izmjenične veličine su fazno pomjerene :

Ako je  $\Delta\theta>0$  onda prva veličina fazno prednjači u odnosu na drugu, a ako je  $\Delta\theta<0$  onda prva veličina fazno zaostaje odnosno kasni u odnosu na drugu

### Srednja i efektivna vrijednost

Srednja vrijednost izmjeničnih veličina je:  $I_{sr}=\frac{2}{\pi}I_m$      $U_{sr}=\frac{2}{\pi}U_m$      $E_{sr}=\frac{2}{\pi}E_m$

Efektivna vrijednost izmjeničnih veličina je:  $I=\frac{I_m}{\sqrt{2}}$      $U=\frac{U_m}{\sqrt{2}}$      $E=\frac{E_m}{\sqrt{2}}$

Faktor oblika nesinusoidalne promjenjive veličine je:  $\xi=\frac{I}{I_{sr}}=\frac{U}{U_{sr}}$      $\xi_0=\frac{\pi}{2\sqrt{2}}\cong 1,11$

### Parametri izmjeničnih krugova

U krugovima izmjeničnih struja dolazi do pretvaranja električne energije u druge vidove energije prije svega u toplinsku, elektrostatičku i elektromagnetsku.

Osobine prijemnika: aktivna otpornost, kapacitivnost i induktivnost, vrijede s identičnim definicijama i u krugovima izmjenične struje.

Osnovni elementi(parametri) električnih krugova: aktivni otpornik, kondenzator i svitak ponašaju se u krugovima izmjeničnih struja nešto drugačije nego u krugovima stalnih istosmjernih struja.

#### Aktivni otpornik

Aktivni otpornik je idealizirani disipativni parametar.

U aktivnom otporniku se odvija trajni i bespovratni proces pretvaranja električne energije u toplinsku.

Osnovna kvantitativna karakteristika aktivnog otpornika je njegova aktivna električna otpornost R.

Izmjenična struja kroz otpornik i pad izmjeničnog napona na njegovim krajevima su u fazi.

Trenutna snaga je stalno pozitivna, a srednja snaga je proizvod efektivnih vrijednosti napona i struje.

#### Kondenzator

Kondenzator je idealizirani konzervativni parametar.

U kondenzatoru se električna energija izvora pretvara u energiju elektrostatičkog polja i obrnuto, energija elektrostatičkog polja u električnu energiju kruga.

Osnovna kvantitativna karakteristika kondenzatora je njegova kapacitivnost C.

Izmjenična struja kroz kondenzator i pad izmjeničnog napona na njegovim krajevima nisu u fazi.

Struja fazno prednjači naponu za  $\frac{\pi}{2}$ .

## Svitak

Svitak je idealizirani konzervativni parametar.

U svitku se električna energija izvora pretvara u energiju magnetskog polja i obrnuto, energija magnetskog polja u električnu energiju kruga.

Osnovna kvantitativna karakteristika svitka je njegova induktivnost  $L$ .

Izmjenična struja kroz svitak i pad izmjeničnog napona na njegovim krajevima nisu u fazi.

Struja fazno zaostaje za naponom za  $\frac{\pi}{2}$ .

Srednja snaga na svitku unutar jednog perioda jednaka je nuli.

Važna karakteristika svitka u krugu izmjenične struje je induktivna otpornost :  $X_L = \omega L$

Svitak u krugu izmjenične struje ne predstavlja nultu otpornost (kratki spoj strujnog kruga).

## Prosti krugovi izmjenične struje

### Serijska RLC veza

Struja je ista kroz sva tri elementa  $i = I_m \sin \omega t$

Ukupni napon:  $u = RI_m \sin \omega t + (\omega L - 1/\omega C) I_m \cos \omega t$

Napon je općenito  $u = U_m \sin(\omega t + \varphi)$

što znači da je:

$$U^2 = (R^2 + (X_L - X_C)^2) \cdot I^2$$

$$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R} = \arctg \frac{X}{R}$$

Prividna otpornost ili impedancija je:  $Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}$

Srednja snaga predstavlja snagu Jouleovih gubitaka i naziva se aktivna snaga  $P = UI \cos \varphi$  [W]

$\cos \varphi$  naziva se faktor snage

Reaktivna snaga je  $Q = UI \sin \varphi$  [VAR]

$\sin \varphi$  je faktor reaktivnosti

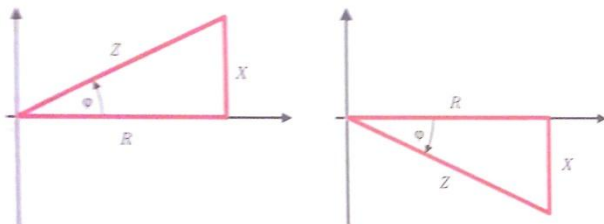
Ukupna snaga naziva se prividna snaga  $S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$  [VA]

Jedinice mjere imaju različite nazive i oznake jer je u praksi važno znati o kojoj vrsti snage se radi.

Faktor snage i faktor reaktivnost mogu se umjesto preko napona, struje i snage izraziti preko odgovarajućih aktivnih i reaktivnih otpornosti:

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z} \quad \sin\varphi = \frac{X}{Z} \quad \operatorname{tg}\varphi = \frac{X}{R}$$

- Za  $X > 0$  je  $\varphi > 0$  a impedencija je pretežno induktivna,
- Za  $X < 0$  je  $\varphi < 0$  a impedencija je pretežno kapacitivna,
- Za  $X = 0$  je  $\varphi = 0$  a impedencija je omska otpornost.



Slika 4.14: Trokut otpornosti

### Paralelna RLC veza

Napon je ista kroz sva tri elementa  $u = U_m \sin \omega t$

Struja :  $i = (1/R)U_m \sin \omega t + ((1/\omega L) - \omega C) U_m \cos \omega t$

Struja je općenito  $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$

što znači da je:

$$I^2 = (G^2 + (B_L - B_C)^2) \cdot U^2$$

$$\varphi = \arctg \frac{B_L - B_C}{G} = \arctg \frac{B}{R}$$

Prividna vodljivost ili admitancija je:  $Y = \frac{1}{Z} = \frac{I}{U} = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + (\frac{1}{\omega L} - \omega C)^2}$

Srednja snaga predstavlja snagu Jouleovih gubitaka i naziva se aktivna snaga  $P = UI \cos \varphi$  [W]

$\cos \varphi$  naziva se faktor snage

Reaktivna snaga je  $Q = UI \sin \varphi$  [VAR]

$\sin \varphi$  je faktor reaktivnosti

Ukupna snaga naziva se prividna snaga  $S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$  [VA]

Jedinice mjere imaju različite nazive i oznake jer je u praksi važno znati o kojoj vrsti snage se radi.

Faktor snage i faktor reaktivnost mogu se umjesto preko napona, struje i snage izraziti preko odgovarajućih aktivnih i reaktivnih otpornosti:

$$\cos\varphi = \frac{G}{Y} \quad \sin\varphi = -\frac{B}{Y} \quad \tan\varphi = -\frac{B}{G}$$

- Za  $B > 0$  je  $\varphi > 0$  a admitancija je pretežno induktivna,
- Za  $B < 0$  je  $\varphi < 0$  a admitancija je pretežno kapacitivna,
- Za  $B = 0$  je  $\varphi = 0$  a admitancija je omska vodljivost.

## Kompleksni prikaz veličina

### Simbolički pristup analizi krugova

Simbolički pristup daje zadovoljavajuće rezultate u smislu primjene postupaka rješavanja električnih krugova sa stalnim istosmjernim strujama i naponima na krugove izmjeničnih struja.

Simbolički pristup se bazira na ideji da se izmjenične veličine formalno iskažu kao kompleksni brojevi nakon čega se integralno-diferencijalne jednačbe zamjene s linearnim algebarskim jednačbama s kompleksnim koeficijentima čija su rješenja također kompleksni brojevi.

### Kompleksna impedancija

Kompleksna impedancija serijskog RLC kruga:

$$\underline{Z} = R + jX = Ze^{j\varphi} = Z(\cos\varphi + j\sin\varphi) \quad (\text{algebarski, eksponencijalni, trigonometrijski oblik})$$

$$\text{Apsolutna vrijednost: } Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$\text{Argument } \varphi = \arctg \frac{X}{R}$$

$$R \geq 0$$

$$-\infty < X < +\infty$$

$$-\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$$

### Priroda kompleksne impedancije

Pretežno induktivna:  $R > 0$  i  $X > 0$  ( $0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$ ) što odgovara realnom svitku,

pretežno kapacitivna:  $R > 0$  i  $X < 0$  ( $-\frac{\pi}{2} < \varphi < 0$ ) što odgovara realnom kondenzatoru,

čista aktivna(omska) otpornost  $R > 0$  i  $X = 0$  ( $\varphi = 0$ ) što odgovara idealnom otporniku,

čista reaktivna i to induktivna otpornost  $R = 0$  i  $X > 0$  ( $\varphi = \frac{\pi}{2}$ ) što odgovara idealnom svitku,

čista reaktivna i to kapacitivna otpornost  $R=0$  i  $X<0$  ( $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ ) što odgovara idealnom kondenzatoru.

## Kompleksna admitancija

Kompleksna admitancija paralelnog RLC kruga:

$$\underline{Y}=G-jB=Ye^{-j\varphi}=Y(\cos\varphi-j\sin\varphi)=\frac{1}{\underline{Z}}$$

$$\text{Apsolutna vrijednost } Y=\sqrt{G^2 + B^2}$$

$$\text{Argument } \varphi=-\arctg\frac{B}{G}$$

$$G\geq 0$$

$$-\infty < B < +\infty$$

$$-\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$$

## Priroda kompleksne admitancija

Pretežno induktivna:  $G\neq 0$  i  $B>0$  ( $0<\varphi<\frac{\pi}{2}$ ) što odgovara realnom svitku,

pretežno kapacitivna:  $G\neq 0$  i  $B<0$  ( $-\frac{\pi}{2}<\varphi<0$ ) što odgovara realnom kondenzatoru,

čista aktivna(omska)vodljivost  $G\neq 0$  i  $B=0$  ( $\varphi = 0$ ) što odgovara idealnom otporniku,

čista reaktivna i to induktivna vodljivost  $G=0$  i  $B>0$  ( $\varphi = \frac{\pi}{2}$ ) što odgovara idealnom svitku,

čista reaktivna i to kapacitivna vodljivost  $G=0$  i  $B<0$  ( $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ ) što odgovara idealnom kondenzatoru.

## Kompleksni napon i struja

Kompleksna efektivna vrijednost napona na krajevima serijskog RLC kruga:

$$\underline{U}=U_R+jU_X=Ue^{j\varphi}=U(\cos\varphi+j\sin\varphi)$$

Kompleksna efektivna vrijednost struje na krajevima paralelnog RLC kruga:

$$\underline{I}=I_R+jI_X=Ie^{j\varphi}=I(\cos\varphi-j\sin\varphi)$$

### Ohmov zakon

Kompleksna efektivna vrijednost struje koja protječe kroz neki dio električnog kruga proporcionalna je kompleksnoj efektivnoj vrijednosti napona na njegovim krajevima a obrnuto proporcionalna njegovoj kompleksnoj impedanciji.

$$\underline{U} = \underline{Z}^* \underline{I}$$

### Kirchhoffovi zakoni

Algebarski zbroj kompleksnih efektivnih vrijednosti struja u granama koje se stežu u čvoru jednak je nuli:  $\sum_i \underline{I}_k = 0$

Algebarski zbroj kompleksnih efektivnih vrijednosti padova napona na elementima neke zatvorene konture električnog kruga jednak je algebarskom zbroju kompleksnih efektivnih vrijednosti elektromotornih sila koje djeluju u toj konturi:  $\sum_m \underline{Z}_m \underline{I}_m = \sum_n \underline{E}_n$

### Povezivanje impedancija

Ekvivalentna kompleksna impedancija n trošila vezanih serijski je zbroj pojedinačnih kompleksnih impedancija

$$\underline{Z}_{ek} = \sum_{k=1}^n \underline{Z}_k = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \dots + \underline{Z}_n$$

Recipročna ekvivalentna kompleksna impedancija n trošila vezanih paralelno je zbroj pojedinačnih recipročnih kompleksnih impedancija

$$\frac{1}{\underline{Z}_{ek}} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{\underline{Z}_k} = \frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2} + \dots + \frac{1}{\underline{Z}_n} \quad (\text{Svako slovo } Z \text{ treba biti podvučeno})$$

### Snaga u kompleksnom obliku

Kompleksna prividna snaga:

$$\underline{S} = \underline{U}^* \underline{I} = P + jQ$$

Apsolutna vrijednost i argument prividne snage:

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad \varphi = \arctg \frac{Q}{P}$$

Veza prividne snage, impedancije i admitancije:

$$\underline{S} = \underline{Z}^* \underline{I}^2 \quad \underline{S} = \underline{Y}^* \underline{U}^2$$

# VIŠEFAZNE IZMJENIČNE STRUJE

## Osnovni pojmovi

U višefaznom sustavu svaki krug kojim protječe struja jedne faze naziva se faza. Broj takvih krugova određuje broj faza višefaunog susatava.

Višefazna EMS proizvodi se u generatoru koji ima  $n$  električki izoliranih i mehanički povezanih koji se okreću istom brzinom  $\omega$  oko zajedničke ose u homogenom magnetskom polju indukcije  $B$ .

Elektromotorna sila  $n$ -faznom susatava je:

$$e_1 = E_{1m} \sin(\omega t + \theta_1)$$

$$e_2 = E_{2m} \sin(\omega t + \theta_2)$$

$$e_n = E_{nm} \sin(\omega t + \theta_n)$$

Višefazno sustav je simetričan ako su maksimalne vrijednosti elektomotornih sila svih faza, kao i razlika početnih faza bilo koje susjedne faze konstantne. Matematski se to može zapisati kao:

$$E_{1m} = E_{2m} = \dots = E_{nm} = E_m$$

$$|\theta_1 - \theta_{k-1}| = \frac{2\pi}{n}$$

Razlikujemo tri vrste simetričnih višefaznih sustava:

- Direktni simetrični sustav (sustav s direktnim redoslijedom faza), ako naredna elektromotorna sila (napon, struja) fazno kasni za prethodnom ( $\theta_k < \theta_{k-1}$ ),
- Inverzni simetrični sustav (sustav s inverznim redoslijedom faza), ako naredna elektromotorna sila (napon, struja) fazno prednjači prethodnoj ( $\theta_k > \theta_{k-1}$ ),
- Nulti simetrični sustav (sustav s nultim redoslijedom faza), ako su sve elektromotorne sile (naponi, struje) u fazi ( $\theta_k = \theta_{k-1}$ ).

## Trofazni elektični krug

Trofazni električni krug je višefazni strujni krug koji ima ukupno  $n=3$  faze. Kod simetričnom trofaznog sustava elektromotorne sile, naponi i struje u sve tri faze imaju jednake maksimalne vrijednosti.

U slučaju sustava s direktnim redoslijedom faza, fazni pomak između prethodne i naredne elektormotorne sile (napona, struje) je  $2\pi/3$ , u slučaju sustava s invernim

redosljedom faza  $-2\pi/3$ , dok je u slučaju sustava s nultim redosljedom faza taj pomak jednak nuli.

Elektromotorna sila trofaznog simetričnog sustava direktnog redosljeda faza je:

$$e_1 = E_m \sin \omega t$$

$$e_2 = E_m \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$e_3 = E_m \sin \left( \omega t - \frac{4\pi}{3} \right)$$

U slučaju sustava inverznog redosljeda faza:

$$e_1 = E_m \sin \omega t$$

$$e_2 = E_m \sin \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$e_3 = E_m \sin \left( \omega t + \frac{4\pi}{3} \right)$$

U slučaju nultog redosljeda faza:

$$e_1 = E_m \sin \omega t$$

$$e_2 = E_m \sin \omega t$$

$$e_3 = E_m \sin \omega t$$

Kompleksna efektivna vrijednost elektromotorne sile trofaznog sustava je:

$$\underline{E} = \underline{E} e^{-j0}$$

$$\underline{E} = \underline{E} e^{-j\frac{2\pi}{3}}$$

$$\underline{E} = \underline{E} e^{-j\frac{4\pi}{3}}$$

Gdje je  $\underline{E}$  kompleksna efektivna vrijednost elektromotorne sile pojedinačne faze.

Kod trofaznih krugova, radi jednostavnijeg kompleksnog prikazivanja osnovnih parametara, uveden je kompleksni operator  $\underline{a}$ :

$$\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$$



Tako da se sustav jednadžbi može napisati u obliku:

$$\underline{E}_1 = \underline{E}$$

$$\underline{E}_2 = \underline{a} * \underline{a} * \underline{E}$$

$$\underline{E}_3 = \underline{a} * \underline{E}$$

Kompleksni operator se naziva još i operator okretanja, jer množenjem izmjenične veličine s njim dolazi do zakretanja faze za  $2\pi/3$  u pozitivnom smjeru okretanja pri čemu vrijedi:

$$\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\underline{a}^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$\underline{a}^3 = e^{j\frac{6\pi}{3}} = 1$$

Između elektromotornih sila simetričnog trofaznog sustava vrijede odnosi:

- Suma sve tri veličine je jednaka nuli

$$\underline{E}_1 + \underline{E}_2 + \underline{E}_3 = 0$$

- Suma dvije veličine jednaka je negativnoj vrijednosti treće:

$$\underline{E}_1 + \underline{E}_2 = -\underline{E}_3$$

- Razlika neke dvije veličine je:

$$\underline{E}_{12} = \underline{E}_1 - \underline{E}_2 = \sqrt{3}\underline{E}e^{j\frac{\pi}{6}}$$

Namotaji trofaznog generatora mogu biti vezani na dva načina:

- Spoj u trokut, kod koga se izlaz iz jednog namotaja veže za početak drugog,
- Spoj u zvijezdu, kod koga su sva tri ulaza (ili izlaza) vezana u jedan čvor, koji se naziva zvjezdishite ili nulta tačka.

Pored namotaja trofaznog generatora(izvora) i trofazni prijemnici također se na isti način mogu vezati u trokut ili zvijezdu.

### Veza u zvijezdu bez nultog vodiča

Fazni namotaj-pojedinačni namotaj generatora.

Stanje u faznom namotaju opisuje se pomoću faznih veličina, dok se stanje na linijskim vodičima opisuje pomoću odgovarajućih linijskih veličina.

Fazna struja-struja koja protječe kroz namotaj.

Fazni napon-napon između krajeva namotaja.

Linijaska struja – struja koja protječe kroz vodove linijskog vodiča.

Kod spoja u zvijezdu vodiči linijskog voda vezani su serijski s faznim namotajima, odakle slijedi da su u ovom slučaju linijske i fazne struje u pojedinačnim fazama međusobno jednake:

$$\underline{I_l} = \underline{I_f}$$

U ovom spoju linijski i fazni naponi nisu međusobno jednaki:

$$\underline{U_{12}} = \underline{U_1} - \underline{U_2}$$

$$\underline{U_{23}} = \underline{U_2} - \underline{U_3}$$

$$\underline{U_{31}} = \underline{U_3} - \underline{U_1}$$

Kompleksni efektivni linijski napon je  $\sqrt{3}$  puta veći od odgovarajućeg kompleksnog efektivnog faznog napona. Linijski napon fazno prednjači faznom naponu za  $\pi/6$ . Vrijedi relacija:

$$\underline{U_l} = \sqrt{3} \underline{U_f} e^{-j\frac{\pi}{6}}$$

f-fazni naponi, l-odgovarajući linijski naponi

### Veza u trokut

Odgovarajući fazni i linijski naponi jednaki:

$$\underline{U_l} = \underline{U_f}$$

U ovom spoju linijske i fazne struje nisu međusobno jednake:

$$\underline{I_1} = \underline{I_{31}} - \underline{I_{12}}$$

$$\underline{I_2} = \underline{I_{12}} - \underline{I_{23}}$$

$$\underline{I_3} = \underline{I_{23}} - \underline{I_{31}}$$

$$\underline{I_l} = \sqrt{3} \underline{I_f} e^{-j\frac{\pi}{6}}$$

## *Snaga u trofaznom krugu*

Trenutna snaga trofaznog kruga jednaka je zbiru trenutnih snaga svake pojedine faze:

$$p(t) = p_1(t) + p_2(t) + p_3(t)$$

$$P = \sqrt{3}U_1 I_1 \cos\varphi = 3U_1 I_1 \cos\varphi$$

Reaktivna snaga je također konstantna veličina:

$$Q = \sqrt{3}U_1 I_1 \sin\varphi = 3U_1 I_1 \sin\varphi$$

Prividna snaga je:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3}U_l I_l = U_f I_f$$

## *Okretno magnetsko polje*

Jedna od osnovnih osobina trofaznih sustava je pojava okretnog magnetskog polja, koje je u stanju okretati vodljivo tijelo koje se nađe u tom polju.

Pomoću okretnog magnetskog polja moguća je konverzija električne energije u mehaničku. Električni strojevi koji obavljaju ovu funkciju nazivaju se električni motori.

Trofazno okretno magnetsko polje obrazuju tri namotaja, prostorno razmještena tako da međusobno zatvaraju kut od  $2\pi/3$ , kroz koje protječu struje simetričnog trofaznog kruga direktnog redoslijeda faza:

$$i_1 = I_m \sin\omega t$$

$$i_2 = I_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$i_3 = I_m \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right)$$

Pod utjecajem ovih struja, duž osi namotaja djelovat će promjenljiva magnetska polja, čiji su intenziteti indukcija proporcionalni odgovarajućim strujama i u fazi su s njima:

$$b_1 = B_m \sin\omega t$$

$$b_2 = B_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$b_3 = B_m \sin\left(\omega t + \frac{4\pi}{3}\right)$$

Trenutna vrijednost intenziteta magnetske indukcije u središtu strukture jednaka je zbiru trenutnih vrijednosti pojedinačnih indukcija:

$$b = b_1 + b_2 + b_3$$

Trenutne vrijednosti komponenti magnetske indukcije u središtu strukture:

$$b_x = -\frac{3}{2} B_m \cos \omega t$$

$$b_y = \frac{3}{2} B_m \sin \omega t$$

$$b(t) = \sqrt{b_x^2 + b_y^2} = \frac{3}{2} B_m = B$$

$$a(t) = -\omega t$$

## Električni strojevi

Ako se u okretnom magnetskom polju nađe vodljivo tijelo, kroz njega će proteći struja. Pod utjecajem struje i okretnom magnetskog polja na vodljivo tijelo će djelovati elektromagnetske sile.

Ukoliko se tijelo može okretati oko svoje ose, elektromagnetske sile će stvoriti moment sile (mehanički) koji će okretati tijelo u smjeru okretanja magnetskog polja. Brzina okretanja polja i brzina okretanja vodljivog tijela oko svoje ose nisu jednake, te se stoga ovakav stroj zove asinkroni motor.

Asinkroni motor ima tri osnovna dijela:

- Stator, nepokretni dio, koji je vezan na trofaznu električnu mrežu i koji proizvodi okretno magnetsko polje,
- Rotor, pokretni dio, u kome se induciraju struje i koji se okreće u smjeru okretanja polja,
- Međuzeljezo, nepokretni dio, u kome se odigravaju procesi elektomagnetskog sprežavanja statora i rotora.

Smjer elektromagnetske sile možemo odrediti pravilom lijeve ruke. Ako u dlan lijeve ruke udaraju linije polja, a pri tome prste ispružimo u smjeru protjecanja struje, tad palac pokazuje smjer elektomagnetskih sila.

Kod ovakve konstrukcije električnog stroja brzina okretanja rotora mora biti manja od brzine okretanja okretnog magnetskog polja, jer u suprotnom vodiči rotora ne bi presijekali linije magnetskog polja, pa se u njima ne bi inducirala elektomotorna sila, što u krajnjem znači da se rotor ne bi ni okretao.

**Transformatori** su statički elektrotehnički aparat koji, pomoću elektromagnetske indukcije, pretvara jedan sustav izmjeničnih struja u jedan ili više sustava izmjeničnih struja iste frekvencije i različitih vrijednosti struja i napona.

Njegovom primjenom se, uz veoma male, gubitke energije, rješavaju problemi različitih naponskih razina i međusobne izoliranosti krugova koje se nalaze na tim različitim naponskim razinama.

Transformator se sastoji od sljedećih osnovnih dijelova:

- Magnetskog kruga, gradi se od tzv. transformatorskih limova,
- Namotaja, prave se od cilindričnog, profilnog ili trakastog vodiča od bakra,
- Izolacije, pravi se najčešće od papira, transformatorskog ulja i sl.,
- Transformatorskog suda, izrađuje se od kvalitetnog čelika s ojačanjima,
- Pomoćnih dijelova i pribora, u koje spadaju: natpisna pločica, izolatori za povezivanje s mrežom, konzervator, regulator napona, priključak za uzemljenje, džep termometra, pokazivač razine ulja itd.

Princip rada transformatora je sljedeći: na primarni namotaj transformatora dovodi se električna energija u obliku izmjenične elektromotorne sile, koja u magnetno spregnutom sekundarnom namotaju inducira odgovarajuću izmjeničnu elektromotornu silu, odnosno struju, koja se koristi za napajanje prijemnika. Dakle, primarni namotaj ponaša se kao izvor, a sekundarni kao prijemnik.



# ELEMENTI ELEKTIČNIH MJERENJA

Prema mjestu gdje se obavljaju mjerenja dijelimo na:

- Laboratorijska,
- Pogonska (servisna).

Prema složenosti mjerenja dijelimo na:

- Temeljna (osnovna),
- Specijalistička.

Za sve vrste mjerenja potrebni su odgovarajući mjerni uređaji i postupci. Mjerni uređaji moraju biti u skladu s međunarodno dogovorenim mjernim sistemom za fizikalne veličine što se u svakoj zemlji zakonski regulira.

Mjerenje obavljamo na dva načina:

- Pomoću instrumenata na kojima izravno očitavamo mjernu veličinu,
- Primjenom mjernih metoda gdje je određivanje mjerne veličine neizravno.

## Pojam greške mjerenja

Greška mjerenja jeste svako odstupanje od prave vrijednosti mjerene veličine . pod pravom vrijednošću smatramo onu koja se u danom trenutku može izmjeriti najtačnijim postupkom. Najtačniji uređaj za mjerenje zove se ETALON.

Razlikujemo 3 vrste grešaka:

- grube,
- sistematske,
- slučajne.

Grube greške nastaju nepažnjom čovjeka koji mjeri. Sistematske greške nastaju zbog nesavršenosti mjerne opreme (instrumenta i mjernog postupka), objekta na kojim mjerimo i obuhvatljivog utjecaja okoline. Slučajne greške nastaju zbog slučajnih i neobuhvatljivih promjena na opremi, okolini i mjernom objektu.

Po načinu kako je greška mjerenja izražena razlikuju se:

- apsolutne greške,
- relativne greške.

Apsolutna greška je razlika između mjerne vrijednosti i stvarne vrijednosti mjerene veličine:

$$\Delta X = X_i - X_s$$

Korekcija je negativna vrijednost apsolutne greške:  $K = -\Delta X$

Relativna kreška je količnik apsolutne greške i stvarne vrijednosti:  $\delta X = \frac{\Delta X}{X_t}$

Svedena relativna greška je greška „svedena“ na dogovorenu vrijednost  $\gamma X = \frac{\Delta X}{DV}$

### Srednja vrijednost mjerenja

Sve pojedinačne mjerene veličine dobivene su pod istim uvjetima, tako da nijedna vrijednost nema prednost nad drugom. Najvjerojatnija vrijednost mjerene veličine je njena aritmetička veličina:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

### Standardna devijacija mjerenja

Preciznost mjerenja je bliskost pojedinačnih rezultata mjerenja. Za ocjenu preciznosti mjernog postupka služi standardna devijacija:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Nepouzdanost srednje vrijednosti je procjena odstupanja srednje vrijednosti od stvarne vrijednosti mjerne veličine i računa se kao:

$$\overline{\delta^2} = \frac{\delta}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

### Električni mjerni pretvornici

Savremeni mjerni uređaji i oprema dominantno su, ili gotovo isključivo, električni i elektronički mjerni uređaji. Uređaji koji pretvaraju jednu fizičku veličinu u drugu nazivaju se pretvornici. Pretvornici koji pretvaraju jednu veličinu u drugu radi mjerenja nazivaju se mjerni pretvornici, a u slučaju ako se radi o mjerenju električnim putem – električni mjerni pretvornici.

## POLUVODIČKA ELEKTRONIKA

Elektronika je dio elektrotehnike koji se bavi vođenjem električne struje kroz poluvodiče, plinove i vakuum, te odgovarajućim elektroničkim elementima i sklopovima. Razvija se od početka dvadesetog stoljeća i temelji na vakuumskim (kasnije i plinskim) elektronskim cijevima. Pronalazak tranzistora polovicom



dvadesetog stoljeća dovodi do brzog razvitka poluvodičke elektronike, dok su ove druge dvije gotovo potisnute iz široke upotrebe.

Elektroniku možemo, u najširem smislu, sistematizirati na sljedeći način:

- prema području primjene,
- prema namjeni,
- prema karakteru električnih veličina.

Prema području primjene razlikujemo:

- informacijsku elektroniku, omogućava obradu i prijenos informacija, uz minimalnu potrošnju energije (telekomunikacije, automatika, mjerna tehnika)
- energetska elektroniku, bavi se elektroničkim elementima i sklopovima u proizvodnji, prijenosu i razdiobi električne energije.
- naučnu elektroniku, bavi se elektroničkim elementima i sklopovima koji se ugrađuju u plovne objekte ili se koriste u pomorstvu i nautici općenito,
- medicinsku elektroniku, bavi se elektroničkim elementima i sklopovima koji se koriste u medicini...

Prema namjeni postoji:

- elektronika široke potrošnje (konzumna elektronika), kod koje se elementi i sklopovi proizvode u masovnim količinama, pri čemu se uiz standardnu kvalitetu nastoje postići što niže cijene,
- profesionalna elektronika, obuhvaća uređaje i komponente predviđene za siguran rad i pri teškim uvjetima, pri čemu pouzdanost i trajnost moraju zadovoljiti visoke standarde.

Prema karakteru veličina imamo:

- analognu elektroniku, gdje parametar signala koji sadrži informaciju može poprimiti bilo koju vrijednost između dviju graničnih,
- digitalnu elektroniku, gdje parametar signala koji sadrži informaciju može poprimiti samo diskretne vrijednosti između dviju graničnih.

Na granici fizikalnih područja primjenu nalazi senzorska elektronika s elementima osjetljivim na okolišne podražaje, te pripadnim sklopovima najčešće sa zadatkom pretvorbe neelektičnih veličina u električne. Široko se primjenjuje i optoelektronika, koja povezuje područja elektronike i optike.

Elektronički elementi su dijelovi strujnih krugova s vođenjem kroz poluvodiče, plinove i vakuum. Elektronički sklopovi su kompleksniji strujni krugovi sastavljeni od više povezanih elemenata koji ostvaruju neke funkcije ili zadatke. U elektroničkom sklopu obično ima elemenata iz opće elektrotehnike koji nisu elektronički. Elektroničke komponente su najmanji kompaktni i odvojivi dijelovi elektroničkih uređaja. Mogu sadržavati pojedine elektroničke elemente ili cijele sklopove.

# POLUVODIČI

Za korektan opisi fenomena u poluvodičima potrebno je koristiti nerelativističku kvantnu teoriju, po kojoj se atom nalazi u jednom od dva stanja:

- osnovno stanje, elektroni popunjavaju najniže razine,
- pobuđeno stanje, svako stanje koje nije osnovno.

Atom prirodno teži biti u osnovnom stanju. Zbog toga atomi koji nemaju potpuno popunjenu zadnju ljusku moraju stupati u veze (ionske, kovalentne, metalne). Atom prelazi iz osnovno u pobuđeno stanje ako mu se dovede kvant energije (foton ili fonon) dovoljan da svlada procjep između osnovnog i pobuđenog stanja.

Atom se iz pobuđenog vraća u osnovno stanje uz emisiju kvanta energije jednake procjepu između osnovnog i pobuđenog stanja.

Proces stvaranja parova elektrona – šupljina naziva se ionizacija i trajno je prisutan na temperaturama iznad apsolutne nule. Šupljine se lako popunjavaju sa slobodnim elektronima povratkom atoma u početno stanje, što se stalno i događa, a naziva se rekombinacija.

Ionizacija i rekombinacija jednakobrojni su događaji, češći pri višim temperaturama.

## Tipovi poluvodiča

- poluvodič I-tipa („čisti“) je poluvodič strukture SI bez primjesa. U osnovnom stanju nema slobodnih elektrona i šupljina, a u pobuđenom stanju ih ima vrlo malo,
- poluvodič N-tipa, poluvodič strukture SI s primjesom donora (arsen, antimon, fosfor). glavni pokretni nositelji su elektroni, a manjinski nositelji su šupljine.
- Poluvodič P-tipa, dopiranjem silicija s nekim trovalentnim elementima kao što su aluminij, bor, galij dobiva se ovaj tip poluvodiča. Atomi nečistoće nazivaju se akceptori. Većinski pokretni nositelji su šupljine, a manjinski nositelji su elektroni.

## PN spoj

Električno polje na prijelaznom području stvara razliku potencijala  $V_c$  koja se naziva potencijalna barijera ili kontaktni potencijal. Potencijalni barijera sprječava daljnji tok većinskih nositelja preko spoja pod ravnotežnim uvjetima (kad ne teče struja jer su grift i difuzija u ravnoteži).

## DIODE

U većini elektroničkih elemenata koristi se bitna osobina poluvodičkih materijala: mogućnost stvaranja zapornog sloja. Zaporni sloj posjeduje izrazitu nelinearnost strujno-naponske ovisnosti, što znači da preko barijere u jednom smjeru struja može teći, a u drugom ne.

Elektronički element koji sadrži samo poluvodičku barijeru, odnosno jedan PN- spoj naziva se dioda. Prema konstrukciji razlikujemo više vrsta dioda, npr:

- Ispravljačka dioda, služi prvenstveno za pretvaranje izmjeničnih struja i napona u istosmjernu, dok u krugu istosmjerne struje služi kao prekidač,
- Zenerova dioda, služi primarno za stabilizaciju napona, što se postiže nepropusnom polarizacijom, s obzirom da u slučaju propusne polarizacije ona ponaša kao ispravljačka dioda,
- tunelska dioda, zbog velike brzine rada služi uglavnom kao memorijski element,
- fotodioda, služi uglavnom kao detektor svjetlosti, odnosno elektromagnetskog zračenja,
- svjetlosna dioda, služi uglavnom kao izvor svjetlosti, odnosno elektromagnetskog zračenja.

Dioda ima dva izvoda (elektrode), preko kojih se uključuje u strujni krug. Elektroda povezana s P-tipom poluvodiča naziva se anoda (A), dok se elektroda povezana s N-tipom poluvodiča naziva katoda (K).

## TIRISTORI

Tiristor je element s četiri zaporna stroja, a može se promatrati kao dioda s mogućnošću poluupravljanja. Oni se u praksi koriste npr. kao prekidači.

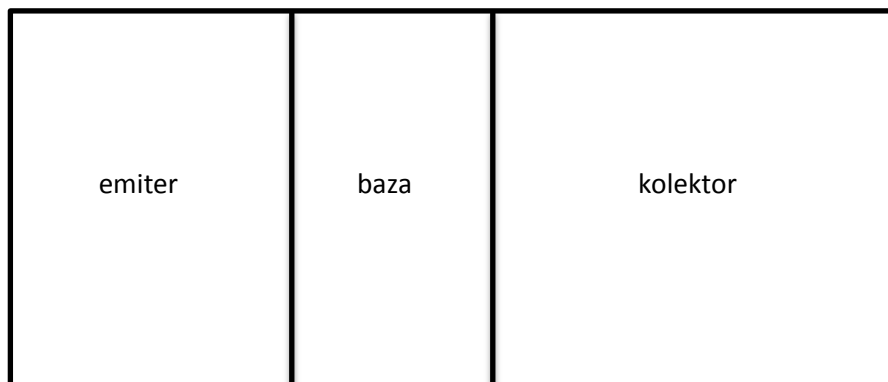
Razlikujemo sljedeće vrste tiristora:

- dinistor, ima dvije elektrode – anodu (A) i katodu (K), na vanjskim slojevima P-tipa, odnosno N-tipa.
- trinistor, pored anode i katode, na jednom od unutarnjih poluvodičkih slojeva ima upravljačku elektrodu – vrata (G),
- binistor, pored anode i katode, na oba unutarnja poluvodička sloja ima upravljačke elektrode – vrata.

Pored nabrojanih četveroslojnih struktura, postoje i višeslojne ( s pet i više poluvodičkih slojeva) strukture, od kojih su najpoznatije diac i triac.

# TRANZISTORI

Tranzistor je elektronski element koji se sastoji od tri sloja poluvodiča, što znači da ima dva PN-spoja. S tim u vezi, razlikujemo tranzistore NPN i PNP tipa. Princip rada oba ova tipa tranzistora je identičan.



Presjek bipolarnog tranzistora

Razlikujemo dva režima rada bipolarnog tranzistora:

- linearni režim, koji nastupa kad su dva prijelaza različito polarizirana (jedan propusno a drugi nepropusno). Tranzistor se tada ponaša kao pojačalo, te se s toga ovaj režim naziva i pojačavački,
- nelinearni režim, koji nastupa kad su dva prijelaza identično polarizirana (oba propusno ili oba nepropusno). Tranzistor se tada ponaša kao prekidač, te se s toga ovaj režim naziva i prekidački.

Kod pojačavačkog režima razlikujemo dva slučaja:

- direktni aktivni režim (ili kratko: aktivni režim), koji nastupa kad je prijelaz baza – emiter polariziran propusno, a onaj baza – kolektor nepropusno,
- obrnuti aktivni režim, koji nastupa kad je prijelaz baza – emiter polariziran nepropusno, a onaj baza – kolektor propusno.

Osnovna razlika između ova dva pojačivačka režima ogleda se u tome što je pojačanje kod direktnog režima nekoliko puta (tipično 2-3 puta) veće u odnosu na pojačanje obrnutog režima.

Kod prekidačkog režima također razlikujemo dva slučaja:

- režim zasićenja, koji nastupa kada su oba prijelaza polarizirana propusno,
- režim kočenja, koji nastupa kad su oba prijelaza polarizirana nepropusno.

U režimu zasićenja tranzistor se praktično ponaša kao kratak spoj, a u režimu kočenja kao prekid strujnog kruga.

# OSNOVNI ELEKTRONIČKI SKLOPOVI

Pod pojmom elektronički sklop podrazumijevamo svaki prosti ili složeni strujni krug koji sadrži barem jedan elektronički element.

## TRANZISTOR KAO POJAČALO

Pojačalo električnih signala (napona, struje i snage) je uređaj koji mali signal pretvara u veliki. Ovo pojačanje signala vrši se na račun električne energije izvora kojim se pojačavački element napaja. Kao pojačavački element najčešće se koriste tranzistori.

## TRANZISTOR KAO PREKIDAČ

Tranzistorski prekidač omogućava prekid i uspostavu strujnog kruga, slično kao i mehanički prekidači, s tim da tranzistor može raditi neusporedivo brže i neusporedivo više puta. Zadaća ovog sklopa je imati ili nemati na izlazu napon napajanja  $U_{cc}$ .

## DIGITALNA ELEKTRONIKA

Digitalna elektronika bavi se obradom podataka koji se prikazuju numerički. Razvoj digitalne elektronike usko je povezan s razvojem digitalnih računara i o njemu je uzajamno ovisan. Digitalna elektronika, u tom smislu, proučava principe funkcioniranja i načine izvedbe digitalnih elektroničkih sklopova i sustava.

Digitalni elektronički sklopovi jesu električni krugovi koji na svojim izlazima mogu, u određenom trenutku, imati stanje iz skupa od konačno mnogo elemenata.

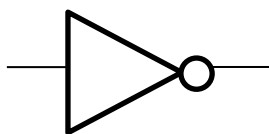
Pojednostavljeno rečeno, digitalni sklop može se naći u konačno mnogo stanja, neovisno o signalu kojem se pobuđuje.

Pod pojmom logička funkcija podrazumijevamo funkciju koja određenu kombinaciju logičkih simbola, po unaprijed određenom pravilu, prevodi u neku drugu kombinaciju logičkih simbola.

Elektronski krugovi, pomoću kojih u elektrotehnici praktično realiziramo logičke funkcije, nazivaju se logički krugovi.

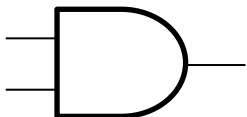
## **OSNOVNI LOGIČKI SKLOPOVI**

Negacija je logička funkcija koja na izlazu okreće logičku vrijednost ulaza.



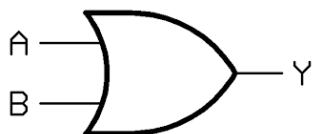
X	Y
0	1
1	0

Konjunkcija je logička funkcija koja na izlazu logički množi vrijednost ulaza.



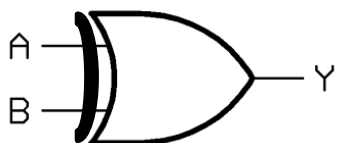
X1	X2	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Logički krug „ILI“ s dva ulaza



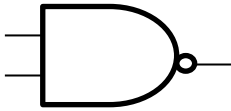
A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Logički krug „isključivo ILI“



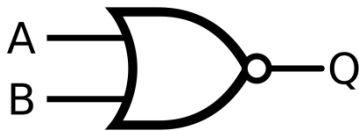
A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Logički krug „NI“ s dva ulaza



X1	X2	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Logički krug „NAND“ s dva ulaza



A	B	Q
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

## ELEMENTARNE LOGIČKE STRUKTURE

Logičke strukture, u najširem smislu, možemo podijeliti na:

- ❖ Komunikacijske, kod kojih stanja izlaza iz strukture, u nekom trenutku, zavise samo od stanja ulaza u tu strukturu u tom istom trenutku,
- ❖ Sekvencijalne, kojih kojih stanja izlaza iz strukture, u nekom trenutku, zavise ne samo od stanja ulaza u tom istom trenutku, nego i od nekih prethodnih stanja ulaza, i/ili izlaza iz strukture.

Kombinacijske strukture koriste se najčešće za realizaciju sljedećih funkcija, odnosno zadataka:

- ❖ usmjeravanje signala iz nekog od raspoloživih izvorišta do jednog od raspoloživih odredišta, po unaprijed utvrđenom pravilu,
- ❖ obavljanje aritmetičkih i logičkih operacija,
- ❖ kodiranje i dekodiranje podataka,
- ❖ kompresija i ekspanzija podataka.

Najpoznatije kombinacijske strukture su:

- ❖ krugovi za zbrajanje, koji obavljaju funkcije aritmetičkog zbrajanja, odnosno oduzimanja,

- ❖ multiplekseri, koji omogućavanje usmjeravanje jednog signala, iz skupa ulaznih signala na jedan zajednički izlaz; u pravilu imaju više ulaza i jedan izlaz; selekcija željenog izlaza vrši se pomoću upravljačkog signala,
- ❖ demultiplekseri, koji omogućavaju usmjeravanje signala iz jednog jedinog ulaza na jedan ili više izlaza, u pravilu imaju jedan ulaz i više izlaza; selekcija željenih izlaza vrši se pomoću upravljačkih signala,
- ❖ koderi, koji na izlazu komprimiraju (sažimaju) ulazne podatke, u pravilu imaju više ulaza i izlaza, s tim da je broj ulaza veći od broja izlaza,
- ❖ dekoderi, koji na izlazu ekspandiraju (raširuju) ulazne podatke; u pravilu imaju više ulaza i izlaza, s tim da je broj ulaza manji od broja izlaza,
- ❖ aritmetičko-logičke jedinice, koje obavljaju razne aritmetičke i logičke operacije.