

1. Borov model atoma

Prvi pokušaj objašnjenja strukture atoma potiče od Ernesta Raderforda koji je na osnovu drugih osobina materije pretpostavio da se atom sastoji od pozitivno naelektrisanog jezgra oko kojeg kruže negativno naelektrisani elektroni, slično kretanju planeta oko Sunca (model se zato i naziva *planetarni model atoma*). Ulogu centripetalne sile u ovom slučaju preuzima privlačna elektrostatička (Kulonova) sila. Prema znanjima klasične elektrodinamike, već tada je bilo jasno da ovaj model ne odgovara realnosti: elektron koji se kružno kreće neprestano emituje elektromagnetske talase, pa iako bi to objasnilo zašto elektron zrači svetlost, nije moglo da objasni strukturu spektra atomskih gasova. Međutim, ključni problem ove teorije je to što bi elektron morao da zračenjem gubi energiju i na kraju "padne" na jezgro.

1913, danski fizičar Nils Bor (1885-1962) uspeva da objasni spektar atoma vodonika uvodeći u planetarni model dopunske pretpostavke - postulate, inspirisane uspesima kvantnih hipoteza Planka i Ajnštajna. Znajući da atomi mogu apsorbovati svetlosnu energiju samo u kvantima, on pretpostavlja da atomi tu energiju mogu takođe i emitovati samo u kvantima. Time cela slika o emitovanju i apsorbovanju svetlosti postaje konzistentna.

Bor prihvata planetarni model atoma za osnovu, i pretpostavlja da se pri emitovanju jednog kvanta svetlosti (fotona) energija atoma smanjuje tako što se smanjuje energija nekog elektrona u omotaču atoma; sa druge strane, pri apsorbovanju jednog kvanta svetlosti (fotona) se povećava energija nekog elektrona u omotaču atoma. Ta pretpostavka je objasnila dotadašnja otkrića o apsorpciji i emisiji svetlosti kao kvantnim događajima i povezala ih sa strukturom atoma. Frekvenca emitovanog ili apsorbovanog fotona određena je zakonom o održanju energije:

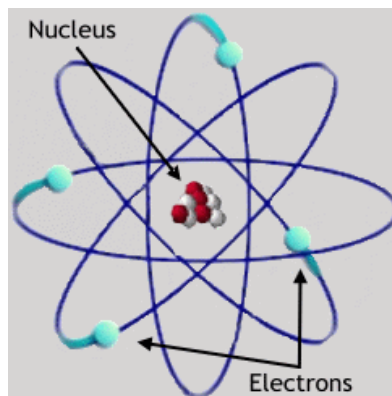
$$E_{\text{fot}} = h f = E_{\text{kr}} - E_{\text{poč}}$$

$$\begin{aligned} E_{\text{fot}} & \dots \text{energija emitovanog ili apsorbovanog fotona} \\ h & \dots \text{Plankova konstanta } (6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}) \\ f & \dots \text{frekvenca svetlosti} \\ E_{\text{kr}} & \dots \text{energija elektrona na kraju procesa} \\ E_{\text{poč}} & \dots \text{energija elektrona na početku procesa} \end{aligned}$$

Ključni element Borove teorije je povezan sa objašnjenjem strukture spektara atoma: budući da je eksperimentalno utvrđeno da atomi emituju samo određene talasne dužine (samo određene frekvence), na osnovu prethodnih razmatranja Bor pretpostavlja da elektroni u atomu mogu imati samo neke vrednosti energije, i da je to zato što elektroni u atomu mogu da se kreću samo po nekim putanjima. To Bor povezuje sa mogućnošću da elektroni pri kretanju na tim orbitama ne zrače elektromagnetsku energiju, dok na svim drugim orbitama zrače i ne mogu trajno da opstanu (kako je to već bilo jasno u Raderfordvom modelu). Te orbite Bor naziva *stacionarnim*. Time Bor pretpostavlja da se kvantuje kretanje unutar atoma, jer ako se elektroni mogu kretati samo po određenim orbitama, onda se mogu kretati samo određenim brzinama, imati samo određene vrednosti energije, i uopšte sve fizičke veličine vezane za procese u atomu mogu imati samo određene - kvantovane - vrednosti. Time je promenjen pogled na celokupnu fiziku i uvedeni su pojmovi *kvantne mehanike* i *kvantne fizike* uopšte. Veličina Borovog modela je u tome što on daje i kvantitavni uslov na osnovu koga se mogu izračunati vrednosti svih tih veličina. Poređenje sa eksperimentalnim istraživanjima je pokazalo slaganje koje je potvrdilo Borovu teoriju.

Bor je dao uslov koji orbita mora da ispunjava da bi bila stacionarna: moment količine kretanja elektrona na orbiti mora biti celobrojni umnožak kvanta momenta količine kretanja $L_{\text{kv}} = h/2\pi$. Znači, elektron na prvoj orbiti ima moment količine kretanja $L_1 = h/2\pi$, na drugoj $L_2 = 2 h/2\pi$ i tako redom. Redni broj orbite na kojoj se nalazi elektron se naziva *glavni*

kvantni broj elektrona. Borov model međutim, nije mogao da objasni uzrok kvantovanja: njegov glavni doprinos se sastojao u uvođenju kvantnog podgleda na fizičke objekte. Povedeni Borovim radom, u sledećih desetak godina su De Brolji, šredinger, Hajzenberg, Pauli, Dirak i drugi fizičari razvili *talasnu kvantnu mehaniku*, pogled na mikrosvet u kome je od ključnog značaja pretpostavka da celokupna materija ima i talasna i čestična svojstva. U talasnoj kvantnoj mehanici, elektroni u stacionarnom stanju u atomu predstavljaju svojevrsne stojeće talase, a Borov kvantni uslov predstavlja uslov nastajanja stojećeg talasa u zatvorenom prostoru.



Sl. 1.1 Bohrov model atoma.

2. Kulonova sila

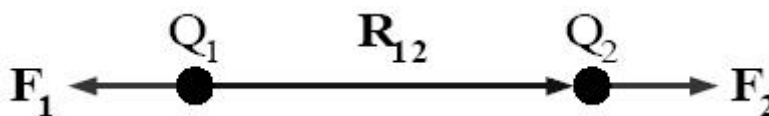


Charles Augustin Koulon 1736-1860 sin je pravnika iz Langedoka, inspektora kraljevskih dobara. Majka je želela da bude lekar, a on se oduševljavao matematikom. Kulon napušta majku i završava studije-inženjersku školu u Mezijeu. Kulon primenjuje dinamički metod oscilacija gde je izvođenje eksperimenta lakše ali je interpretacija ekspeimenta teža. Horinzontalna igla obešena o konac usmerena je ka centru sfere i na kraju prema sferi ima malu ploču naelektrisanu suprotno naelektrisanju sfere. Kada se pomakne iz stabilnog položaja ona oscilira.

- Dva naelektrisana tela ([čestice](#)) se međusobno privlače ili odbijaju silom koja je srazmerna proizvodu njihovog naelektrisanja, a obrnuto srazmerna kvadratu rastojanja između ta dva tela.

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$

- Pri čemu je:
- **F** - Električna sila,
- **k** - Kulonova konstanta (zavisi od sredine u kojoj se tela nalaze),
- **q₁** i **q₂** - Naelektrisanja tih tela,
- **r** - Rastojanje između tih tela "



Karakter Kulonove sile zavisi isključivo od prirode naelektrisanja.

3. Električno polje

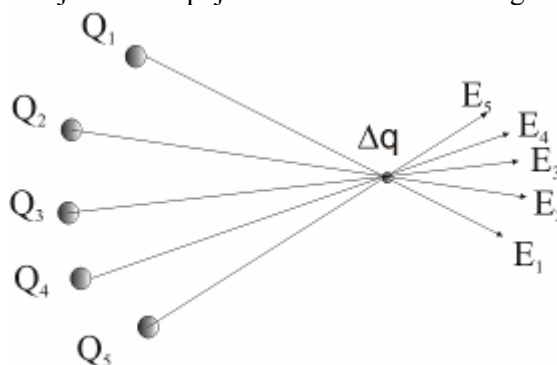
- **Električno polje** je pojava, stvorena naelektrisanjem ili magnetnim poljem promenljivim u vremenu, koja deluje silom na naelektrisane objekte u polju. SI jedinica električnog polja jeste njutn po kulonu, ili volt po metru, što je isto. Električno polje postoji oko svakog naelektrisanja; smer linija polja u nekoj tački jednak je smeru sile koja deluje na pozitivno probno naelektrisanje u toj tački. Posebno stanje materijalne sredine u okolini naelektrisanih tela.
- **Električno polje se definiše kao konstanta proporcionalnosti između naelektrisanja i sile:**

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = k \frac{Q}{r^2} \vec{r}$$

– gde je

- ❖ F sila data Kulonovim zakonom,
- ❖ q količina naelektrisanja „probnog naelektrisanja“,
- ❖ Q količina naelektrisanja tela koje stvara električno polje,
- ❖ a r je vektor rastojanja od čestice sa naelektrisanjem Q .

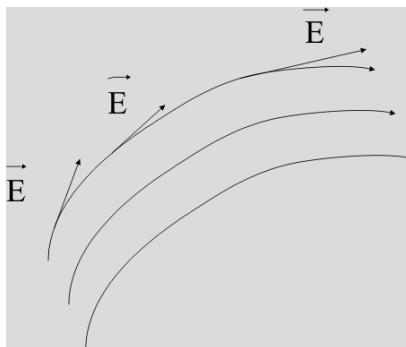
Električno polje podleže principu superpozicije. Ako je prisutno više od jednog naelektrisanja, rezultatno polje u bilo kojoj tački jednako je vektorskom zbiru električnih polja koje bi naelektrisanja stvarala pojedinačno u odsustvu drugih



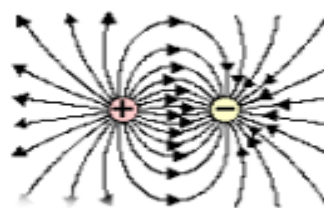
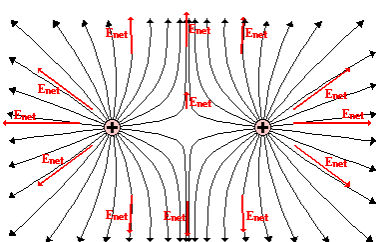
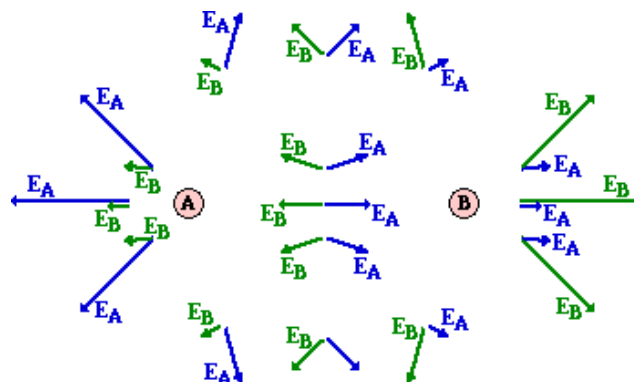
$$\mathbf{E}_{\text{ukupno}} = \sum_i \mathbf{E}_i = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 + \mathbf{E}_3 \dots$$

4. Linije električnog polja

Električno polje kao i sva druga vektorska polja se može se predstaviti pomoću linija polja. Linija polja se definiše kao zamišljena linija pomoću koje se vizuelizuje električno polje i kojoj je vektor polja u svakoj tački tangenta. To su usmerene linije koje se mogu povući kroz svaku tačku prostora polja. Skup linija polja predstavlja spektar polja. Linije polja se nigde ne seku iz prostog razloga jer je intezitet polja jednoznačno određen u svakoj svojoj tački. Pogodnim izborom gustina linija, pomoću linija polja se osim pravca i smrea određuje i intezitete polja. Što su linija polja u nekom njegovom delu gušće to je i polje u tom delu jače i obrnuto.



Linije električnog polja sa vektormo polja kao tangentnom



SPEKTAR LINIJA ELEKTRIČNOG POLJA. Privlačno odbojni karakter električnog polja. Kao što smo rekli linije električnog polja su orijentisane linije sa izvorima na površini pozitivnih opterećenja i ponorima na površinama negativnih opterećenja.

5. Rad sile električnog polja

Ako se u električno polje unese probno opterećenje Δq , na njega polje deluje silom

$$\vec{F} = \Delta q \vec{E}$$

Pod dejstvom te sile, opterećenje Δq se kreće po određenoj putanji (recimo od tačke M do tačke N), pri čemu rad vrše sile električnog polja. U opštem slučaju je sila F promenljiva i po intezitetu, pravcu i smeru rad koji s tom prilikom izvrši biće

$$\Delta A = F \Delta l$$

Ukupni rad sile F po celoj putanji biće jednak

$$A = \int_M^N F dl = \Delta q \int_M^N E dl$$

Integral koji stoji uz Δq predstavlja linijski integral vektora električnog polja E na putanji M-N.

Elektrostatičko polje pripada klasi konzervativnih polja. Karakteristika konzervativnih polja jeste da je rad sile u ovim poljima po zatvorenoj putanji jednak nuli. Drugim rečima rad koji izvrše sile polja E pri pomeranju probnog opterećenja duž neke zatvorene putanje, ne zavisi od oblika putanje već samo od položaja njenih krajnjih tačaka.

6. Električni potencijal

- Električni potencijal (znak: φ ili U) veličina je u fizici i elektrotehnici kojom se izražava električna potencijalna energija opterećenja u električnom polju. Pri tome je jačina električnog polja jednaka negativnom gradijentu električnog potencijala:
- Električni se potencijal ne može neposredno meriti, već se meri samo njegova razlika koja je jednaka električnom naponu.
- Tačke u prostoru u kojima električni potencijal ima jednake vrednosti čine ekvipotencijalne površine.
- SI mernih jedinica propisuje za električni potencijal izvedenu jedinicu volt.

Posmatrajmo probno opterećenje u tački $A (x_0, y_0, z_0)$ u prostoru. Probno opterećenje raspolaže u odnosu na neku tačku $P (x_1, y_1, z_1)$ potencijalnom energijom W_p , koja je jednaka radu koji treba da izvrše sile polja da bi opterećenje Δq prebacili iz tačke M u tačku P . Prema tome

$$W_p = A = \int F dl = \Delta q \int E dl$$

Ova potencijalna energija zavisi od Δq i položaja pomenutih tačaka, i ne zavisi od puta koji povezuje ove dve tačke. Količnik potencijalne energije i probnog opterećenja je nazvisan od probnog opterećenja i definiše elektrostatički potencijal (ili električni skalar potencijal)

$$\varphi = \int_M^\infty E dl$$

Ova funkcija je skalrane prirode i opisuje električno polje na ekvivalentan način kao i funkcija E .

Razlika potencijala između dve tačke M i N predstavlja napon U_{M-N} .

$$U = \varphi_M - \varphi_N = \int_M^N E dl$$

7. Potencijal tačkastog opterećenja i skupa tačkastih opterećenja

Pošto nam je od ranije poznato da je

$$\varphi = \int_M^\infty E dl \quad \vec{E} = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{Q}{r^2} \vec{r}_0$$

Integraleći gornji izraz u datim granicama dobijamo konačni izraz za potencijal tačkastog opterećenja sa referentnom tačkom u beskonačnosti u obliku:

$$\varphi = \int_M^\infty E \cdot d\vec{l} = \frac{Q}{4\pi \epsilon_0} \frac{1}{r_M}$$

Električni skalar potencijal podleže principu superpozicije. Ako je prisutno više od jednog naelektrisanja, resultantno polje u bilo kojoj tački jednako je skalarnom zbiru potencijala električnih polja koje bi naelektrisanja stvarala pojedinačno u odsustvu drugih

$$\varphi = \frac{1}{4\pi \varepsilon_0} \sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{r_i}$$

8. Ekvipotencijalne površine

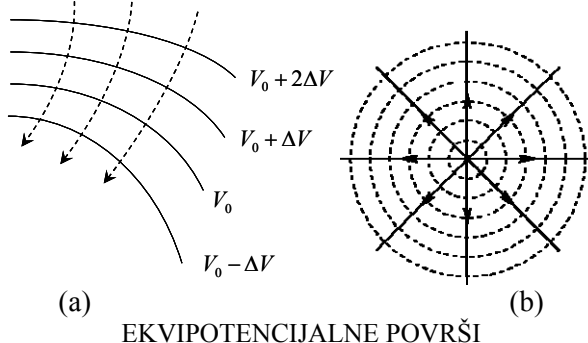
Skupovi tačaka u kojima funkcija potencijala ima iste vrednosti obrazuju ekvipotencijalne površi, čija je jednačina:

$$V(x, y, z) = \text{const.}$$

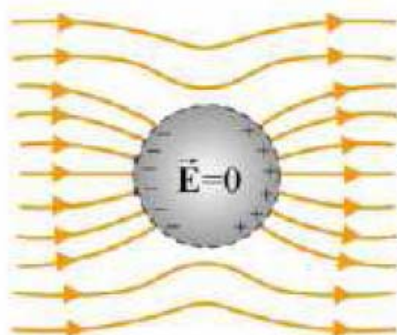
Rad sila polja pri pomeranju tačkastog naelektrisanja po bilo kojoj od ekvipotencijalnih površina mora biti jednak nuli na svakom elementu puta, što je neposredna posledica definicije funkcije potencijala.

Vektor polja i linije polja (kojima je vektor polja u svakoj tački tangentan) moraju biti normalni na ekvipotencijalne površine.

Na slici (a) je predstavljen presek sa ravni crteža familije ekvipotencijalnih površina. Ovi preseki se nazivaju ekvipotencijalne linije. Linije električnog polja su prikazane isprekidanim linijama i usmerene su u smeru opadanja potencijala. Na slici (b) su prikazane linije električnog polja (puna linija) i ekvipotencijalne površi (isprekidana linija) tačkastog pozitivnog naelektrisanja. U ovom slučaju, ekvipotencijalne površi su sfere u čijem centru se nalazi tačkasto naelektrisanje



9. Provodnik u stranom električnom polju. Elektrostatička indukcija

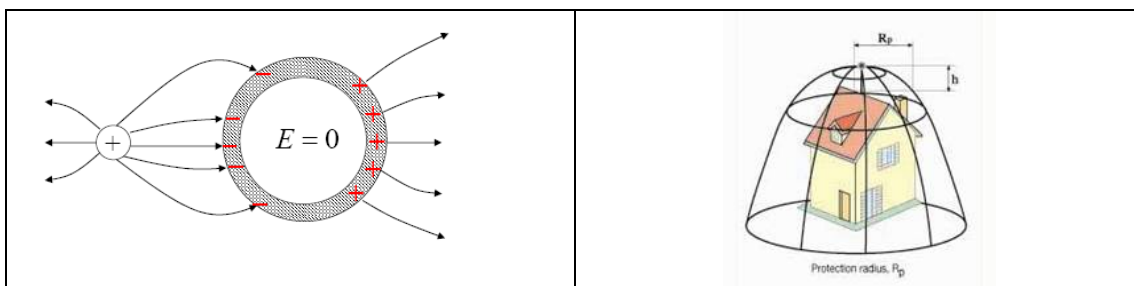


Elektrostatička ravnoteža zahtev da jačina električnog polja u unutrašnjosti, kao i njegova tangencijalna komponenta na površini provodnika budu jednaki nuli.

Ako bismo jedan provodnik uneli u električno polje zbog pomeranja elektrona provodnosti na njegovoj površinijavljaju se indukovana elektrčna opterećenja i to negativna, višak elektrona

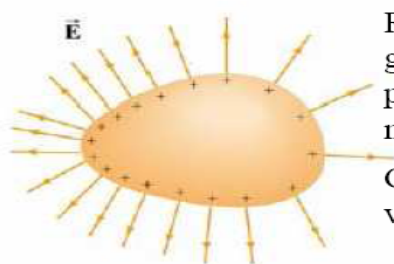
na onim delovima površine gde linije električnog polja u ulaze u provodnik, a pozitivna na onim delovima površine gde linije polja napuštaju provodnik. Pojava razdvajanja pozitivnih i negativnih opteređenja pod dejstvom spoljašnjeg električnog polja naziva se elektrostatika indukcija.

Pošto je provodnik pre unošenja u polje bio električno neopterećen, sumarno opterećenje posle unošenja mora biti jednako nuli. Indukovana opterećenja se raspoređuju tako da njihov polje poništava primarn strano polje u unutrašnjosti i učini da rezultujući vektor polja na spoljašnjoj površini provodnika bude normalan na nju. Na taj način u unutrašnjosti provodnika nema polja. Još jednom naglašavamo da linije polje ulatze odnosno izlaze sa površine provodnika pod pravim uglom. Ista siutacija je i u slučaju kada u prosotr polja unesemo šupalj provodnik.



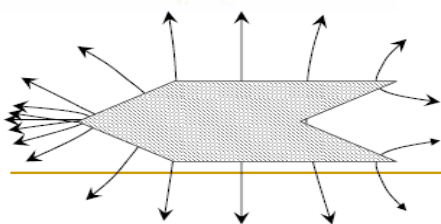
Površinska naelektrisanja se lokalizuju u veoma tankom površinskom sloju odnosno dolazi do ekrnizujućeg dejstva šupljih provodnika i posotji samo u slučaju polja koja potiču od spoljašnjih opterećenja (Faradejev kavez).

10. Raspodela opterećenja na površini provodnika efekat šiljka.



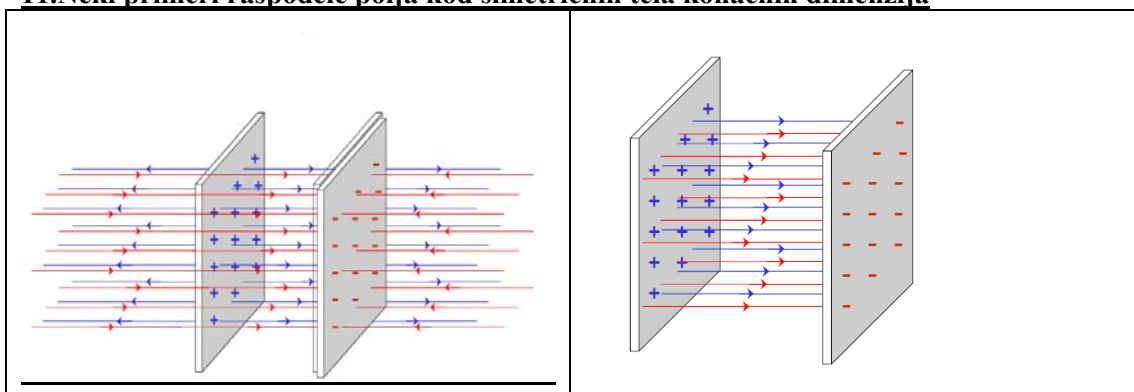
Raspodela naelektrisanja, tj. njihova površinska gustina, bitno zavisi od geometrijskog oblika površine provodnika, kao i od načina na koji je naelektrisan (opterećenjem ili indukcijom).

Gustina naelektrisanja i jačina polja su utoliko veći ukoliko je zakrivljenost površine veća.



Jačina polja i gustina naelektrisanja su maksimalni na šiljcima, a teže nuli unutar udubljenja.

11. Neki primeri raspodele polja kod simetričnih tela konačnih dimenzija



Električno polje para paralelnih suprotno naelektrisanih ploča (a) Polje je lokalizovano u prostoru između provodnih ploča (b)
Kao zaključak iznosimo sledeće:

Uslovi elektrostatičke ravnoteže, odnosno mirovanja el. opterećenja na provodniku nastupiće:

1. **Kada je Električno polje u unutrašnjosti provodnika jednako nuli**
2. **Kada je tagnecijlana komponenta električnog polja na površini provodnika jednaka nuli**

12. ELEKTRIČNA KAPACITIVNOST I KONDENZATORI

Između naelektrisanja Q , usamljenog provodnika, i njegovog potencijala V , izracunatog prema referentnoj tacki u beskonacnosti, postoji linearna zavisnost, koja se može napisati:

$$Q = C U$$

Koeficijent proporcionalnosti C naziva se elektricna kapacitivnost (ili kapacitivnost) usamljenog provodnika. Ako se izraz napiše u obliku:

$$C = \frac{Q}{U}$$

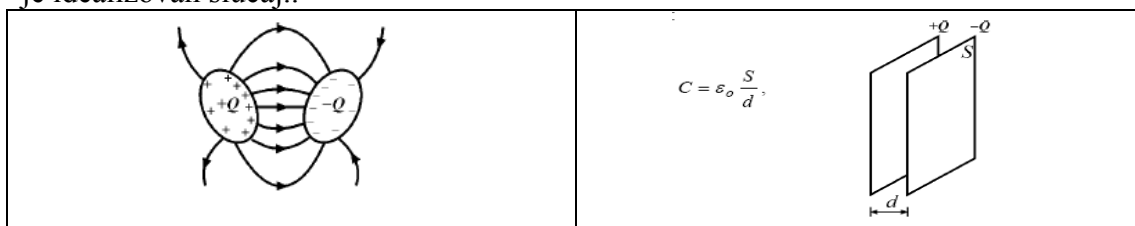
Novo uvedenu fizicku velicinu - kapacitivnost možemo definisati kao kolicnik naelektrisanja i potencijala nekog usamljenog provodnika.

Jedinica kapacitivnosti je C/V (**kulon po voltu**). Ova jedinica zove se farad, u cast engleskog fizicara i hemicara **Faradeja** (Michael Faraday, 1791-1867), pronalazaca principa prvog elektromotora:

Farad je za prakticnu upotrebu suviše velika jedinica, pa se cesto koriste njegovi multipli: mikrofarađ ($1\mu F=10^{-6}F$), nanofarađ ($1nF=10^{-9}F$) i pikofarađ ($1pF=10^{-12}F$).

12.1 Kapacitivnost sistema od dva provodnika.

Usamljeni provodnici, cak i kada su vrlo velikih dimenzija, imaju vrlo malu kapacitivnost. Zbog toga je njihov znacaj kao sistema za “nagomilavanje” elektricnih opterećenja u tehnickim primenama beznacajan. Sa druge strane usamljeni provodnik je idealizovan slucaj..



U stvarnosti se svako telo nalazi na vecoj ili manjoj udaljenosti od drugih tela. Ako su ova druga tela elektricno opterećeni ili neopterećeni provodnici, ona svojim prisustvom uticu na potencijal i raspodelu opterećenja na posmatranom provodniku, a

taj uticaj je utoliko veci ukoliko se ova druga tela nalaze na manjem odstojanju. Od posebnog znacaja u tehnici je slucaj dva bliska provodnika koji su optereceni jednakim kolicinama elektriciteta suprotnog znaka

Ovakav sistem se naziva kondenzator, a provodnici koji ga obrazuju nazivaju se elektrodama kondenzatora. Naelektrisanja na elektrodama stvaraju elektricno polje, cije linije polaze sa pozitivno naelektrisanje elektrode a završavaju se na negativno naelektrisanju elektrodi. Između dveju elektroda opterećenog kondenzatora postoji potencijalna razlika, odnosno napon:

$$U_{12} = V_1 - V_2 = \int_1^2 \vec{E} \cdot d\vec{l}.$$

Odnos naelektrisanja Q pozitivno opterećene elektrode i napona između pozitivne i negativne elektrode, definiše kapacitivnost kondenzatora,

$$C = \frac{Q}{U}.$$

Kapacitivnost kondenzatora, cije se elektrode nalaze u vakuumu, zavisi od oblika, dimenzija i međusobnog položaja elektroda, kao i od osobina dielektrika ako je prostor između elektroda ispunjen dielektricom materijom.

Opterećivanje kondenzatora može se ostvariti na razne nacine, ali u praksi se to najčešće čini pomoću nekog električnog izvora (npr. baterije) za čije polove se vežu elektrode kondenzatora. Na šemama se kondenzator označava simbolom:

$$\frac{\perp}{\perp} C$$

12.2 Kapacitivnost ravnog kondenzatora.

Najjednostavnija vrsta kondenzatora je tzv. ravni ili pločasti kondenzator. On se sastoji iz dve paralelne provodne ploče cije je međusobno rastojanje d malo u poređenju sa linearnim dimenzijama ploča.

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

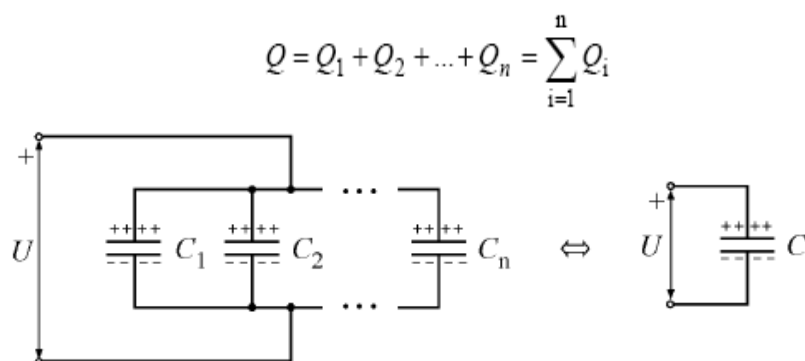
U ovom slucaju, prakticno celokupno polje lokalizovano je u prostoru između elektroda i homogeno je. Odstupanje postoji samo u okolini ivica ploča gde postoji izvesno rasipanje i nehomogenost, koji su utoliko beznacajni ukoliko je rastojanje d manje.

12.3 Sprezanje kondenzatora - ekvivalentna kapacitivnost.

Prilikom rešavanja razlicitih zadataka postoji potreba za vezivanjem u grupe više kondenzatora razlicitih kapacitivnosti i to na razlicite nacine. Postavlja se zadatak odredivanja ekvivalentnog kondenzatora, koji u odnosu na prikljucene krajeve može da zameni celu grupu.

12.2.1 Paralelno vezivanje kondenzatora:

Kod paralelnog vezivanja, svi kondenzatori priključeni su na isti napon U . Ukupno naelektrisanje Q kojim se optereti sistem paralelno vezanih kondenzatora jednak je zbiru opterećenja Q_i , kojim se optereće pojedini kondenzatori.



Pošto je $Q = CU$

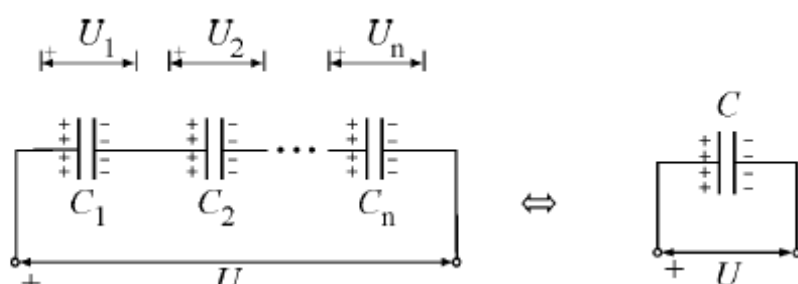
Vazi:

$$Q = \sum_{i=1}^n U \cdot C_i = U \cdot \sum_{i=1}^n C_i,$$

Dakle, pri paralelnom vezivanju, kapacitivnosti spregnutih kondenzatora se sabiraju.

$$C = \sum_{i=1}^n C_i.$$

12.2.2 Redno vezivanje kondenzatora



Ako se redno spregnuta grupa kondenzatora prikljuci na izvor napona U , sistem će se opteretiti tako da će opterećenje svih kondenzatora biti isto, tj. .

Napon na i -tom kondenzatoru jednak je:

$$U_i = \frac{Q}{C_i},$$

a zbir napona na svim redno vezanim kondenzatrima mora biti jednak naponu na krajevima cele redne veze:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n = \sum_{i=1}^n U_i,$$

Odnosno:

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{Q}{C_i} = Q \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i},$$

Odakle dobijam da je kod redne veze kondenzatora recipročna veza ekvivalentne kapacitivnosti jednaka je zbiru recipročne vrednosti kapacitivnosti pojedinih kondenzatora u rednoj vezi.

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}.$$

12.2.3 Uticaj temperature

Data kapacitivnost vredi samo za određenu temperaturu, obično za $\vartheta_0 = 25^\circ\text{C}$. Zavisnost kapacitivnosti kod drugih temperatura je linearna i povezana sa temperaturnim koeficijentom α , koji je zavisan od dielektrika. Porastom temperature opada dozvoljeni radni napon

$$C = C_0(1 + \alpha(\vartheta - \vartheta_0)).$$

13. Električno polje u dielektricima

13.1 Polarizacija dielektrika

U dielektrike spada citav niz cvrstih, tecnih i gasovitih materijala koji, za razliku od provodnika, ne sadrže slobodno pokretljiva naelektrisanja (slobodne elektrone). Razmatracemo samo izotropne dielektrike, tj. dielektrike cije su elektricne osobine iste u svim pravcima. Makroskopski efekti dielektricne materije su prvi put precizno formulisani u radovima Faradeja i Maksvela. Kevendiš, a zatim i Faradej, su utvrdili da se kapacitivnost jednog kondenzatora menja ako se prostor između njegovih elektroda ispuni dielektricnim materijalom.

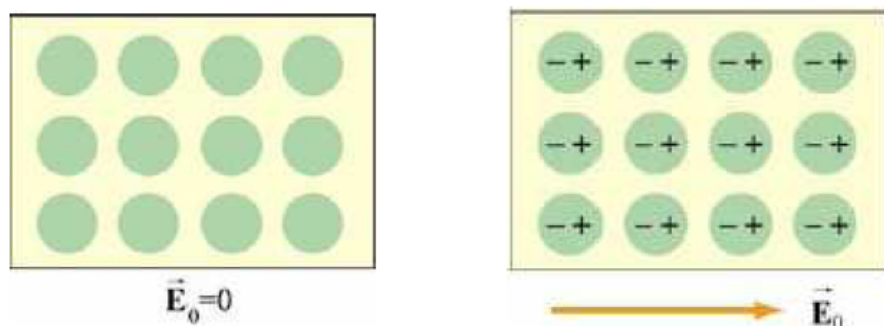
Neka je C_0 kapacitivnost kondenzatora između čijih elektroda se nalazi vakuum, a C kapacitivnost tog istog kondenzatora kada je ovaj prostor ispunjen dielektrikom. Pokazano je da je odnos kapacitivnosti C/C_0 nezavisan od oblika i velicine kondenzatora, pod uslovom da je dielektrik uvek isti. Ovaj odnos se naziva dielektricna propustljivost ili relativna dielektricna konstanta:

$$\varepsilon_r = \frac{C}{C_0}$$

Strogo govoreći, to i nije konstanta jer u izvesnoj meri zavisi od jacine polja u kome se dielektrik nalazi, a zavisi i od frekvencije. Uticaji dielektricnih materijala na kapacitivnost kondenzatora, na sile međusobnog dejstva naelektrisanih tela, predstavljaju makroskopske manifestacije mikroelektricnih pojava koje se odigravaju u atomima i molekulima dielektrika podvrgnutog elektricnom polju.

Pod dejstvom elektricnih sila, pozitivne cesticke se pomeraju u pravcu i smeru polja, a negativne u suprotnom smeru. Ovo pomeranje iz položaja ravnoteže je ograniceno na

veoma mala odstojanja, jer se dejstvu sila polja suprotstavljaju unutrašnje atomske i molekularne sile. Opisani proces u atomima i molekulima dielektricnih materijala se naziva polarizacija dielektrika. Razlikuju se dva tipa dielektrika s obzirom na njihovu elektricnu molekularnu strukturu, odnosno s obzirom na raspored elementarnih elektricnih opterećenja u molekulu kada se ovaj nalazi van spoljašnjeg polja.



Ako se atomi i molekuli u odsustvu polja ponašaju elektricno neutralno u odnosu na okolinu, rec je o nepolarnim dielektricima.

Primenjeno električno polje ce uzrokovati redistribuciju naelektrisanja u atomu, tako da svaki atom dobije moment elektricnog dipola, iako ga nije posedovao u odsustvu elektricnog polja. Proces polarizacije je slican kod svih dielektrika sa nepolarnim molekulima: pod dejstvom polja molekul postaje dipol cija je osa u pravcu i smeru polja, a moment dipola je srazmeran jacini polja.



Makroskopska velicina kojom se karakteriše stanje polarizacije dielektrika je vektor jacine polarizacije:

$$\vec{P} = \frac{1}{dV} \sum_{i=1}^N \vec{p}_i$$

Gde je $\vec{p}_i$ vektorski zbir elektricnih momenata svih dipola u fizicki malom elementu zapremine dV . Vektor jacine polarizacije zapravo predstavlja zapreminsku gustinu elektricnog momenta u polarizovanom dielektriku.

Ako je dielektrik sastavljen samo od nepolarnih molekula i pri tome je homogeno polarizovan, vektor jacine polarizacije je:

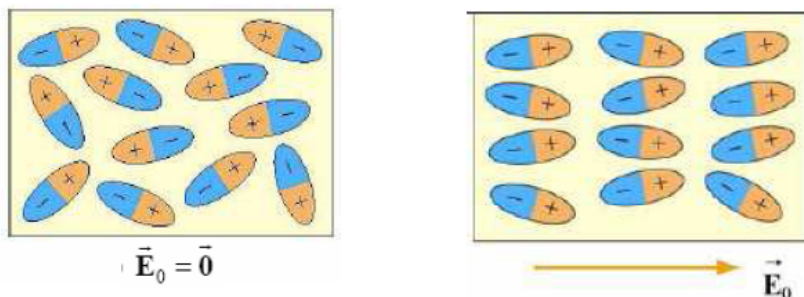
$$\vec{P} = N' \vec{p}$$

gde je $N'=N/dV$ zapreminska gustina dipola u dielektriku, a p elektricni moment jednog molekula dipola. Vektor jacine polarizacije je srazmeran jacini polja:

$$P = \alpha E$$

Konstanta α se naziva koeficijent polarizacije. Jedinica za jacinu polarizacije je C/m² (kulon po metru kvadratnom).

Kod polarnih dielektrika, raspored naelektrisanja u molekulu van spoljašnjeg polja je takav da su električni centri pozitivnih i negativnih naelektrisanja međusobno pomereni tako da obrazuju električne dipole.



Orijentacija polarnih molekula je proizvoljna u odsustvu polja. Pod dejstvom polja, dipoli teže da se svojim osama postave u pravcu polja, ali se ovoj tendenciji suprotstavlja termičko kretanje, pa dolazi samo do delimične orijentacije dipola.

Pri normalnim jačinama električnog polja, vektor jačine polarizacije je srazmeran jačini polja:

$$\vec{P} = \alpha' \vec{E}$$

Za velike jačine polja, linearnost se narušava i javlja se efekat zasićenja.

Koeficijent polarizacije α' je obrnuto srazmeran temperaturi.

Pod dejstvom pobudnog polja se i u unutar samih molekula vrši pomeranje pozitivnih i negativnih naelektrisanja. Koeficijent polarizacije kod polarnih dielektrika α' se može predstaviti u obliku:

$$\alpha' = \alpha + \frac{\beta}{T}$$

gde je T apsolutna temperatura, a α i β konstante nezavisne od temperature.

Vrednost kapaciteta kondenzatora obično je napisana na telu kondenzatora. Oznaka mF ili pF ne mora postojati. Kondenzatori manjeg kapaciteta sa brojanom oznakom u opsegu od 1 - 1000 su reda pikofarada; kondenzatori većeg kapaciteta sa brojanom oznakom u opsegu od .001 - 1000 su reda veličine mikrofarada.

Elektrolitički kondenzatori obezbeđuju veliki kapacitet u maloj zapremini tela. Njihovi krajevi su polarisani i stoga moraju u strujno kolo da se priključe u odgovarajućem smeru. Kondenzatori imaju dozvoljeni radni napon. On je obično napisan na telu kondenzatora, ispod oznake za kapacitet. Dozvoljeni radni napon mora biti veći od najvećeg napona koji se može u normalnim uslovima pojaviti u strujnom kolu (obično napona napajanja uređaja).

Napomena: Kondenzator može da cuva naelektrisanje dugo vremena nakon što je napajanje isključeno. Ovo naelektrisanje može biti opasno! Veliki elektrolitički kondenzatori napunjeni pod naponom od 5 do 10 V mogu se isprazniti (rasteretiti) prespajanjem krajeva kondenzatora šrafciigerom. Kondenzatori koji su priključeni na visoki napon napunjeni su ogromnim količinama naelektrisanja. Ove kondenzatore treba pažljivo prazniti pomoću otpornika odgovarajuće otpornosti (koristite Omov

zakon) prislonjenog između priključnih krajeva kondenzatora. Prilikom izvođenja ove operacije treba koristiti samo jednu ruku da ne biste istovremeno dodirnuli oba kraja kondenzatora.



Vrsta kondenzatora	Raspon kapaciteta	Maksimalni napon	Temp. stabilnost	Gubici	Napomena
Liskunski	1pF-0,01μF	100-600V		mali	Vrlo dobri, preporučuju se za primenu na radio frekv.
Keramički cilindrični	0,5pF-100pF	100-600V	varira		Vrlo mali kapacitet. Različite vrednosti temperaturnog koeficijenta, uključujući i nulu
Keramički	10pF-1μF	50-1000V	niska		Male dimenzije, jeftini, široka primena
Milard	0,001μF-10μF	50-60V	niska	mali	Dobri, jeftini, široko se koriste
Polistirenski	10pF-0,01μF	100-600V		vrlo mali	Visokokvalitetni, preporučuju se za upotrebu u filterima, veliki
Polikarbonatski	100pF-10μF	50-400V	visoka	mali	Visokokvalitetni, preporučuju se u integrisanim sklopovima
Stakleni	10pF-1000μF	100-600V		vrlo mali	Stabilni pri dugotrajnoj upotrebi
Porculanski	100pF-0,1μF	50-400V	visoka	mali	Dobri, jeftini, stabilni pri dugotrajnoj upotrebi
Tantalski	0,1μF-500μF	6-100V	niska		Veliki kapacitet uz prihvatljive gubitke, malih dimenzija, polarizovani, neznačajna induktivnost
Elektronski	0,1μF-0,2F	3-600V	vrlo loša	vrlo veliki	Preporučuju se samo za upotrebu u filterima izvora za napajanje (u drugim slučajevima zamenjuju se tantalskim), polarizovani, kratak radni vek
Uljni	0,1μF-20μF	200-10kV		mali	Visokonaponski filteri, velike dimenzije, dug radni vek

Još jednom da se osvrnemo na najvažnije primene kondenzatora:

1. Uklanjanje neželjenih naponskih pikova bloka napajanja. (Stavite kondenzator kapaciteta 0.01 - 0.1 mF između krajeva naponskog izvora koji napaja digitalna kola. Ovime sprečavate neželjena okidanja digitalnih kola.)
2. Glacanje ispravljenog naizmeničnog napona u stabilan jednosmerni napon. (Stavite kondenzator kapaciteta 100 - 10000 mF između izlaznih krajeva ispravljača.)

3. Blokiranje jednosmernog signala i propuštanje naizmenicnog signala.
4. Odvođenje naizmenicnog signala na masu.
5. Filtriranje neželjenih delova varirajućeg signala.
6. Integriranje varirajućeg signala u odgovarajućoj sprezi sa otpornikom.
7. Diferenciranje varirajućeg signala u odgovarajućoj sprezi sa otpornikom.
8. Obavljanje vremenskih funkcija. Kondenzator se brzo puni ... zatim se sporo prazni preko otpornika R.
9. Cuvanje (držanje) naelektrisanja da bi držao tranzistor u uključenom (otvorenom) ili isključenom (zatvorenom) stanju.
10. Držanje naelektrisanja da bi ga oslobodio preko elektronske cevi ili svetlosne diode u obliku brzog i snažnog impulsa.

14. ELEKTROSTATICKO PRAZNJENJE esd-(electrostatic discharging)

Pod elektrostatičkim pražnjenjem podrazumevamo nekontrolisani prelazak naelektrisanja između provodnih površina oje se nalaze na različitim potencijalima. Statički elektricitet može i kad nema opasnosti od eksplozije izazvati štetne smetnje u nekim proizvodnim procesima (u tekstilnoj industriji, grafičkoj industriji i sl.). U realnom svetu, na koncentraciju akumuliranog statičkog elektriciteta utiču još i brojni drugi faktori: kontaktna površina, brzina razdvajanja naelektrisanja, relativna vlažnost, itd.

Čovek je kao samostalna jedinka električki neutralan pa je onda prirodno zapitati se otkud statički elektricitet na njemu. Najčešći izvor statičkog elektriciteta jest odeća koju nosimo, ako je napravljena iz sintetičkih vlakana (poliester, najlon, akril, ...). Statički elektricitet lako nastaje prilikom trljanja odjeće o telo ili drugi odjevni predmet. Dalje, neki predmeti u kući (tepisi, zavjese, plastični ili plastikom obrađeni namještaj, audio uređaji, ...) mogu na svojoj površini akumulirati i nekoliko hiljada volti statičkog elektriciteta. Najčešće vrednosti el. potencijala akumuliranog statičkog elektriciteta pri određenim aktivnostima (podaci vrede za relativne vlažnosti 60 - 90%; pri manjoj vlažnosti vrednosti potencijala povećavaju se - i do nekoliko desetina hiljada volti):

Hodanje tepihom	1500 V
Hodanje preko vinilnih pločica	250 V
Radnik za <i>benchom</i>	100 V
Polvinilna kesapokupljena sa <i>bencha</i>	1200 V
Stolica napravljena od uretana	1500 V

14.1 ZAŠTITA I PREVENCIJA OD ESD

Osnovna filozofija zaštite leži u odvođenju elektriciteta provodnikom, tj. uzemljenje objekata koji su skloni gomilanju statičkog elektriciteta i/ili ga stvaraju. Na tom principu rade tzv. eliminatori statičkog elektriciteta. Takođe, preporučuje se povećanje relativne vlažnosti u prostoriji u kojoj boravite i korišćenje antistatičkih sprejeva i tekućina.

14.1.1 Posebne zaštitne mere

Neke od metoda za eliminaciju statičkog elektriciteta koji se stvara u toku proizvodnih procesa su:

- uzemljenjem,
- održavanjem odgovarajuće vlage u zraku,
- jonizacijom zraka,
- antistatičkom preparacijom,
- povećanjem provodljivosti slabo provodnih materijala,
- odvođenjem statickog elektriciteta influencijom.

Uzemljenje

Uzemljenje se izvodi galvanskim vezivanjem svih provodnih delova sistema na masu. Suština ovog postupka je da se svi delovi sistema dovedu na jedinstveni potencijal I na taj način se eliminiše mogućnost nekontrolisanog transporta naelektrisanja u saglasnosti sa izrazom

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$$

Presek bakarnog provodnika koji se koristi za vezivanje delova sistema, s obzirom na mehaničku čvrstoću, ne sme biti manji od 4 mm². Umesto bakrnih provodnika može se upotrebiti čelična pocinkovana traka preseka najmanje 20 × 3 mm. Za fleksibilne vodove i spojeve treba upotrebiti bakreno uže preseka 10 mm².

Kao uzemljivači mogu se upotrebiti svi tipovi uzemljivača predviđeni odredbama Pravilnika o Tehničkim propisima o gromobranima, odnosno priključak postrojenja na postojeći sistem zaštitnog uzemljenja. Otpor sistema uzemljenja za odvođenje statičkog elektriciteta mora biti u granicama određenima Pravilnikom o Tehničkim propisima o gromobranima, odnosno određenim u Tehničkim propisima za izvođenje elektroenergetskih instalacija u zgradama i uslovima za izvođenje elektroenergetskih instalacija u zgradama ("Službeni list", br. 43/66).

Mesta nagomilavanja statičkog elektriciteta u okviru postrojenja moraju se povezati najkraćim putem na sistem uzemljenja.

Pokretni delovi postrojenja, preko bakrenih, bronzanih ili ugljenih četkica, priključuju se na sistem uzemljenja. Četkice moraju biti normalno i čvrsto postavljene na rotirajuću osovinu, s pritiskom na površinu od 0,1 do 0,2 kp/cm². Pokretni delovi između ležišta i osovine pri malome procepu i odgovarajućem nazivu moraju ispunjavati uvete za otpor uzemljenja.

Provodni podovi

Koji se koriste za odvođenje statičkog elektriciteta moraju imati prelazni otpor manji od $10^6 \Omega$. Prelazni otpor podova mora se kontrolisati u vremenskim razmacima

Materijali za izradu provodnih i njihov prelazni otpor dati su tablici:

Materijal	Izmereni otpor u omima
Pločice keramičke	$10^7 - 10^9$
Daske za brodski pod	$10^6 - 10^{10}$
Linoleum	$10^6 - 10^{10}$
guma	10^2
Umjetni kamen-nevodljiv	10^{11}
Obični beton debljine 3 cm	10^5
Specijalni beton debljine 5 cm	10^2
Provodni penušavii pod	10^2
Teraco	$10^5 - 10^7$
Provodni taraco	10^3
Asfalt	10^{10}

Vlaga

Vlažnost kao sredstvo za otklanjanje opasnosti od statičkog elektriciteta može se primeniti samo ako to dopuštaju tehnološki postupak i svojstva materijala koji se obrađuje.

Relativna vlaga dozira se ventilacijskim klimatskim uređajima, ili se para dovodi pomoću parnih mlazova koje se postavljaju u blizini mesta za koje se konstatovalo da predstavljaju mesta najveće koncentracije statičkog elektriciteta. Propuštanje pare kroz cevi i prskalice može u njima dovesti do skupljanja statičkog elektriciteta, pa se stoga cevi moraju galvanski povezati na sistem uzemljenja.

Pri relativnoj vlažnosti vazduha od 70% ne pojavljuje se opasnost od elektriciteta. Relativna vlažnost zraka može se smanjiti i ispod 90% u pojedinim tehnološkim procesima u kojima se moraju primenjivati propisana sredstva i postupci navedeni opštim pravilnicima.

Relativna vlažnost vazduha mora se kontrolisati u određenim vremenskim razmacima, higrometrom, odnosno stalno – higrografom

Antistatički postupci

Antistatičkom postupkom poboljšava se odvođenje statičkog elektriciteta. U tom slučaju potrebno je površinu materijala premazati ili potopiti u antistatik. Sredstva antistatičke zaštite moraju biti takva da nemaju štetno dejstvo na svojstva materijala preko kojih se nanose i da ne izazivaju koroziju mašina i njihovih delova. U slučaju tekstilnih materijala deo postupka

antistatičke zaštita obavlja se tokom pranja tkanina. Tokom tehnološkog postupka treba, prema potrebi, ponoviti postupke anistatičke zaštite.

Povećanje provodnosti slabo provodnih materijala

Da bi se postigla bolja provodnost nekih od gore pomenutih materijala moraju se preduzeti odgovarajuće tehnološke operacije koje za posledicu imaju promene površinske strukture posmatranih materijala, a što za posledicu ima poboljšanje njihove provodnosti. Tako na primer provodnost prirodne ili sintetičke gume poboljšava se dodavanjem koloidalnog grafitu. Provodnost tečnosti i rastvora povećava se dodavanjem etilnog alkohola. Rezultat ovih postupaka biće potpun ako ukupna otpornost ovih materijala prema zemlji ne bude veća od $1\text{M}\Omega$. Radi neutralizacije elektrostatičkih pojava na materijalima kod kojih su potrebne zaštitne mere od šteta i smetnja od statičkog elektriciteta, upotrebljavaju se visokonaponski ili radioaktivni eliminatori, koji se postavljaju u blizini mjesta na kojima se skuplja statički elektricitet.

Dodatne zaštitne mere

Pri proizvodnji i radu s eksplozivnim materijalima i municijom treba, osim mera predviđenih u ovom delu, primenjivati dodatne zaštitne mjere, koje se odnose na odeću i obuću radnika

Radnici mogu biti naelektrisani i postati prenosioci statičkog elektriciteta. Ako se statičkim elektricitetom naelektrisana osoba približi nekom uzemljenom predmetu, dolazi do elektrostatičkog pražnjenja, iskra kojega može izazvati eksploziju zapaljivih materijala i municije. Ta garderoba ne sme biti izrađena od svile, niti sme sadržati vlakna od sintetičnog materijala. Obuća radnika mora biti od kože ili od provodne gume. U donove se moraju ugraditi metalne ploče, radi uspostavljanja stalne galvanske veze između radnika i zemlje. Električni otpor između unutrašnje i spoljne strane obuće mora iznositi najmanje $10^7 \Omega$. Radnici zaposleni u proizvodnji i radu s eksplozivnim materijalima i municijom ne smeju nositi prstenje, narukvice i druge metalne predmete. Podovi u prostorijama za proizvodnju i rad s eksplozivnim materijalima i municijom moraju ispunjavati uslovi. Pravilnika o tehničkim normativima za zaštitu od statičkog elektriciteta. Sve ručice, kvake, brave i sl. moraju biti povezane na sistem uzemljenja.

15. ELEKTRICNA STRUJA, DŽULOV I OMOV ZAKON

Elektricnom strujom, u širem smislu, naziva se svako uređeno kretanje električnih opterećenja, bez obzira na uzroke ovog kretanja i na vrstu električnih opterećenja koja učestvuju u ovom kretanju. Električna struja može se obrazovati u čvrstim, gasovitim sredinama, pa čak i u vakuumu. Pokretljiva naelektrisanja koja mogu obrazovati elektricnu struju su elektroni i pozitivni joni.

U čvrstim telima, a posebno u veoma važnoj kategoriji koju čine metalni provodnici, slobodno pokretljiva naelektrisanja su elektroni, odnosno negativna elementarna naelektrisanja. To su tzv. elektroni provodljivosti, koji pripadaju spoljašnjoj elektronskoj ljusci i koji su kod provodnika vrlo labavo vezani za matične atome i molekule.

Od tečnih sredina u kojima se može obrazovati elektrilna struja posebno su značajni elektroliti. Slobodno pokretljiva naelektrisanja u elektrolitima su joni, pozitivni i negativni. Pod određenim uslovima i u gasovima, koji su po pravilu dobri izolatori, može doći do pojave elektricne struje. Primer za ovo su neonske cevi i fluorescentne svetiljke. Slobodno pokretljiva naelektrisanja u ovom slučaju su pozitivni i negativni joni i elektroni. Elektricna struja se može obrazovati i u vakuumu, ako se na pogodan način obezbedi prisustvo slobodnih elektrona.

S obzirom na vrstu pokretljivih opterećenja koja učestvuju u pojavi elektricne struje, struje se mogu podeliti na

1. elektronske i
2. jonske.

Potreban, ali ne i dovoljan, uslov za nastanak i održavanje elektricne struje je postojanje slobodno pokretljivih opterećenja. Iako nije jedini, daleko najvažniji i najčešći agens ove vrste je električno polje. Pod dejstvom sila toga polja, pokretljiva elementarna naelektrisanja sredeno se kreću i obrazuju elektricnu struju. Da bi struja ima stacionarni karakter (veličine koje karakterišu strujno polje nepromenjive su u vremenu) i električno polje mora biti stacionarno.

Između elektrostatičkog i stacionarnog elektricnog polja postoje bitne razlike:

1. Stacionarno električno polje egzistira i u unutrašnjosti provodnika (elektrostatičko polje ne postoji u unutrašnjosti provodnika);
2. Za održavanje stacionarnog polja neophodan je stalan utrošak, odnosno dovodenje energije sistemu - jer stacionarno polje neprestano vrši rad pomerajući pokretna električna opterećenja. posredstvom strujnih izvora ili generatora, koji druge vidove energije ili rada transformišu u električni rad) polja.

Struja u provodnoj vezi između elektroda može biti stacionarna samo ako su ispunjena sledeća dva uslova:

- a) Sistem mora biti deo zatvorenog strujnog kola formiranog od provodnika;
- b) U kolu mora biti uključen električni uređaj, koji kontinualno potiskuje prispele elektrone provodnosti sa pozitivne na negativnu elektrodu, održavajući stalnu potencijalnu razliku na svojim priključcima (ovakvi uređaji se nazivaju strujni izvori ili generatori).

15.1 Prateći efekti električne struje.

Toplotni efekat je jedan osnovnih i odavno poznatih efekata električne struje. Ova pojava je poznata pod imenom Džulovog efekta, po imenu engleskog istraživaca iz 19. veka, koji je ustanovio osnovni zakon održanja energije - prvi zakon termodinamike (James Prescott Joule, 1818-1889). Elementarna pokretljiva naelektrisanja, krećući se kroz provodnu sredinu, predaju svoju stecenu kinetičku energiju česticama provodnika i tako povećavaju njegovu termičku energiju. Makroskopski gledano, kretanje elektriciteta kroz provodnik povezano je sa nekom vrstom “električnog trenja”. Osobina provodnika i uopšte drugih materijala da se silama trenja suprotstavljaju prelasku elektriciteta naziva se otpornošću provodnika.

Hemijski efekat je drugi prateći efekt električne struje. Za razliku od toplotnog efekta, koji je manje ili više uvek prisutan i povezan sa pojavom električne struje, hemijski efekt dolazi do izražaja samo u posebnoj vrsti provodnika koji se nazivaju elektroliti ili provodnici druge klase. Elektroliti spadaju vodeni (i neki drugi) rastvori kiselina, baza i soli, kao i rastopine nekih soli. Po uspostavljanju struje, pozitivni joni kreću se kroz elektrolit u smeru električnog polja, a negativni u suprotnom smeru. Po pristizanju jona na elektrode vrši se neutralizacija jona i izdvajanje supstance, koje je često praćeno sekundarnim hemijskim reakcijama. Ovaj proces naziva se elektroliza, i on ima veoma značajne primene u elektrohemiji.

Magnetni efekti su najznačajniji efekti električne struje. U okolini provodnika u kojima ima električne struje opažaju se sledeće pojave:

- feromagnetni predmeti i stalni magneti podvrgnuti su dejstvu mehaničkih sila (magnetna igla ima tendenciju da se postavi u određeni položaj);
- provodnik sa strujom, kada se nalazi u blizini drugog provodnika, podvrgnut je dejstvu mehaničkih sila (koje se nazivaju elektromagnetne sile);
- u provodniku koji se kreće u blizini drugog provodnika sa strujom indukuje se elektromotorna sila;
- ako je električna struja promenljiva u vremenu, u bliskim nepokretnim i pokretnim zatvorenim konturama indukuju se vremenski promenljive elektromotorne sile i struje.

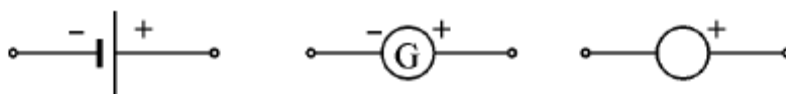
15.2 Šematsko predstavljanje električnih kola i njegovih elemenata.

Provodnici i vodovi koji povezuju pojedine elemente kola, koji su po pravilu dobri provodnici električne struje, označavaju se izvucenim linijama.

Termogeni prijemnici električne energije (ukoliko nije potrebno detaljnije naznačiti njihovu funkciju), kao i obični otpornici predstavljaju se u šemama jednim od sledećih tri simbola:



Električni izvori, odnosno generatori, prikazuju se takođe na više načina. Elektrohemijski izvori, primarni elementi i akumulatori, obeležavaju se sa dve paralelne crte i to jednom tanjom i dužom, koja označava pozitivan pol izvora, i drugom, krakom i debljom crtom, koja označava negativan pol.



Mašinski generatori jednosmerne struje u najopštijem slučaju obeležavaju se simbolom koji je prikazan na slici pod b). Ukoliko je potrebno naznačiti i neke specifičnosti ovih generatora

(npr. nacin pobude) upotrebljavaju se i složeniji graficki simboli. Ukoliko fizicka priroda generatora nije od znacaja, upotrebljava se simbol prikazan na slici pod c).

15.3 Jacina i smer elektricne struje

Najvažnija karakteristika elektricne struje svakako je jacina struje.

To je skalarna velicina koja se u opštem slucaju vremenski promenjive struje obeležava simbolom i , a u slucaju stalne jednosmerne (stacionarne) struje simbolom I .

Intenzitet struje definiše se odnosom protekle kolicine naelektrisanja i vremena za koje je ta kolicina protekla (kao što se intenzitet stacionarnog strujanja fluida definiše kao kolicnik protekle kolicine fluida kroz presek cevi i vremena za koje je ta kolicina protekla):

$$I = \frac{q}{t}.$$

U opštem slucaju, kada se struja menja u vremenu, njena jacina se definiše diferencijalnim kolicnikom: pri cemu se i se naziva trenutna vrednost struje.

$$i = \frac{dq}{dt},$$

Konvencijom je usvojeno da je fizicki smer elektricne struje suprotan smeru kretanja elektrona provodnosti kroz metalne provodnike. U elektrolitima, ovaj smer upravo odgovara kretanju pozitivnih jona.

U složenim elektricnim kolima cesto se unapred ne zna smer elektricne struje u pojedinim granama kola. Medutim, da bi se ovakva kola mogla analizirati, u pojedinim provodnicima (granama) kola unapred se proizvoljno usvaja referentni smer struje.

Jedinica elektricne struje je kulon u sekundi, odnosno amper, u cast francuskog fizicara (Andre Marie Ampere, 1775-1936), zacetnika elektrodinamike:

$$I \left[\frac{C}{s} = A \right]$$

Za merenje jacin elektricne struje upotrebljavaju se instrumenti koje nazivamo ampermetrima. U slucaju vrlo malih jacina stalne jednosmerne struje koristi se specijalna vrsta ampermetara, koji su vrlo osetljivi i nazivaju se galvanometrima. U elektricnim šemama ampermetar se oznacava kružicom i slovom A unutar kružica. krajevi ampermetra su obicno obeleženi sa + i -, a ampermetar se ukljucuje redno u kolo cija se struja meri, tako da fizicki smer struje bude upravljen ka pozitivnom prikljucku.

15.4 Gustina elektricne struje.

Da bi se preciznije opisalo strujno polje, uvodi se vektor gustine struje .

Kada je struja ravnomerno raspodeljena po površini popreznog preseka provodnika, intenzitet vektora definisan je odnosom:

$$J = \frac{I}{S}$$

gde je I jacina struje u provodniku, a S površina popreznog preseka.

U opštem slucaju, kada gustina struje nije homogena, intenzitet vektora definiše se kolicnikom: J

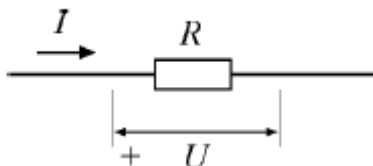
$$J = \frac{di}{dS_n}$$

gde je dS_n elementarna površina upravna na pravac kretanja pokretljivih opterećenja, a dI je jačina struje kroz ovu površinu.

16. OMOV ZAKON

Osnovna definicija Omovog zakona može se pisati u obliku:

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



U izrazu koji iskazuje Omov zakon podrazumeva se da struja ima fizički smer od kraja koji je na višem potencijalu ka kraju na nižem potencijalu. U ovom slučaju, kaže se da su referentni smerovi napona i struje usaglašeni. U opštem slučaju, jačini struje I se pridaje algebarsko značenje u odnosu na proizvoljno usvojeni referentni smer, koji se na šemi obeležava strelicom uz provodnik.

Električna otpornost definisana je količnikom napona i struje, a jedinica otpornosti, volt/amper, naziva se om, prema nemačkom fizicaru Omu (Georg Simon Ohm, 1789-1854), pronalazacu ovog zakona:

Otpornost od jednog oma ima onaj provodnik kod koga struja jačine jednog ampera stvara potencijalnu razliku između krajeva od jednog volta. Recipročna vrednost električne otpornosti naziva se električna provodnost, ona se označava sa G i njena jedinica je simens:

$$R \left[\frac{V}{A} = \Omega \right]$$

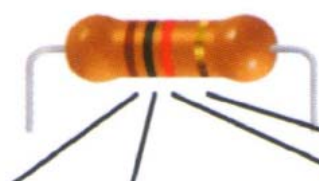
$$G \left[\frac{A}{V} = S \right]$$

Kada se provodnik održava na konstantnoj temperaturi, otpornost zavisi od oblika i deimanzija provodnika i od vrste materijala od koga je načinjen. Ako se radi od o žicanom provodniku konstantnog preseka i od homogenog materijala, otpornost je:

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

Koeficijent srazmernosti ρ , je fizička veličina koja zavisi od prirode provodnog materijala i naziva se specifična električna otpornost i ona ima dimenziju Ω (ili $\Omega m^2/m$).

Otpornici su elementi pomoću kojih namerno unosimo el. otpor u neko strujno kolo. Koriste se za ograničenje struje u kolu i za dobijanje željenog napona na krajevima otpornika. Otpornici su najčešće korišćene komponente u elektronskim uređajima. Većina otpornika u našim uređajima su grafitni, a proizvode se i žicani i metaloslojni otpornici. Veoma je nepraktično ispisivati brojcane i slovne oznake na male elemente kao što su otpornici (dimenzije oko 6 mm). Zbog toga se vrednost otpora označava pomoću obojenih prstenova gde boje zamenjuju cifre, prema donjoj tabeli :



Boja	1. prsten	2. prsten		Broj nula	Tolerancija
CRNA	0	0	0		
BRAON	1	1	1	0	± 1%
CRVENA	2	2	2	00	± 2%
NARANDŽASTA	3	3	3	000	
ŽUTA	4	4	4	0,000	
ZELENA	5	5	5	00,000	± 0.5%
PLAVA	6	6	6	000,000	± 0.25%
LJUBIČASTA	7	7	7	0,000,000	± 0.10%
SIVA	8	8	8		± 0.05%
BELA	9	9	9		
ZLATNA				: 10	± 5%
SREBRNA				: 100	± 10%
Boja	1. prsten	2. prsten	3. prsten	Broj nula	Tolerancija



Uglavnom su na otpornicima 4 prstena, i oni imaju sledeca znacenja :

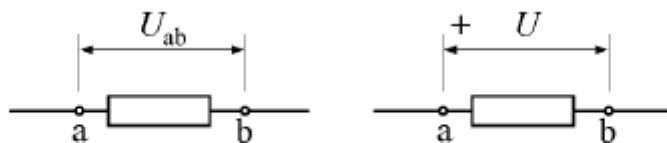
1. Prvi prsten -prva cifra
2. Drugi prsten -druga cifra
3. Treci prsten -broj nula (faktor množenja)
4. Cetvrti prsten -tolerancija, tj. dozvoljeno odstupanje od nazivne vrednosti

17 Napon, obeležavanje i merenje

Ako se posmatra element kola, na primer otpornik, ciji su krajevi obeleženi sa a i b, a potencijali ovih tacaka sa V_a i V_b . Napon između tacaka a i b po definiciji je:

$$U_{ab} = V_a - V_b .$$

Ovakav nacin obeležavanja napona naziva se dvoindeksni nacin i ima algebarsko znacenje. Ako je napon pozitivan, tacka koja odgovara prvom indeksu (a) je na višem potencijalu od tacke koja odgovara drugom indeksu (b) i za negativan napon suprotno.



Iako je pregledan, dvoindeksni način obeležavanja otežava pisanje jednačina, te je uveden i drugi način, prema kome se udvojeni indeksi izostavljaju, a uz jedan vrh strelice se stavlja indeks +. Ako je napon U pozitivan, kraj obeležen sa + je na višem potencijalu nego onaj neobeleženi.

Merenje napona zasniva se na Omovom zakonu. Najrasprostranjeniji tip voltmetra za merenje stacionarnih napona je galvanometar (osetljivi ampermetar) kome je na red vezan otpornik velike otpornosti. U električnim šemama se dodatni otpornik ne crta, već se ceo instrument obeležava kružicom i slovom V unutar kružica.

18. Džulov zakon.

Toplotni efekat proticanja struje kroz provodnik, tj. zagrevanje provodnika naziva se Džulov efekat. Ako se izolovani provodnik stavi u kalorimetar i meri količina toplote koja se oslobađa pri različitim jačinama stalne jednosmerne struje i pri drugim različitim okolnostima, Džul je ustanovio da je oslobođena toplotna energija srazmerna kvadratu jačine struje i vremenu. Koeficijent srazmernosti zavisi od geometrijskih dimenzija i vrste provodnika i upravo je jednak otpornosti R .

Ukupna razvijena toplota u provodniku otpornosti R , kroz koji protiče električna struja I i na čijim krajevima postoji napon U , na osnovu Džulovog zakona, jednaka je:

$$dW = U \cdot I \cdot dt = R \cdot I^2 dt = \frac{U^2}{R} dt$$

Deljenjem izraza sa dt , dobija se snaga Džulovih gubitaka:

$$P = U \cdot I.$$

Za linearan provodnik, koji ima otpornost R , važi Omov zakon, pa se izrazi za snagu mogu dati i u sledećim oblicima:

$$P = R \cdot I^2 \quad \text{i} \quad P = \frac{U^2}{R}.$$

Poslednji izrazi predstavljaju različite oblike Džulovog zakona. Snaga Džulovog efekta, kao i uopšte snaga u elektromagnetnim preobražajima energije, meri se jedinicom koja se zove vat, u čast engleskog inženjera i naučnika (James Watt, 1736-1819):

$$P \left[\frac{\text{J}}{\text{s}} = \text{W} \right].$$

19. ELEKTRICNI GENERATOR I ELEKTROMOTORNA SILA

Skup tela i sredina koji obrazuju zatvoren put električne struje predstavljaju električno kolo. Da bi se u kolu održala stacionarna električna struja, neophodno je da postoji mehanizam koji je u stanju da u jednom delu kola pomera pokretljiva opterećenja nasuprot silama stacionarnog električnog polja. Ovakav mehanizam poseduju električni izvori, odnosno generatori.

Bez obzira na njihovu fizičku prirodu i princip rada, u osnovi sve vrste električnih generatora imaju sposobnost da u određenom domenu svoje unutrašnjosti pomeraju pokretna naelektrisanja nasuprot silama stacionarnog električnog polja.

Ako se generator nalazi u zatvorenom strujnom kolu, u njemu se vrši rad protiv sila stacionarnog električnog polja, pri čemu se drugi vidovi energije (hemijska, toplotna i druge) ili rada (mehanicki) transformišu u energiju električnog polja koja se posredstvom polja prenosi u druge delove strujnog kola i tamo se pretvara u druge vidove energije ili rada.

U savladavanju sila stacionarnog polja i u energetske preobražajima koji se tom prilikom dešavaju, važnu ulogu igraju sile koje nisu "kulonskog" karaktera (ne potiču od polja električnih opterećenja), a nazivaju se stranim silama.

Pojmovi, kao što su strana sila i strano polje pogodni su za uopšteno objašnjenje električnih energetske procesa u električnim generatorima sa tačke gledišta teorije polja. Međutim, u elektrotehnici se češće upotrebljava druga veličina, koja na adekvatniji način predstavlja električni generator kao element električnih kola i kvantitativno karakteriše njegovu sposobnost da održava struju u kolu i da vrši

konverziju drugih vidova energije u električnu. Ta veličina naziva se elektromotorna sila, ili skraćeno **ems**, a obeležava se simbolom E .

Elektromotorna sila nekog generatora definiše se kao količnik rada, dA , koji vrši generator kada kroz njega protekne količina naelektrisanja dq , i samog tog naelektrisanja:

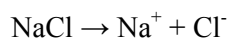
$$E = \frac{dA}{dq},$$

i predstavlja usmerenu skalarnu veličinu.

Smer elektromotorne sile orijentisan je kroz generator od negativnog ka pozitivnom priključku, što odgovara smeru stranog polja u generatoru. Elektromotorna sila je po veličini jednaka potencijalnoj razlici između pozitivnog i negativnog priključka generatora, kada je ovaj u praznom hodu. Prema tome, merenjem potencijalne razlike (napon) između priključaka generatora kada je ovaj otvoren, moguće je odrediti elektromotornu silu generatora. Za predstavljanje generatora elektromotorne sile najčešće se upotrebljavaju grafički simboli gore prikazani):

20. ELEKTROLITIČKA DISOCIJACIJA

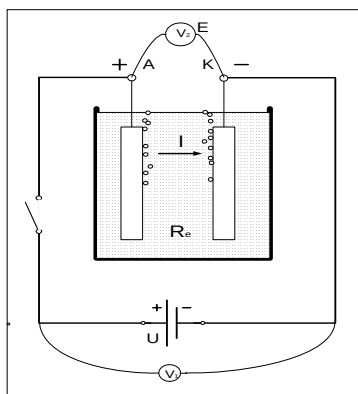
Elektrolitička disocijacija je razlaganje hemijskih jedinjenja na jone pod uticajem molekula rastvarača, npr.



Disocijacija je posledica solvatacije kod polarnih rastvarača (npr: voda) u kojem polarni molekuli rastvarača okružuju rastvorak. U tom procesu dolazi do neutralisanja elektrostatike privlačne sile među jonima rastvorka te se oni, solvatisani, udaljuju jedni od drugih, dakle postaju slobodni joni. Važno je uočiti da polarno rastvarač ne stvara jone već ih samo oslobađa iz kristala.

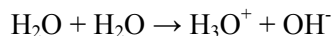
Zbog toga sposobnost disocijacije imaju jonska ili veoma jaka polarna kovalentna jedinjenja. Disosovani rastvor hemijskog jedinjenja naziva se elektrolit.

Disocijacija je povratna reakcija - ako se uklone molekuli polarnog rastvarača (uparavanje ili razblaživanjem manje polarnim rastvaračem dolazi do stvaranja neutralnih molekula koji mogu biti manje ili više rastvorni. Isto, dodatak jačeg elektrolita, koji ima zajednički jon sa slabijim, suzbija se disocijacija slabijeg.



Elektrolitičkoj disocijaciji u vodi su podložne sve rastvorljive soli, većina kiselina i baza. No, ne moraju sve da disosuju u istom stepenu. Na primer, sirćetna kiselina je rastvorna u vodi ali disosuje vrlo slabo u odnosu na sumpornu kiselinu.

Stepen disocijacije je merilo disocijacije jonskog jedinjenja i predstavlja odnos broja disosovanih prema ukupnom broju molekula. Mnogo važniji koncept je konstanta disocijacije. Mnoga hemijska jedinjenja podležu disocijaciji sama od sebe. Npr. voda autodisosuje po šemi:



Stepen disocijacije ove reakcije u normalnim uslovima iznosi oko 10^{-7} , što označava da na svakih 10^7 (10 000 000) molekula vode samo jedan podleže disocijaciji sam od sebe. Konstanta disocijacije vode je 10^{-14} i predstavlja osnovu za stvaranje pH skale. PH dolazi od latinskih reči poentia hydrogenum, koje znači aktivnost vodonika i defenisana je kao negativni logoritam koncetracije H^+ jona. Elektrolitičku disocijaciju ne treba mešati sa elektrolizom. Elektrolitička disocijacija može da se odigra u nekoliko stepena u zavisnosti od kompleksnosti molekula koji se disocira.

"

Industrijske primene

1. Industrijska proizvodnja aluminijuma, litijuma, natrijuma, kalijuma, aspirina.
2. Industrijska proizvodnja vodonika za automobile.
3. Elektroliza na visokoj temperaturi se takođe koristi u te svrhe.
4. Industrijska proizvodnja hlora i natrijum hidroksida.
5. Industrijska proizvodnja kalijum hlorida.

Elektroliza ima više primena:

1. Elektrometalurgija je proces redukcije metala od drugih jedinjenja da bi se dobio čist metal. Na primer: Natrijum Hidroksid se u ovoj formi deli pomoću elektrolize na natrijum i vodonik od kojih oba imaju važnu primenu.
2. Električna rafinacija se koristi da se metal očisti od nepoželjnih primesa elektrolizom. Kao na primer u jedinjenju bakra i nekih primesa. Pri elektrolizi bakar se formira oko katode a nečistoće oko anode.
3. Elektrolizovana voda je jedna od naj čistijih voda koja se koristi u zdravstvu i stomatologiji.
4. Disanje u svemiru je još jedna primena elektrolize. Kiseonik koji astronauti udišu se stvara elektrolizom vode, pomoću sunčeve svetlosti, energije.
- 5.

21. Razlika provođenja struja u elektrolitima i metalima

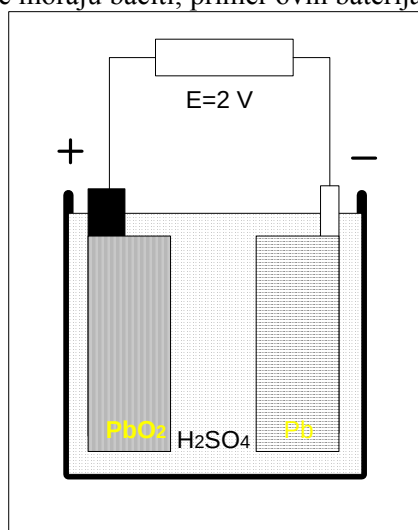
- U elektrolitima se kreću čitave grupe atoma, u metalima – samo elektroni
- Joni zbog svoje kompleksnosti se kreću znatno sporije nego elektroni (intezitet struje slabiji)
- U elektrolitima se joni kreću dvosmerno- elektroni se kreću jednosmerno.

- $J = N + e + v + + N - e - v -$ Jonska struja

22. Akumulatori

Akumulator je elektrohemijski izvor energije koji oslobađa električnu energiju na kontrolisan način Sve vrste akumulatora sadrže pozitivne i negativne ploče koje su uronjene u elektrolit unutar kutije. Svi akumulatori Fabrike akumulatora Sombor su olovo-kiselinski, što znači da su pozitivne i negativne ploče napravljene od olovnih jedinjenja koje se nalaze u elektrolitu od razblažene sumporne kiseline.

Olovno-kiselinski akumulatori spadaju u grupu sekundarnih baterija, što znači da se nakon pražnjenja mogu ponovo napuniti. Primarne baterije se mogu prazniti samo jedanput, nakon čega se moraju baciti; primer ovih baterija su baterije za ručne lampe i radio.



Pozitivna ploča je napravljena od olovo-dioksida, a negativna ploča od sunderastog olova. Kada se na akumulator priključi električni potrošač (na primer svetla ili starterski motor) kroz elektrolit u akumulatoru će poteći struja koja će napajati potrošača. Ovo će dovesti do hemijske reakcije unutar akumulatora, pri čemu će se na obe ploče formirati olovo sulfat tj. doći će do pražnjenja akumulatora. Akumulator se može napuniti dovođenjem struje sa spoljnog izvora napajanja kao što je alternator, dinamo ili jedinica za punjenje. Priključivanjem spoljašnjeg izvora napajanja dolazi do stvaranja olovnog sulfata u polazne materijale, tj. u olovo dioksid i sunderasto olovo. Kako se akumulator puni, elektricitet počinje da vrši dekompoziciju (hidrolizu) vode unutar elektrolita na njene sastavne elemente vodonik i kiseonik, koji se oslobađaju kao gas. To je uzrok gasiranja akumulatora tokom punjenja. Kada se akumulator prazni, električno aktivan materijal sa pozitivnih ploča u kombinaciji sa sulfatima iz sumporne kiseline formira elektrosulfatne soli (kristalno stanje). Kada se akumulator puni, elektrosulfatne soli se vraćaju u elektrolit (tečno stanje) i ciklus se ponavlja, dok se ne pojavi problem. Ukupno 75% "starterskih", "snažnih", "pomoćnih", "industrijskih", "brodskih" i svih drugih akumulatora strada, zbog stvaranja okorelih sulfatnih naslaga na olovnim pločama, dok 25% akumulatora strada zbog mehaničkih oštećenja. Prvi, i najčešći razlog stradanja akumulatora, je stvaranje nenormalnih količinama okorelih sulfatnih naslaga na olovnim pločama. Sumporna kiselina ne može da uđe u pore olovni ploča, i akumulator počinje da odumire. Proces sulfatizacije je normalna pojava u olovnim akumulatorima, pa prilikom faze pražnjenja neki kristali ostaju na olovnim pločama, sve dok ih normalno punjenje ne vrati u elektrolit. Ostalih 25% akumulatora, strada zbog mehaničkih oštećenja (kratkog spoja, ili razdvajanja spoja između ploča, itd...)

23. STRUKTURA AKUMULATORA

REŠETKE - Rešetka napravljena od olovne legure daje mehaničku čvrstinu aktivnom materijalu; čisto olovo je suviše mekano. Osim mehaničke potpore aktivnom materijalu, rešetke služe i za provođenje struje kada se na akumulator priključi potrošač.

AKTIVNI MATERIJAL - Aktivni materijal se pravi od mešavine olovnog oksida i olovnog sulfata, koja se prilikom inicijalnog punjenja pretvara u olovo dioksid na pozitivnoj ploči, tj. sunderasto olovo na negativnoj ploči. Negativni materijal sadrži i male količine aditiva koji daju akumulatoru male performanse praznjenja na niskim temperaturama. Rešetka sa aktivnim materijalom se naziva ploča.

ELEKTROLIT - Elektrolit je razblažena sumporna kiselina. Ona služi kao provodnik za električne jone između pozitivne i negativne ploče kada se akumulator puni ili prazni. Kiselina učestvuje i u reakciji praznjenja jer sulfatni joni hemijski reaguju sa aktivnim materijalom i stvara se olovo sulfat.

SEPARATOR - Separator je izolator koji se stavlja između pozitivne i negativne ploče i sprečava kratak spoj između njih. Separator mora biti mikroporozan da bi joni koji teku sa jedne na drugu ploču mogli da prođu kroz separator. On može biti otporan na visoke temperature i na uslove jako kiselinske oksidacije koja se javlja u akumulatoru. Većina modernih separatora se pravi od mikroporoznog polietilena koji poseduje odgovarajuće karakteristike za primenu u akumulatoru.

KUTIJA I POKLOPAC - Prave se od polipropilena koji je laka ali jaka plastika. Za razliku od druge plastike polipropilen nije krt na hladnom, tako da je otporan na udare tokom rukovanja, otporan je na kiselinu i može da podnese razne reagense (benzin, dizel, kočiono ulje, antifriz) koji se uobičajeno mogu naći na vozilu.

23.1 KVALITET AKUMULATORA I KAPACITET

Dve su velicine bitne za akumulator, napon i kapacitet. Napon je određen izborom materijala od koga su ploce napravljene (kod olovnih akumulatora to je olovo i olovni dioksid) i elektrolita (kod olovnih akumulatora razredjena sumporna kiselina). Kapacitet zavisi od površine i broja ploca. Kod izbora akumulatora vodi se racuna o dve stvari. Prva je ta da akumulator mora u slucaju kvara na sistemu za punjenje (alternator), osigurati funkcionisanje vozila 8 sati danju ili 4 sata nocu. Druga stvar o kojoj treba voditi racuna je maksimalna struja koju ce povuci starter motora prilikom pokretanja motora, ona ne sme biti veka od 1/2 maksimalno dopustene struje koja je oznacena na samom akumulatoru.

Praznjenje akumulatora dopusteno do 10,8V. Praznjenje ispod 10,8V je stetno i trajno upropastava akumulator (ispod 10,8V proces punjenje-praznjenje nije reverzibilan i na ploce se izdvaja tesko topivi sulfat). Ako se ipak desi da radi kvara na vozilu dodje do prepraznjavanja akumulatora u tom slucaju treba ga sto pre napuniti na ispravljacu izvan vozila. Da li je akumulator prazan možemo utvrditi merenjem napona i gustoce elektrolita. Napon kao sto je receno ne sme biti ispod 10,8V. Gustoca elektrolita tokom praznjenja se menja tako da merenjem gustoce elektrolita mozemo utvrditi koliko je akumulator pun. Kod punog akumulatora gustoca elektrolita je 1,28g/ccm a kod praznog 1,1g/ccm

Količina elektriciteta koju pri nominalnoj struji možemo dobiti iz akumulatora.

•
$$Q = I t (Ah)$$

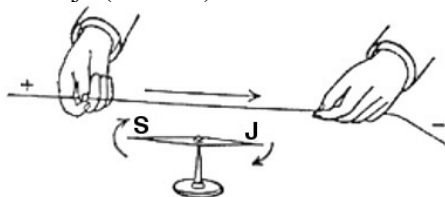
24. Elektromagnetizam

STACIONARNO MAGNETNO POLJE - ELEKTROMAGNETNA SILA I VEKTOR MAGNETNE INDUKCIJE

U okolini stalnih magneta i provodnika kroz koje protice električna struja opažaju se karakteristične, zajedničke, pojave:

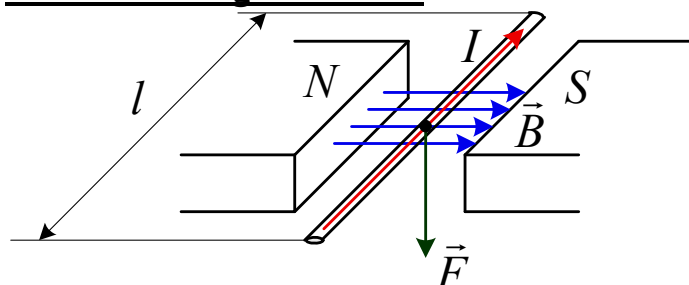
1. Magnetna igla teži da se postavi u određeni položaj, a gvozdeni i uopšte feromagnetni predmeti i stalni magneti su podvrgnuti dejstvu mehaničkih sila;
2. Provodnik kroz koji protice električna struja biva podvrgnut dejstvu mehaničkih sila, koje nazivamo elektromagnetskim silama;
3. U provodnicima koji se relativno kreću u odnosu na stalne magnete ili strujna kola indukuju se elektromotorne sile.

Magnetno polje predstavlja posebno stanje materijalne sredine u okolini provodnika sa strujom odnosno magneta koje se manifestuje dejstvom magnetne sile na provodnik sa strujom koji se unese u prostor tog polja. Drugim rečima, kada se u provodniku koji se nalazi u stranom magnetnom polju, uspostavi stacionarna električna struja, nanjega deluju mehaničke sile koje teže da ga pokrenu i deformišu. (vidljiva manifestacija magnetnog polja od fundamentalnog značaja za rad svihobrtne električnih mašina). Sile koje se javljaju u pojavama ovakve vrste nazivaju se elektromagnetnim silama F , jer su rezultat uzajamnog delovanja električne struje i magnetnog polja. Opšte je poznato i da se magnetno polje posmatra kao jedan od proticanja električne struje (Oersted).



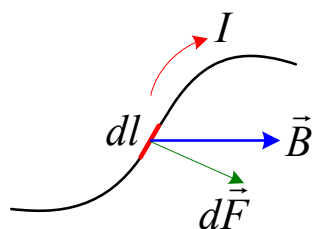
Elektricitet zajedno sa magnetizmom predstavlja u fizici više oblike kretanja materije. Magnetno polje generiše kretanje naelektrisanja bilo da se radi o rotacionom, spinskom ili translacionom kretanju, pa prema tome magnetne pojave su pojave naelektrisanja u kretanju. Glavna fizička veličina preko koje se karakteriše magnetno polje jeste indukcija magnetnog polja. To je vektorska veličina koja se obeležava sa $\vec{B}$ i zove se Vektor Magnetne Indukcije

25. Elektromagnetna sila



$$F = IlB \sin(\vec{l}, \vec{B})$$

$$\vec{F} = \int_l d\vec{F} = I \int_l d\vec{l} \times \vec{B}$$



$$\vec{F} = I \vec{B} \times \vec{l}$$

gde je

F = sila (njutn)

B = magnetno polje (tesla)

l = dužina segmenta provodnika za koji se računa sila (metar)

I = struja u žici (amper)

U jednačini iznad, vektor struje I je vektor sa intenzitetom jednakim skalarnoj struji, i , i pravcem i smerom koji se poklapa sa provodnikom i smerom u kom struja teče kroz provodnik.

26. Lorencova sila

Lorencova sila je kombinacija sila kojima elektromagnetno polje deluje na naelektrisanu česticu u pokretu. Ima dve komponente, električnu koja je proporcionalna električnom polju,

$\vec{E}$ i naelektrisanju čestice q , i magnetnu, koja pored naelektrisanja čestice i magnetne indukcije polja, $\vec{B}$, zavisi još i od brzine čestice, $\vec{v}$. Zbog vektorskog karaktera sila i polja Lorencova sila se najlakše izražava vektorskom Lorencovom jednačinom:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

gde je

F sila u njutnima

E električno polje u voltima po metru

B magnetno polje (ili tačnije magnetna indukcija) u veberima po kvadratnom metru ili ekvivalentno u teslama

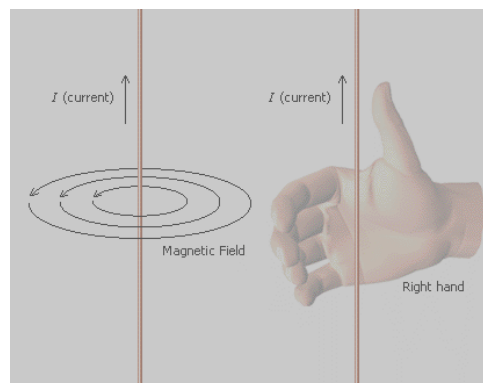
q naelektrisanje čestice u kulonima

v trenutna brzina čestice u metrima po sekundi

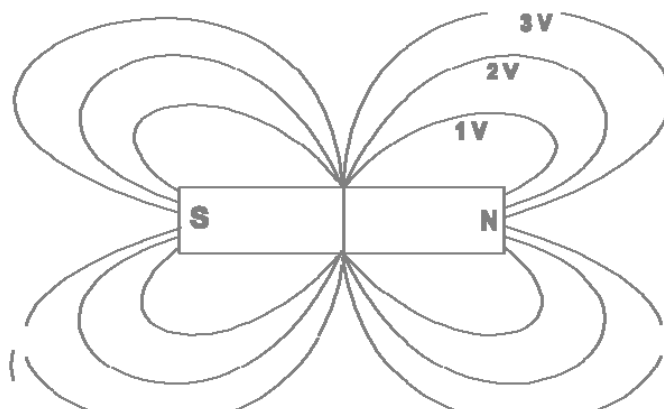
Stoga pozitivno naelektrisana čestica je ubrzana u istom smeru u kojem deluje i E polje, ali skreće pod pravim uglom u odnosu na polje B u skladu sa pravilom desne ruke.

Treba uočiti da magnetna komponenta sile deluje normalno na pravac kretanja čestice,

Pravilo desne ruke: Palac desne ruke postavljamo u pravcu proticanja struje u provodniku, dok vrhovi prstiju desne ruke određuju smer vektora magnetne indukcije.

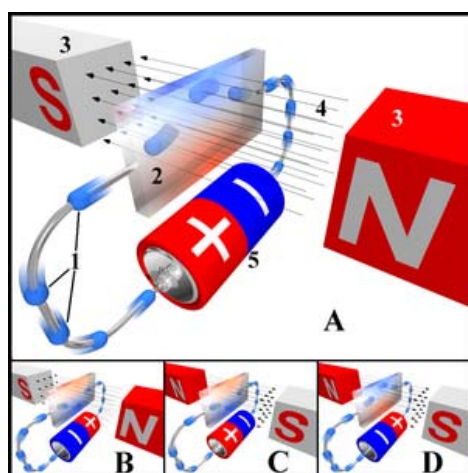


Vektor Magnetne indukcije je vektor čiji je smer određen smerom linija magnetnog polja, a iznos gustinom linija magnetnih polja. (tj. što su linije magnetnog polja na u posmatranoj tački bliže jedna drugoj, njihova gustina na tom mestu je veća a time je i intezitet vektora magnetne indukcije B je veći). Vektor magnetne indukcije je u svakoj tački tangenta na linije magnetnog polja. Smer delovanja magnetske indukcije upravo nam pokazuju nam linije magnetnog polja. One izvan magneta teku od severnog pola prema južnom, a zatim se zatvaraju u samom magnetu (zatvaraju se kroz materijalnu sredinu).



Da bi se u nekoj tački odredio smer magnetne indukcije, povlacimo tangentu u toj tački na liniju elektricnog polja. Tangenta će biti duža ako je u tom području veća gustina magnetnih linija.)

27. Holov efekat



1. Elektroni (a ne standardni nosioci naelektrisanja)
2. Holov element ili Holov senzor
3. Magneti
4. Magnetno polje
5. Izvor napajanja

Holov efekat se javlja usled sila koje deluju unutar provodnika izloženog magnetnom polju. Kada se provodnik unese u spoljašnje magnetno polje, indukcije V , tada na slobodne nosioce naelektrisanja deluje tzv. **Lorencova sila**.

Hall je u ovom eksperimentu koristio trakasti provodnik, kako bi praktično realizovao pretpostavku isključivo ravanskog kretanja naelektrisanja unutar polja, odnosno kretanja koje je potpuno upravno na pravac vektora magnetne indukcije. Ova pretpostavka olakšava izračunavanje Lorencove sile i istovremeno rezultate eksperimenta čini jasnijim i očiglednijim. Tako se, usled ravanske geometrije provodnika, tok elektrona smatra približno jednoslojnim a njihovo kretanje unutar tog jednog sloja provodnika isključivo u (vidi sliku) „horizontalnom“ i „vertikalnom“ pravcu.

27.1 Matematička interpretacija Holovog eksperimenta

Kada se ovakav ravanski provodnik unese u magnetno polje indukcije B tada na slobodne nosioce naelektrisanja koji se kreću unutar provodnika počinje da deluje Lorencova sila. Smer i pravac dejstva Lorencove sile određen je sledećim vektorskim proizvodom :

$$\vec{F}_{Lorenc} = Q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

gde je F - vektor Lorencove sile, Q - količina naelektrisanja koja se nalazi pod dejstvom magnetnog polja, v - vektor brzine nosioca naelektrisanja, B - vektor magnetne indukcije spoljašnjeg polja.

Iz formule se vidi da intenzitet i naročito pravac vektora Lorencove sile zavisi od pravca i smera dva vektora: brzine naelektrisanja i magnetne indukcije. Taj pravac će biti, usled osobina vektorskog proizvoda, upravan na vektore B i v , odnosno prostiraće se u ravni provodnika i to u vertikalnom pravcu. Smer Lorencove sile će za naelektrisanja suprotnog polariteta biti suprotan tako da će, prema slici, za negativne nosioce biti usmeren naviše a za pozitivne naniže. Dakle, usled dejstva Lorencove sile pojaviće se, pored linijskog-horizontalnog kretanja naelektrisanja u pravcu provodnika i bočno-vertikalno kretanje. Tako će se negativni nosioci nagomilavati uz gornju ivicu provodnika a pozitivni nosioci uz donju ivicu provodnika. Usled nagomilavanja naelektrisanja suprotnog znaka, doći će do pojave električnog polja unutar trakastog elementa, čija je apsolutna vrednost:

$$|U_{neg} - U_{poz}| = E_{hd}$$

gde su V_{neg} i V_{poz} - potencijali krajeva trakastog elementa sa negativnim i pozitivnim naelektrisanjem, E_H - Holov napon, v - brzina naelektrisanih čestica, B - intenzitet magnetne indukcije spoljašnjeg magnetnog polja i d - širina trakastog elementa.

Nagomilavanje naelektrisanja će dovesti do porasta razlike potencijala i intenziteta električnog polja na suprotnim ivicama trakastog provodnika koje će trajati do trenutka kada intenzitet polja dostigne intenzitet Lorencove sile. U tom trenutku će se uspostaviti dinamička ravnoteža koja se modelira sledećom jednačinom:

$$E_H d = v B d$$

Gustina struje u trakastom elementu se može izračunati pomoću sledeće formule:

$$J = N Q v$$

gde je J - gustina struje naelektrisanja, Q - količina naelektrisanja, N - koncentracija slobodnih nosioca naelektrisanja i v - brzina naelektrisanih čestica.

Ako iz prethodne jednačine izrazimo brzinu naelektrisanih čestica i zamenimo je u formulu jednakosti Holovog napona i razlike potencijala, dobićemo izraz:

$$|U_{neg} - U_{poz}| = \frac{JdB}{NQ}$$

gde je N - koncentracija slobodnih nosioca naelektrisanja.

Jedina mana Holove teorije je u tome što se teže primenjuje na metale koji su viševalentni, tj. imaju više od jednog valentnog elektrona. Problem tačnog određivanja veličine N jeste jedina poteškoća u praktičnoj primeni Holovog efekta. Ako *pretpostavimo* da je metalni provodnik jednovalentan tada se N može izračunati pomoću sledeće formule:

$$N = \frac{\rho_m N_A}{M}$$

gde je N - koncentracija slobodnih nosioca naelektrisanja, N_A - Avogadrov broj, ρ - gustina mase materijala i M - atomska masa materijala.

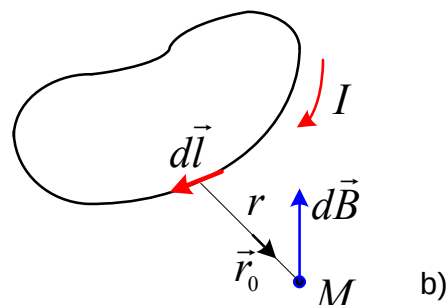
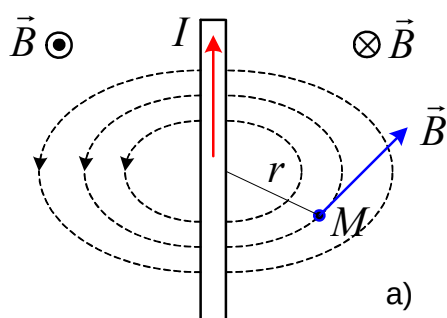
U tom slučaju je moguće odgovarajućim instrumentima izmeriti razliku potencijala $V_{neg} - V_{poz}$, gustinu struje i širinu trakastog elementa, kao i količinu naelektrisanja tako da kao jedina nepoznata veličina preostaje intenzitet vektora magnetne indukcije B te se ova metoda na ovaj način efikasno primenjuje u merenjima magnetne indukcije. Senzori koji koriste Holov efekat se zato zovu Holovi senzori.

Pored direktnih merenja indukcije magnetnog polja Holovi senzori se koriste i u indirektnim merenjima protoka i pritiska fluida ili snage električnih potrošača. Tako se, pored Holovog napona koji je prethodno opisan, u indirektnim merenjima naročito koristi još jedna izvedena veličina koja takođe nosi ime ovog naučnika. Naime, količnik Holovog napona i izmerene količine struje se naziva *Holova otpornost*.

$$R_H = \frac{E_H}{I}$$

U feromagnetnim materijalima (ali i paramagnetnim materijalima unetim u spoljašnje magnetno polje) Holova otpornost sadrži i dodatnu komponentu koja je poznatija kao *Anomalija Holovog efekta* (ili *Poseban Holov efekat*) koji direktno zavisi od stepena magnetizacije materijala i često je daleko većeg intenziteta od standardnog Holovog efekta (napominjemo da ovaj efekat nije povezan sa doprinosom koji magnetizacija ima na spoljašnje polje, kako bi se moglo pretpostviti). Iako je pojava Posebnog Holovog efekta zapažena, još uvek ne postoji saglasnost o poreklu ovog efekta koji se javlja u različitim materijalima. Poseban Holov efekat može biti ili spoljašnjeg porekla (potiče od neuređenosti) usled rasejanja nosioca naelektrisanja koje je zavisno od svojstva spina, ili unutrašnjeg porekla usled efekta Berijeve faze u prostoru momenta kristala (k -prostor).

28. Biot Savarov Zakon



$$B = k \frac{I}{r}$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

$$\vec{B} = \int_C d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_C \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}_0}{r^2}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}$$

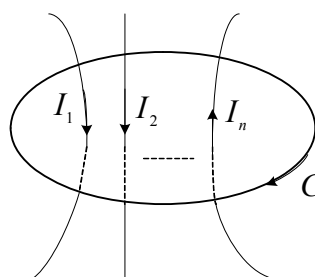
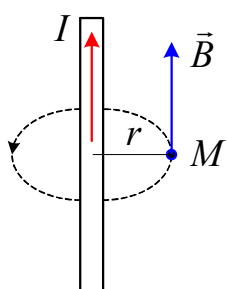
- magnetna permeabilnost vakuumu

29. AMPEROV ZAKON

$\oint_C \vec{B} d\vec{l}$ - cirkulacija vektora magnetne indukcije duž zatvorene konture

$$\oint_C \vec{B} d\vec{l} = B \cdot 2r\pi = \frac{\mu_0 I}{2r\pi} 2r\pi = \mu_0 I$$

$$\oint_C \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum_{k=1}^n I$$



Cirkulacija vektora magnetne indukcije duž proizvoljne zatvorene konture C u vakuumu jednaka je proizvodu magnetne permeabilnosti vakuumu i algebarskog zbira struja obuhvaćenih tom konturom.

30. MAGNETNI FLUKS

Magnetni fluks, koji se predstavlja grčkim slovom Φ (fi), je jedinica za opisivanje jačine i opsega magnetnog polja. SI jedinica za magnetni fluks je Wb (veber), ili V s (volt sekunda)

preko osnovnih veličina, dok je jedinica koja opisuje indukciju magnetnog polja Wb/m^2 ili T (tesla).

Magnetni fluks kroz element normalan u odnosu na smer magnetne indukcije (ili magnetnog polja) je proizvod vrednosti magnetne indukcije i elementarne površine. Uopšte, magnetni fluks je definisan skalarnim proizvodom vektora magnetne indukcije i vektora elementarne površine. Gausov zakon magnetizma, jedan od četiri Maksvelove jednačine, govori da je magnetni fluks kroz zatvorenu konturu jednaka nuli. Ovaj zakon je posledica toga što se magnetni dipol ne može rastaviti na elementarne polove, severni i južni pol.

Magnetni fluks se definiše kao integral magnetne indukcije kroz neku površinu:

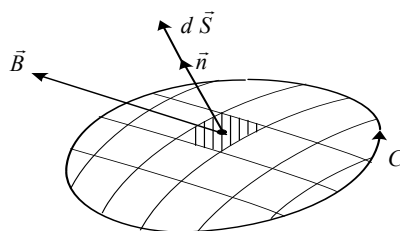
$$\Phi_m = \iint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S}$$

gde je

Φ_m magnetni fluks

$\mathbf{B}$ je magnetna indukcija

$\mathbf{S}$ je površina.



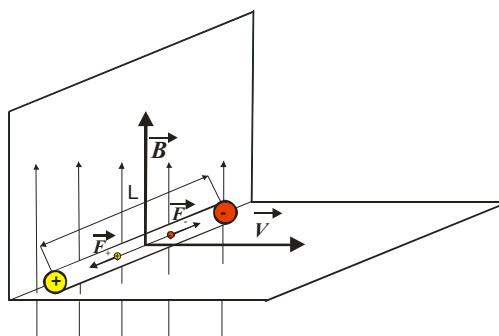
$$\phi = \vec{B}\vec{S} = BS \cos(\vec{B}, \vec{S}) = BS$$

Promena magnetnog fluksa kroz navojak provodnika će indukovati elektromotornu silu, a time i električnu struju kroz navojak (ako je strujno kolo zatvoreno). Ova jednačina je data Faradejevim zakonom elektromagnetne indukcije:

$$\mathcal{E} = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -\frac{d\Phi_m}{dt}.$$

Indukovana elektromotorna sila u zatvorenoj konturi srazmerna je izvodu fluksa po vremenu, tj. brzini promene fluksa kroz tu konturu.

31. Faradejev zakon elektromagnetne indukcije



Kada se provodnik kreće u magnetom polju imamo situaciju da zajedno sa njim se kreću i naelektrisanje čestice koje nisu ništa drugo do sastavni deo njegove strukture. Lorencova sila vrši razdvajanje ovih naelektrisanja u skladu sa svojom prirodom i nagomilava ih na krajevima provodnika. S obzirom na postojanje + i – naelektrisanja, jasno je da će pod dejstvom Lorencove sile na jednom kraju provodnika, da se nagomila pozitivno a na drugom kraju negativno naelektrisanje, odnosno da će između krajeva provodnika da se javi razlika potencijala odnosno EMS. Istovremeno sa povećanjem koncentracije naelektrisanja na krajevima raste i intenzitet električnog polja u provodniku. Intenzitet električnog polja manifestuje se preko Kulonove sile. U trenutku kada se intenzitet Kulonove sile izjednači sa Lorencovom silom proces razdvajanja naelektrisanja u provodniku prestaje.

Odnosno:

Kulonova sila
 Lorencova sila

$$\begin{aligned} Fe &= Fl \\ Fe &= qE \\ Fl &= qvB \\ qE &= qvB \\ E &= vB \end{aligned}$$

Po definiciji EMS je jednaka:

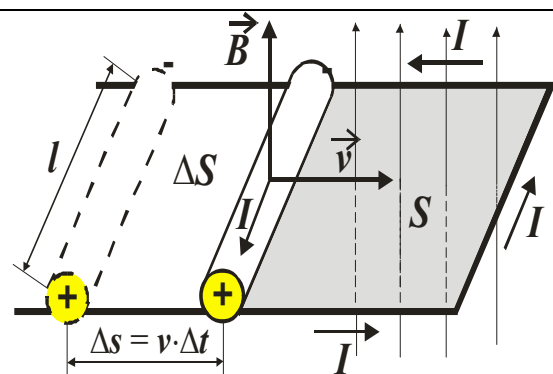
$$\varepsilon = \frac{A_{st}}{q} = \frac{F_l \cdot l}{q} = \frac{-F_e l}{q} = \frac{-q E l}{q} = -E l$$

Odnosno zamenom gore dobijenih vrednosti za E dobijamo:

$$\varepsilon = -vBl$$

Indukovana EMS jednaka je proizvodu brzine kretanja provodnika u njegove duzine l i inteziteta magnetnog polja B u kome se kreće

Posmatrajmo sada zatvorenu provodni konturu sa pokretnom stranicom koja se kreće u polju magnetne indukcije B brzinom v normalnom na linije polja. Pri tom kretanju dolazi do promene površine S koju ta kontura ogranicava.



Za vreme Δt pokretna stranica provodnika se pomeri za

$$\Delta s = v \cdot \Delta t$$

Pri tome površina S se menja za

$$\Delta S = l \cdot v \cdot \Delta t$$

Promena fluksa do koje dolazi tom prilikom može se predstaviti kao

$$\Delta \Phi = B \cdot \Delta S$$

$$\Delta \Phi = B \cdot l \cdot v \cdot \Delta t$$

Deleći poslednji izraz sa Δt dolazimo do izraza za ε

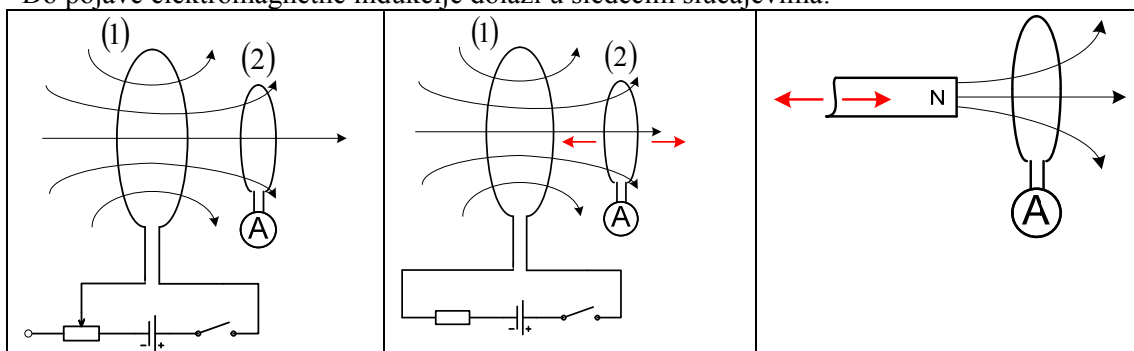
$$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{Blv \Delta t}{\Delta t} \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -\varepsilon$$

Na ovome se zasniva princip rada električnog generatora.

ELEKTROMAGNETNA INDUKCIJA

Jedna od najvažnijih osobina vremenski promenljivih polja je **elektromagnetna indukcija**.

Do pojave elektromagnetne indukcije dolazi u sledećim slučajevima:

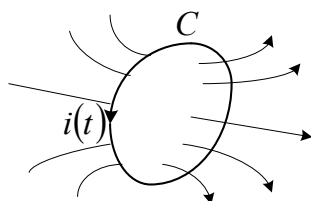


Ako je provodnik prav i kreće se konstantnom brzinom kroz homogeno polje:

$$e = (\vec{v} \times \vec{B}) \vec{l}$$

Smer indukovane ems određuje se po pravilu desne zavojnice u odnosu na smer obilaženja po konturi ili prema **Lencovom zakonu**: indukovana ems ima takav smer u kolu da svojim dejstvom teži da spreči uzrok svog nastajanja.

31.1 Koeficijenti induktivnosti i samoindukcije



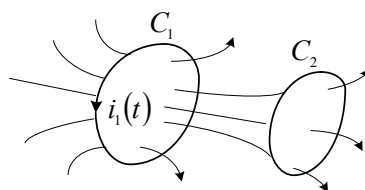
$$e_s = -\frac{d\phi}{dt}$$

$$\phi = Li$$

$$e_s = -L \frac{di}{dt}$$

$$L_u = \text{henri} = \text{H}$$

Koef. samoindukcije



$$\phi_{12} = L_{12} i_1 \quad e_{m12} = -\frac{d\phi_{12}}{dt} = -L_{12} \frac{di_1}{dt}$$

$$\phi_{21} = L_{21} i_2 \quad e_{m21} = -\frac{d\phi_{21}}{dt} = -L_{21} \frac{di_2}{dt}$$

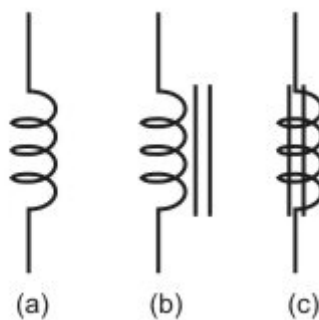
$$L_{12} = L_{21} = \frac{\phi_{12}}{i_1} = \frac{\phi_{21}}{i_2}$$

$$L_{12}, L_{21}$$

Koeficijenti medjusobne indukcije

3.1.2 Kalemovi

Uvek kad struja prolazi kroz povodnik javlja se magnetno polje. Ovo polje ima dve dimenzije silu (eng. force) i fluks (eng. flux). Sila i fluks se mogu uporediti sa naponom i strujom respektivno. Zavojnice (kalemovi, induktori) su komponente napravljene tako da se dobije mnogo jače elektromagnetno polje u odnosu na elektromagnetno polje od prave žice. Zavojnica ima dva kraja i napravljena je od provodnog materijala koji je namotan na jezgro. Za provodni materijal se obično uzima žica od bakra izolovana lakom. Jezgro može biti vazduh ili neki feromagnetni materijal (gvožđe, ferit,...). Simbol za zavojnice je



a) zavojnica na vazдушnom jezgru

b) i c) predstavljaju oznake za zavojnice na feromagnetnom jezgru

Zavojnica- kalem, ima osobinu da akumulira energiju u svom magnetnom polju. Mera za opisivanje zavojnice je induktivnost, a jedinica je henri H. Kada se propusti struja kroz namotaje generiše se magnetno polje. Mera magnetnog polja je fluks Φ . Ako je zavojnica linearna važi $\Phi = LI$, gde je L induktivnost a I jačina struje. Induktivnost zavojnice je data sa

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l}$$

gde su

L - induktivnost

N - ukupan broj zavojaka

μ - permeabilnost jezgra

A - površina jezgra u kvadratnim metrima

l - dužina zavojnice u metrima

U zavisnosti da li je struja propuštena kroz namotaj jednosmerna ili naizmenična, imamo statičko ili promenljivo elektromagneto polje. Jedno od svojstava zavojnica je i da ako se nađu u blizini promenljivog magnetnog polja, u njima se generiše naizmenična struja. Omov zakon ima primenu i za zavojnice ali u nešto izmenjenom obliku (samo za naizmenične struje)

$$v = L \frac{di}{dt}$$

gde su

v – napon na zavojnici

L – induktivnost zavojnice

i – struja kroz zavojnicu i t - vreme

Postoji primena zavojnica u tehnici i u elektrotehnici. U tehnici se koriste: za konvertovanje energije u pravolinijsko kretanje (elektromehaničke zavojnice) elektromotori dok u elektrotehnici imaju primenu kao

1. transformatori
2. filtri
3. prigušnice

32. KARAKTERISTIKE FEROMAGNETNIH MATERIJALA

Feromagnetni materijali (gvožđe (Fe), nikl (Ni), kobalt (Co) i njihove legure) imaju poseban značaj u elektrotehnici, uglavnom zbog svoje sposobnosti da obezbede veliku zapreminsku gustinu magnetne energije. Pored već istaknute njihove osobine , da im je magnetna propustljivost $\mu \gg \mu_0$, oni se odlikuju i zavisnošću magnetne propustljivosti ne samo od intenziteta vektora jačine magnetnog polja $\mu = \mu(H)$, nego i od ranijeg magnetnog stanja analiziranog uzorka feromagnetnog materijala.

Eksperimentalno se može pokazati da magnetna indukcija B, može primiti različite vrednosti i pri istim iznosima intenziteta jačine magnetnog polja H, ukoliko je način uspostavljanja magnetnog polja H, ili pak prethodno stanje analiziranog feromagnetnog materijala različito.

S tim u vezi očigledno postoji problem jednoznačnog određivanja promene magnetne propustljivosti

$$\mu = \mu(H)$$

Makroskopska velicina kojom se karakteriše stanje namagnecenosti je vektor gustine magnetnog momenta M, ili vektor magnetizacije.

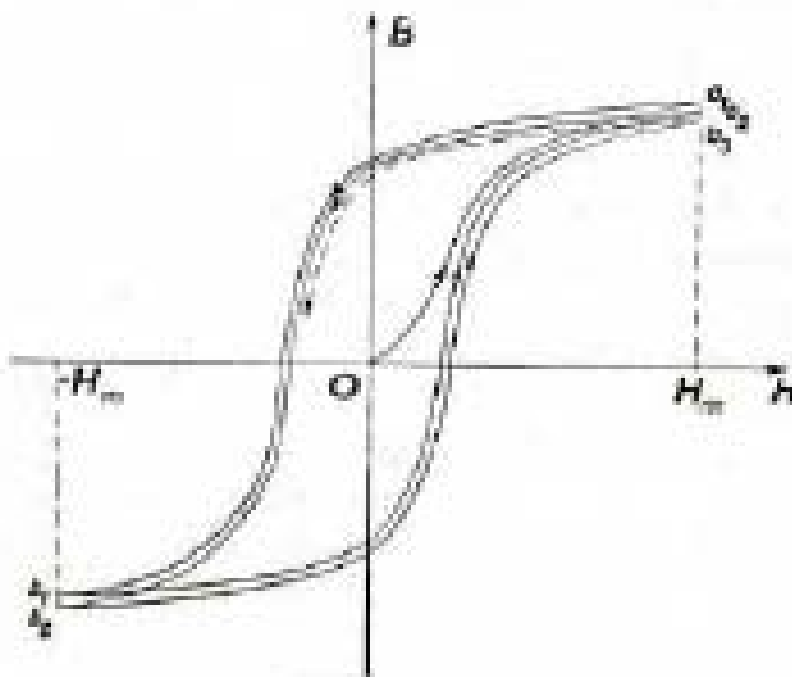
Analogno onome što je učinjeno prilikom proučavanja elektrostatičkih polja u dielektricima, uvodi se nov vektor magnetnog polja H.

$$\vec{H} = \left(\frac{\vec{B}}{\mu} - \vec{M} \right)$$

Vektor H se naziva jacina magnetnog polja ili magnetizaciono polje. Primenom ovog vektora, dobija se Amperov zakon u generalisanom integralnom obliku

$$\oint H dl = \sum I$$

Definiciona jednačina za magnetno polje može se napisati i kao $\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$



Razmotrimo sada karakteristiku magnećenja feromagnetika koji je prethodno potpuno razmagnetisan. Sa povećanjem jačine polja, počevši od nulte vrednosti, magnetna indukcija raste. Ovaj rast je brži do prevojne tacke na krivoj, a posle toga usporava i na kraju kriva se približava pravoj sa vrlo malim nagibom prema apscisnoj osi. Kada M dostigne vrednost zasícenja M_s , dalje povećanje B potice samo od člana $\mu_0 H$.

Kriva 0 – a1 važi za feromagnetik koji prethodno nije bio namagnetisan i naziva se prvobitna kriva magnećenja. Kada se posle dostizanja neke maksimalne vrednosli H_m jacina polja pocne smanjivati, smanjivace se i magnetna indukcija, ali ce njene vrednosti biti vece od odgovarajucih vrednosti na prvobitnoj krivoj magnećenja. Kada jacina polja postane jednaka nuli, magnetna indukcija ne išcezava vec zadržava izvesni intenzitet B_r , koji se naziva remanentna indukcija.

Pojava remanentne indukcije se objašnjava cinjenicom da se, po prestanku delovanja spoljašnjeg polja, svi elementarni magnetni dipoli ne vracaju u haotican poredak. Pri promeni smeru polja H i povećanju njegovog intenziteta magnetna indukcija opada, da bi kod određene vrednosti jacine polja H_c postala jednaka nuli. Jacina polja H_c naziva se koercitivno polje ili koercitivna sila. Ako polje H dostigne negativnu vrednost $-H_m$, koja je po apsolutnom iznosu jednaka maksimalnoj pozitivnoj vrednosti H_m , magnetna indukcija ce dostici svoju maksimalnu negativnu vrednost koja odgovara tacki b1. Pri promenama jacine polja od $-H_m$ ka H_m magnetna indukcija ce se menjati po krivoj b1 – a2. Tacka a2, koja odgovara maksimalnoj jacini polja H_m leži nešto ispod završne tacke a1, na prvobitnoj krivoj magnećenja. U ponovljenom ciklusu magnećenja kriva $B = B(H)$ bice predstavljena granama a2 – b2 i b2 – a3, koje leže nešto niže od odgovarajucih grana prethodnog ciklusa. Ponavljajuci ciklus magnećenja više puta, ove razlike postaju sve manje, tako da posle

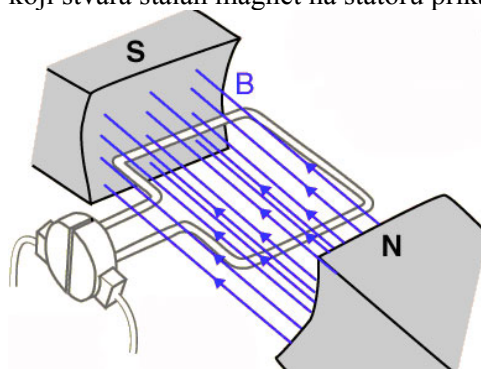
desetak ciklusa kriva magnecenja prelazi u zatvorenu simetricnu krivu, koja se naziva ciklus histerezisa.

33. PRINCIP RADA MOTORA JEDNOSMERNE STRUJE

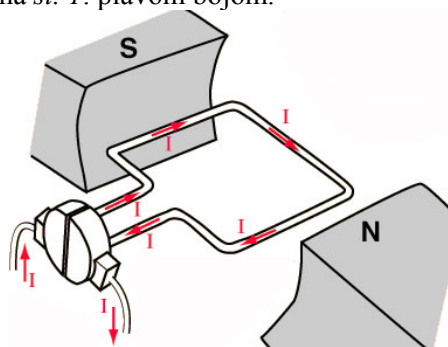
Princip rada jednosmernog motora se zasniva na dejstvu magnetne sile $\vec{F}$ na rotorski namotaj kroz koji protiče struja jačine I i koja se nalazi u magnetnom polju jačine $\vec{B}$ u kome elektromagneta sila stvara obrtno kretanje rotorskog namotaja i iznosi $\vec{F} = I \vec{B} \times \vec{l}$ gde je l dužina rotorskog namotaja normalnog na pravac vektora magnetne indukcije.

Jednosmerni motori spadaju u rotacione električne mašine kod kojih se vrši pretvaranje električne u mehaničku energiju rotacionog kretanja. Pripadaju dvopobudnim sistemima, jer imaju dva namota, statorski i rotorski.

Radi lakšeg objašnjenja i razumevanja principa rada jednomernog motora statorski namotaj je prikazan kao stalni magnet. U tom slučaju magnetno polje nastalo od strane statora (stalnog magneta) je konstantno. Kod jednosmernog motora sa pobudnim namotajem na statoru promenom struje kroz pobudni namotaj vektor magnetne indukcije je promenljiv i zavisi od jačine struje kroz pobudni namotaj. Vektor magnetne indukcije B (Magnetno polje statora) koji stvara stalan magnet na statoru prikazan je na *sl. 1.* plavom bojom.



Slika 1. Vektor magnetne indukcije B stalnog magneta na statoru



Slika 2. Struje kroz rotorski namotaj

Kada se na rotorski namotaj priključi na izvor napona kroz njega će se uspostaviti tok struje. Na *sl.2.* prikazan je tok struje kroz rotorski namotaj. Rotorski namotaj se preko komutatora napaja naponom.

Usled proticanja struje doći će do pojave magnetnog polja. Na osnovu Lorencovog (H. A. Lorentz) zakona, kada se provodna kontura kroz koju teče struja nađe u magnetnom polju, na nju deluje sila:

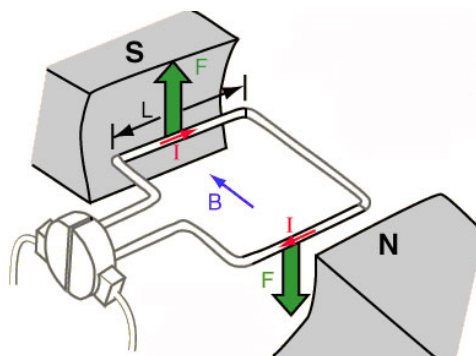
$$d\vec{F} = I \cdot d\vec{l} \times \vec{B}$$

$d\vec{F}$ - sila koja deluje na deo konture dužine $d\vec{l}$ kroz koju protiče struja I ,

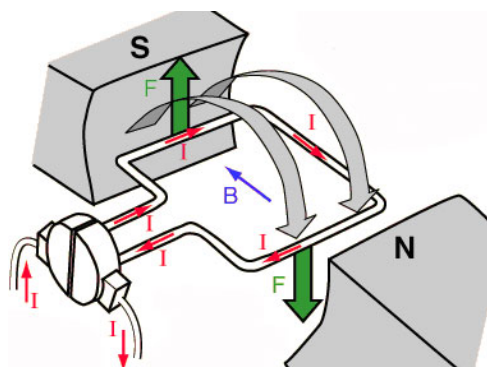
$d\vec{l}$ - vektor koji opisuje pravac i smer struje kroz konturu i

$\vec{B}$ - vektor magnetne indukcije polja u kom se kontura nalazi.

Na *sl.3.* je prikazan pravac i smer Lorencove sile F koja deluje na namotaj rotora.



Slika 3



Slika 4

Kao što se može primetiti na *sl. 3* vektor koji opisuje pravac i smer struje kroz konturu i vektor magnetne indukcije polja u kom se kontura nalazi su normalni jedan u odnosu na drugi iz čega proizilazi da u skalarnom obliku a sila F se može predstaviti kao što je već više puta pomenuto kao vektorski proizvod:

$$\vec{F} = I \vec{B} \times \vec{l}$$

Pod uticajem Lorencove sile dolazi do pokretanja (obrtanja) rotorskog namotaja u smeru prikazanom na *sl. 4*.

Smer obrtanja rotorskog namotaja prikazan je sivim strelicama na slici 4. Smer obrtanja rotorskog namotaja (smer Lorencove sile) dobija se iz vektorsko proizvod (videti formulu (f 1)). Drugi način za određivanje smera obrtanja je pravilom desne ruke. Ako kažiprst desne ruke pokazuje u pravcu i smeru struje kroz konturu a palac desne ruke pokazuje u pravcu i smeru vektora magnetne indukcije onda će srednji prst pokazivati pravac i smer sile koja deluje na konturu.

Opisivanje prostoperiodičnih veličina

Prostoperiodičnu veličinu određuju sledeći parametri:

- amplituda (efektivna vrednost),
- učestanost (kružna učestanost) i
- početna faza.

U kolima prostoperiodične struje sve veličine imaju istu frekvenciju, odnosno, svaka naizmenična prostoperiodična veličina opisana je sa dva parametra:

1. amplitudom (efektivnom vrednošću) i
2. početnom fazom.

Metode opisivanja naizmeničnih veličina:

- vremensko (trigonometrijsko),
- fazorsko (geometrijsko) i
- kompleksno (aritmetičko).

Vremensko opisivanje prostoperiodičnih veličina podrazumeva analitički prikaz trigonometrijskim funkcijama. Kao primer nedostatka primene ove metode u opštem slučaju može poslužiti sabiranje dve prostoperiodične struje (Kirhofovi zakoni):

$$i_1(t) = I_{1m} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_1)$$

$$i_2(t) = I_{2m} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_2)$$

$$i(t) = i_1(t) + i_2(t)$$

$$\begin{aligned} i(t) &= I_{1m} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_1) + I_{2m} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_2) = \\ &= I_{1m} [\sin \omega t \cos \varphi_1 + \cos \omega t \sin \varphi_1] + I_{2m} [\sin \omega t \cos \varphi_2 + \cos \omega t \sin \varphi_2] = \\ &= \sin \omega t \cdot [I_{1m} \cos \varphi_1 + I_{2m} \cos \varphi_2] + \cos \omega t \cdot [I_{1m} \sin \varphi_1 + I_{2m} \sin \varphi_2] \end{aligned}$$

Srednja i efektivna vrednost periodicnih velicina Efektivna vrednost prostoperiodicnog napona i struje je:

$$\boxed{\begin{aligned} U &= \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot U_m \\ I &= \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot I_m \end{aligned}}$$

Uobicajeno je da se naizmenicna struja opisuje strujom koja bi, da je jednosmerna, za vreme od jedne periode, prolazeci kroz neki termogeni otpor R, oslobodila istu kolicinu toplote kao i opisivana naizmenicna struja.

Električna impedansa

Električna impedansa, ili jednostavno **impedansa** jeste mera otpora sinusoidalnoj električnoj struji. Koncept električne impedanse omogućava primenu omovog zakona u analizi električnih kola naizmenične struje. Za razliku od električnog otpora koji je intuitivno lakše shvatljiva manifestacija osobine materije da pruža otpor protoku električne struje (što ne zavisi od promenljivosti struje) i izražava se jednim brojem, impedansa električnog kola može imati pored ove realne vrednosti još i komponentu koja zavisi od frekvencije. Ova komponenta impedanse je druge prirode (nije u pitanju osobina materije već geometrija provodnika) u odnosu na otpor te se ne može sabirati sa prvom. Tako se radi jedinstvenog predstavljanja impedanse koristi kompleksan broj u kojem realni deo predstavlja otpor, često nazivan termogeni otpor jer je on uzrok grejanja provodnika, i imaginarni deo, koji se ponekad zove induktivni otpor mada nije pravi otpor a nije obavezno ni induktivan

U opštem slučaju, vrednosti napona i struja u kolu koje se sastoji samo od linearnih komponenti, odnosno, otpornika, kondenzatora i kalemova, su rešenja linearne diferencijalne jednačine. Može se dokazati da ako su izvori napona i/ili struja u kolu sinusoidalni i konstantne frekvencije, rešenja imaju oblik koji se naziva ustaljena naizmenična struja. Stoga, svi naponi i struje u kolu su sinusoidalni i imaju konstantne amplitude, frekvencije i faze.

Neka je $u(t)$ sinusoidalna funkcija vremena sa konstantnom amplitudom U_m , konstantnom frekvencijom f , i konstantnom fazom ϕ .

$$u(t) = U_m \cos(2\pi f t + \phi) = \operatorname{Re}(U_m e^{j2\pi f t} e^{j\phi})$$

gde j predstavlja imaginarni broj ($\sqrt{-1}$) i Re znači realni deo kompleksnog broja z . Sada, neka je kompleksni broj $\underline{U}$ dat kao:

$$\underline{U} = U_m e^{j\phi}$$

$\underline{U}$ se naziva fazorskim predstavnikom $u(t)$. $\underline{U}$ je konstantan kompleksni broj. Za kolo u ustaljenom naizmeničnom režimu, svi naponi i struje u kolu imaju fazorske predstavnike dokle god su svi izvori iste frekvencije. Odnosno, svaki napon i struja se mogu predstaviti kompleksnim brojem. Za analizu jednosmernih kola, svaki napon i struja su predstavljeni konstantnim realnim brojem. Stoga, može se zaključiti da pravila koja važe u analizi kola jednosmerne struje mogu da se primene i na kola naizmenične struje korišćenjem kompleksnih brojeva umesto realnih.

Definicija električne impedanse

Impedansa nekog elementa kola se definiše kao količnik fazora napona na elementu i fazora struje koja teče kroz taj element:

$$Z_r = \frac{U_r}{I_r}$$

Treba primetiti da iako je Z količnik dva fazora, samo Z nije fazor. To je zato što Z nije asocirano sa nekom sinusoidalnom funkcijom vremena.

Za kola jednosmerne struje, otpornost je definisana Omovim zakonom kao količnik jednosmernog napona na otporniku i jednosmerne struje kroz otpornik:

$$R = \frac{U_r}{I_r}$$

gde su U_R i I_R vrednosti (konstantne i realne) jednosmerne struje.

Električna impedansa jednaka je:

$$z_e = \sqrt{r_e^2 + x_e^2}, \quad \phi = \arctan \frac{x_e}{r_e}$$

gde je

$r_e = z_e \cos \phi$ realan deo kompleksne električne impedanse, nazvane **efektivna električna impedansa**, i

$x_e = z_e \sin \phi$ imaginaran deo kompleksne električne impedanse, nazvane **reaktivna**

električna impedansa.

Impedanse raznih elemenata

Za **otpornik**:

$$Z_R = \frac{U_R}{I_R} = R$$

Za **kondenzator**:

$$Z_c = \frac{U_c}{I_c} = \frac{1}{j\omega C}$$

Za **kalem**:

$$Z_{\text{kalem}} = j\omega L$$

Reaktansa

Termin reaktansa odnosi se na imaginarni deo impedanse.

$$Z = jX$$

Par primera:

Impedansa **otpornika** je **R** (njegova **otpornost**) a njegova reaktansa je **0**.

Impedansa **kondenzatora** je **j** ($-1/\omega C$) a njegova reaktansa je $-1/\omega C$.

Impedansa **kalema** je $j\omega L$ a njegova reaktansa je ωL .

Važno je istaći da su impedanse kondenzatora i kalema funkcije frekvencije ω i da su one imaginarne vrednosti - iako je sigurno reč o realnoj fizičkoj pojavi u vezi sa razlikom u fazi između fazora napona i struje usled prisutnosti kapacitivnosti i induktivnosti. Ranije je pokazano da je impedansa otpornika realna, drugim rečima otpornik ne stvara razliku u fazi između napona i struje kao što to čine kondenzator i kalem.

Kada su otpornik, kondenzator i kalem vezani u kolu naizmenične struje, ekvivalentna impedansa se računa na isti način kao i ekvivalentna otpornost u kolim jednosmerne struje. Rezultujuća ekvivalentna impedansa je u opštem slučaju, kompleksna veličina. Odnosno, ekvivalentna impedansa ima realan i imaginaran deo. Realan deo se označava kao R a imaginaran deo kao X. Stoga:

$$Z_{\text{ekv}} = R_{\text{ekv}} + jX_{\text{ekv}}$$

R_{ekv} se naziva rezistivni (otporni) deo impedanse dok se X_{ekv} naziva *reaktivni* deo impedanse. Stoga je uobičajeno da se kondenzator i kalem nazivaju *reaktansa* ili ekvivalentno, *reaktivna* komponenta (element kola). Dodatno, impedansa kondenzatora je negativna imaginarna vrednost dok je impedansa kalema pozitivna imaginarna vrednost. Stoga, *kapacitivna reaktansa* se odnosi na negativnu reaktansu, a *induktivna reaktansa* odnosi se na pozitivnu reaktansu.

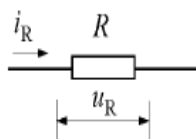
Reaktivna komponenta se izdvaja po tome što su sinusoidalni napon i sinusoidalna struja fazno pomerene za $\pi/2$ u toj komponenti. Iz toga proizilazi da komponenta naizmenično akumulira energiju iz kola a zatim tu energiju vraća u kolo. Odnosno, za razliku od otpornosti, reaktansa nema gubitke snage.

Korisno je odrediti vrednosti kapacitivne reaktanse za ekstremne vrednosti frekvencije. Ako frekvencija teži nuli, kapacitivna reaktansa teži beskonačnosti, tako da se kondenzator ponaša kao prekid u kolu za male vrednosti frekvencije sinusoidalnih izvora. Kada se frekvencija povećava, kapacitivna reaktansa se smanjuje. Tako da za veoma velike vrednosti frekvencije sinusoidalnih izvora, kapacitivnost se ponaša kao kratak spoj.

Suprotno, induktivna reaktansa teži nuli kada i frekvencija teži nuli, tako da se kalem ponaša kao kratak spoj za male vrednosti frekvencije sinusoidalnih izvora. Ako se frekvencija povećava, povećavaće se i induktivna reaktansa, tako da se kalem ponaša kao prekid u kolu za veoma velike frekvencije sinusoidalnih izvora.

Prosto kolo sa termogenom otpornšću R

Prosto kolo naizmenične struje sastoji se od izvora naizmenične električne struje i jednog potrošača. Neka je potrošač termogena omska otpornost R .



$$i = I_m \sin(\omega t + \theta)$$

$$u = R \cdot i$$

$$u = R \cdot I_m \sin(\omega t + \theta) \quad (1)$$

$$u = U_m \cdot \sin(\omega t + \theta + \varphi) \quad (2)$$

Upoređivanjem izraza, za efektivnu vrednost napona U i za faznu razliku napona i struje φ (ugao za koji fazor napona prednjači u odnosu na struju) dobija se, respektivno:

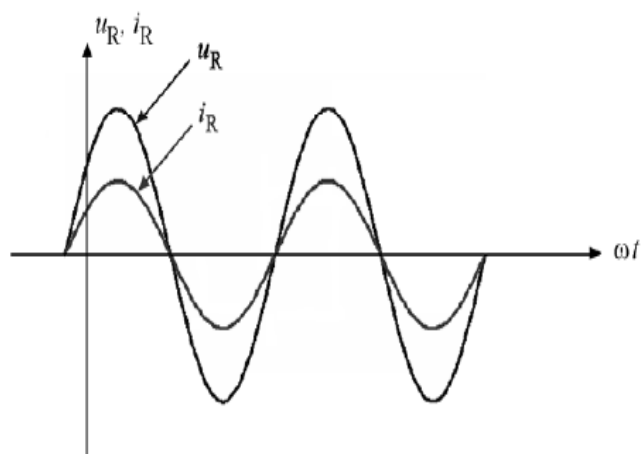
$$U_m = R \cdot I_m \quad / \sqrt{2}$$

$$U = R \cdot I$$

$$\varphi = 0$$

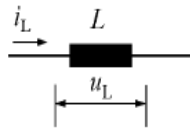
NAPON I STRUJA SU U FAZI

Vremenski dijagram:



Prosto kolo sa kalemom induktivnosti L

Neka se prosto kolo naizmenične struje sastoji od izvora naizmenične električne struje i kalema induktivnosti L .



$$i = I_m \sin(\omega t + \theta)$$

$$u_L = L \frac{di_L}{dt}$$

$$u = L \cdot \frac{d(I_m \sin(\omega t + \theta))}{dt}$$

$$u = L \cdot I_m \cdot \omega \cdot \cos(\omega t + \theta)$$

$$u = \omega \cdot L \cdot I_m \cdot \sin(\omega t + \theta + \frac{\pi}{2}) \quad (1)$$

$$u = U_m \cdot \sin(\omega t + \theta + \varphi) \quad (2)$$

$$U_m = \omega L \cdot I_m / \sqrt{2}$$

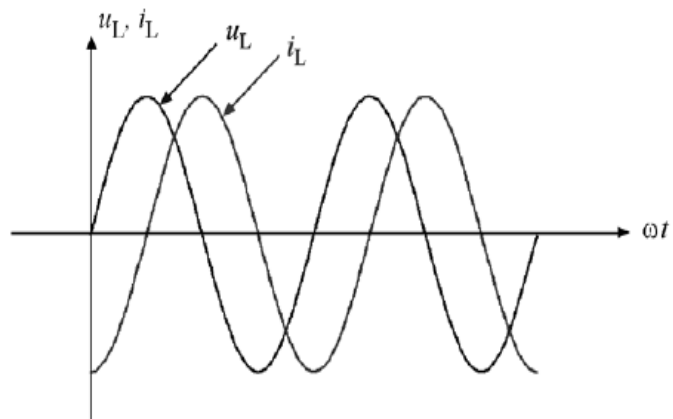
$$U = X_L \cdot I$$

$$X_L = \omega \cdot L$$

$$\varphi = 90^\circ$$

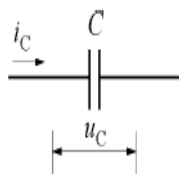
NAPON PREDNJAČI U ODNOSU NA STRUJU ZA 90°

Vremenski dijagram:



Prosto kolo sa kondenzatorom kapacitivnosti C

Neka se prosto kolo naizmenične struje sastoji od izvora naizmenične električne struje i kondenzatora kapacitivnosti C .



$$i = I_m \sin(\omega t + \theta)$$

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} \Rightarrow u_C = \frac{1}{C} \int_0^t i dt$$

$$u_C = \frac{1}{C} \int_0^t I_m \sin(\omega t + \theta) dt$$

$$u_C = \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{\omega} \cdot I_m \cdot (-\cos(\omega t + \theta)) = \frac{1}{\omega C} \cdot I_m \cdot \sin(\omega t + \theta - \frac{\pi}{2}) \quad (1)$$

$$u = U_m \cdot \sin(\omega t + \theta + \varphi) \quad (2)$$

$$U_m = \frac{1}{\omega C} \cdot I_m \quad / \sqrt{2}$$

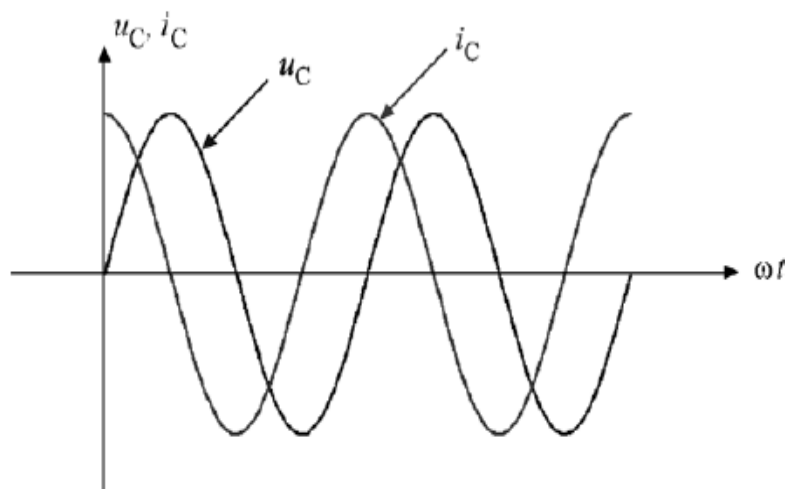
$$U = X_C \cdot I$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

$$\varphi = -90^\circ$$

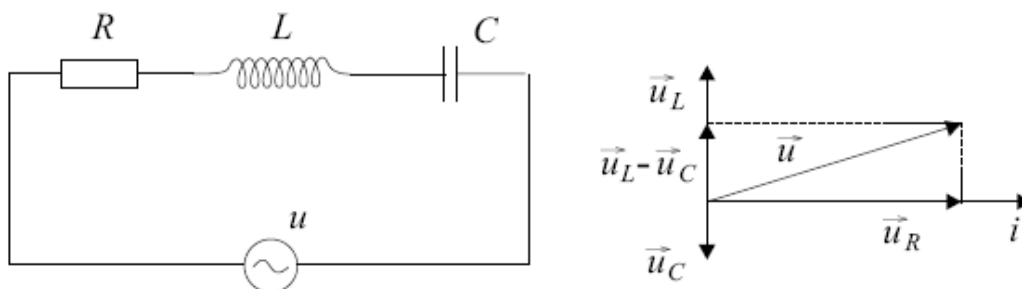
NAPON ZAOSTAJE U ODNOSU NA STRUJU ZA 90°

Vremenski dijagram:



Jedno karakteristično kolo naizmenične struje je tzv. redno RLC kolo koje predstavlja rednu vezu otpornika, kalema i kondenzatora. Da bi odredili koliki je ukupni otpor koji ova redna veza elemenata pokazuje proticanju naizmenične struje, moramo voditi računa o različitim faznim stavovima napona i struje na različitim elementima. Zbog toga, ukupni napon moramo odrediti vektorskim sabiranjem:

$$\vec{u} = \vec{u}_R + \vec{u}_L + \vec{u}_C \quad (5.79)$$



koristeći sliku, kao i veze napona i struja na elementima, imamo

$$U_R = RI, \quad U_L = \omega L I, \quad U_C = \frac{I}{\omega C} \Rightarrow U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}$$

Ako sada definisemo impedansu Z kao veličinu koja povezuje maksimalne (ili efektivne) vrednosti napona i struje u nekoj grani kola naizmenične struje onda za redno RLC kola imamo:

$$U = ZI \Rightarrow Z(\omega) = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Impedansa je fizička veličina koja ima dimenziju otpornosti, i predstavlja rezultujuću otpornost u kolima naizmenične struje. To je, u stvari, kompleksna veličina

$$\underline{Z} = Z \cdot \exp j\varphi$$

čiji modul Z predstavlja kolicnik maksimalnih (ili efektivnih) vrednosti napona i struje, a argument φ određuje fazni stav (faznu razliku) između napona i struje. Argument φ može imati tri karakteristične vrednosti koje odgovaraju trima elementima:

$$\varphi = \begin{cases} +\frac{\pi}{2} & \text{induktivna otpornost - kalem} \\ 0 & \text{termogena otpornost - otpornik} \\ -\frac{\pi}{2} & \text{kapacitivna otpornost - kondenzator} \end{cases}$$

Redno RLC kolo pokazuje efekat rezonancije. Naime, ako se vrednost ucestanosti postavi tako da kapacitivna i induktivna otpornost postanu jednake, tj.

$$\omega_r L - 1/\omega_r C = 0,$$

tada impedansa ima minimalnu i realnu vrednost $Z(\omega_r) = R$ dok se sama vrednost ucestanosti ω_r pri kojoj se to desava naziva rezonantna ucestanost:

Veze između napona i struje potrošača u prostim kolima naizmenične struje:

Vrsta elementa	Trenutne vrednosti	Efektivne vrednosti	Fazni stav
R	$u = R \cdot i$	$U = R \cdot I$	$\varphi = 0$
L	$u = L \frac{di}{dt}$	$U = X_L \cdot I$ $X_L = \omega \cdot L$	$\varphi = 90^\circ$
C	$i = C \frac{du}{dt}$	$U = X_C \cdot I$ $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$	$\varphi = -90^\circ$

Aktivna i reaktivna snaga (energija) u mreži naizmenične struje

Zadatak električne mreže u okviru elektroenergetskog sistema (EES) je prenos i distribucija električne energije od izvora do potrošača, uz zadovoljenje kriterijuma koji se tiču propisanog kvaliteta isporučene električne energije, sigurnosti pogona i pouzdanosti napajanja potrošača.

Međutim, u svakom električnom sistemu naizmenične struje, energija se pojavljuje u dve forme - reč, je naravno o dobro poznatom fenomenu aktivne i reaktivne energije. Aktivna energija predstavlja onaj koristan deo električne energije koji je moguće transformisati u razne druge vidove, kao što su, na primer, mehanička, toplotna, svetlosna energija, itd. Dakle, ona se može smatrati korisnom u punom smislu reči. Za razliku od ove prve, reaktivna komponenta energije služi za formiranje kako obavezno prisutnog električnog, tako i magnetnog polja raznih elektroenergetskih uređaja (transformatora, motora), kao i nekih aparata (npr. fluorescentni izvori svetlosti), dok se prilikom reverzibilnog procesa (tj. njihove razgradnje), ona se vraća sistemu iz kojeg je uzeta, pri čemu je njena srednja vrednost (za vreme jedne periode sa trajanjem T) jednaka nuli. Prema tome, ovo fluktuiranje reaktivne energije između mesta proizvodnje i mesta potrošnje nije praćeno pružanjem doprinosa korisnom radu (snazi), mada je očigledno da je njeno postojanje u elektroenergetskom sistemu neophodno.

Za ilustraciju napred rečenog, može da posluži analiza izraza za trenutnu snagu potrošača, koji je priključen na naizmenični sinusidalni napon, dat obrascem:

$$u(t) = U_m \sin \alpha t$$

unosí fazni pomeraj struje, odnosno njeno kašnjenje -zaostajanje za naponom za ugao φ (ovdje je reč o pretežno induktivnom, dok se za slučaj prednjačenja struje koristi termin kapacitivno opterećenje), tako da je:

$$i(t) = I_m \sin (\alpha t - \varphi)$$

U gornjim relacijama, podsetićemo se još jednom, sa $u(t)$ i $i(t)$ su označene trenutne vrednosti, a sa U_m i I_m amplitude napona i struje retrospektivno, dok ω predstavlja faznu brzinu, odnosno kružnu učestanost prostoperiodičnih veličina.

Po definiciji, trenutna snaga je ekvivalent vrednosti rada A izvršenog u jedinici vremena, tako da važi:

$$p(t) = \frac{dA}{dt} = u(t) \cdot i(t)$$

Ako se izvrši dalji račun, dobijamo:

$$\begin{aligned} p(t) &= U_m \cdot I_m \cdot \sin \omega t \cdot \sin (\omega t - \varphi) = \\ &= \frac{1}{2} U_m \cdot I_m \cdot \cos \omega t - \frac{1}{2} U_m \cdot I_m \cdot \cos (2\omega t - \varphi) = \\ &= UI \cos \varphi - UI \cos (2\omega t - \varphi) = p_a + p_r(t) \end{aligned}$$

Pored već pomenutih, uvedene su i neke nove oznake:

U, I -efektivne vrednosti napona i struje respektivno;

p_a , $p_r(t)$ -konstantna i naizmenicna komponenta (dvostruke učestanosti) trenutne vrednosti snage potrošača.

Iz opšte teorije naizmeničnih struja poznato je da je aktivna snaga P (odnosno, aktivna energija u jedinici vremena) jednaka srednjoj vrednosti snage P_{sr} u toku jedne periode, odnosno:

$$P = P_{sr} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = UI \cos \varphi = p_a$$

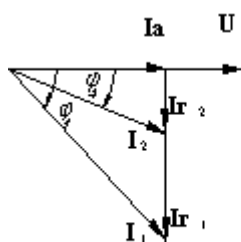
što potvrđuje odsustvo učešća reaktivne komponente snage (energije) u korisnom radu (snazi).

Da bi efekti postojanja reaktivne energije u elektroenergetskom sistemu bili potpuno jasni, dobro je evidentirati i činjenicu da aktivnoj i reaktivnoj snazi odgovara po jedna komponenta tzv. "prividne" struje I , koja bez obzira na svoj naziv, zapravo predstavlja stvarnu struju koja protiče kroz elemente elektroenergetskog sistema i opterećuje ih.

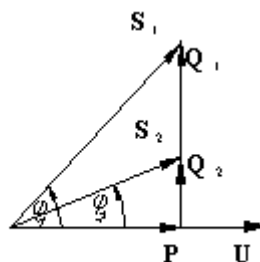
To su:

- o aktivna (I_a) u fazi sa naponom mreže U ;
- o reaktivna (I_p) komponenta struje, koja zaostaje za naponom mreže za 90° u slučaju induktivnog, odnosno fazno prednjači naponu za 90° , kada se radi o dominantno kapacitivnom opterećenju.
- o

Kako je za sinusoidne veličine iste učestanosti dopušteno prikazivati strujne i naponske veličine kao fazore, (fazorski dijagram struja (u slučaju pretežno induktivnog potrošača) za dva različita ugla φ je dat slikom).



Slika 1.-Fazorski dijagram struja potrošača



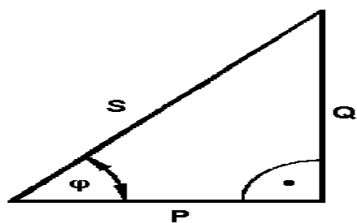
Slika 2.-Fazorski dijagram snaga potrošača

Dakle, pri nepromenjenoj potrošnji aktivne snage, vrednost faktora snage, kao osnovnog stepena iskorišćenja posmatrane električne instalacije je obrnuto proporcionalna potrebi za reaktivnom snagom.

U vezi sa tim, interesantna je konvencija o predznaku vrednosti reaktivne snage kod izvora i potrošača u elektroenergetskom sistemu. Kod potrošača važi pravilo da potrošač troši reaktivnu energiju ako je ona pozitivna, a da je vraća nazad u mrežu, tj. ponaša se kao generator pri njenoj negativnoj vrednosti. Međutim, ($Q > 0$) kod nadpobuđene sinhronne mašine ukazuje na proizvodnju reaktivne snage, dok u suprotnom slučaju ($Q < 0$) izvor prelazi u režim podpobude, apsorbira reaktivnu snagu iz sistema i igra ulogu otočnog reaktora.

Posledice egzistiranja reaktivne komponente električne energije (snage) u prenosnim i distributivnim mrežama, ni u kom slučaju nisu beznačajne. Naprotiv, proizvodnja i tranzit reaktivne snage kroz mrežu mogu imati veliki uticaj na osnovne tehničko-ekonomske pokazatelje rada sistema U prvom redu, dolazi do smanjenja prenosnog kapaciteta aktivnih snaga elemenata elektroenergetskog sistema, kao i do povećanja gubitaka prenosa i padova napona. Drugačije rečeno, reaktivna snaga opterećuje čitav lanac elemenata preko kojih se transportuje. Dimenzionisanje transformatora, vodova i generatora se vrši prema prividnoj snazi koju treba preneti, što znači da su uz manji faktor snage potrebne veće investicije.

Reaktivnu energiju u samom elektroenergetskom sistemu može da proizvede i sam sinhroni generator. No on ima ograničenu tehničku mogućnost za proizvodnju većih količina reaktivne snage. Takođe, vodovi visokog naponskog nivoa imaju veliki odnos reaktivnog i aktivnog otpora, tako da bi se u slučaju prenosa većih vrijednosti reaktivne snage mogli pojaviti tehnički nedozvoljeni padovi napona. Za to je potrebno da se planira uvođenje dodatnih izvora reaktivne snage, da bi se, kako se to obično kaže u praksi, reaktivna snaga kompenzovala, po mogućnosti, na mestu potrošnje (ili što je moguće bliže njemu).



$$S = U \cdot I \text{ [VA]}$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos \varphi \text{ [W]}$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi \text{ [var]}$$

Sa ekonomske strane gledano, problem planiranja ugradnje kompenzacijskih sredstava je uglavnom baziran na investicionim troškovima i valorizovanim uštedama zbog smanjenja gubitaka aktivne snage i energije.

TRANSFORMATOR

Transformator je električni uređaj koji transformiše energiju iz jednog kola u drugo posredstvom magnetne sprege, bez ikakvih pokretnih delova. Transformator se sastoji od dva (ili više) spregnuta namotaja ili jednog namotaja sa više izvoda i, u većini slučajeva, magnetnog jezgra koje koncentriše magnetni fluks. Naizmenična struja u jednom namotaju će indukovati struju u drugim namotajima.

Transformatori se koriste da spuštaju ili dižu napon, da menjaju impedansu i da obezbede električnu izolaciju između kola.

Transformator je jedan od najprostijih električnih uređaja. Njegov osnovni dizajn, materijali i principi su se malo promenili u poslednjih sto godina, ali opet, dizajn transformatora i materijali nastavljaju da se unapređuju.

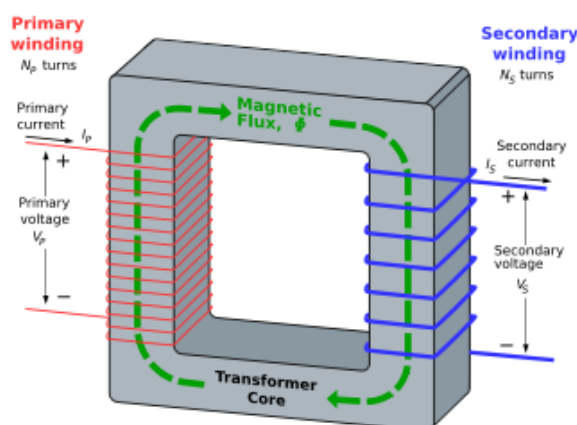
Transformatori su od vitalnog značaja za prenos energije visokim naponom koji obezbeđuje uštedu tokom prenosa energije na velike daljine. Jednostavnost i pouzdanost transformatora i ekonomičnost transformacije napona u njemu su osnovni činioci u izboru prenosa naizmeničnom strujom u Ratu struja kasnih osamdesetih godina 19. veka.

Transformatori audio-učestanosti su korišćeni u najranijim eksperimentima u razvoju telefona. Dok su neke rane elektronske primene transformatora zamenjene alternativnim tehnikama, transformatori se još uvek nalaze u mnogim elektronskim uređajima.

Transformatori dolaze u rasponu od malih transformatora sakrivenih u mikrofona do džinovskih transformatora snage gigavata koji se koriste za povežu velike delove nacionalnih mreža, ali svi rade na istim osnovnim principima i sa velikim sličnostima u delovima.

Transformator ne može da uradi sledeće:

- transformiše jednosmernu struju u naizmeničnu i obrnuto
- promeni napon i struju jednosmerne struje
- promeni učestanost naizmenične struje
- Ipak, transformatori su delovi sistema koji izvide sve ove radnje.



Princip rada idealnog transformatora

Najprostiji transformator se sastoji iz dva namotaja - primara i sekundara. Ako se vremenski promenljiv napon v_P priključi na primar od N_P navojaka, struja koja tada teče kroz njega

indukuje magnetomotornu silu (MMS). Kao što elektromotorna sila (EMS) tera struju kroz električno kolo, tako i MMS tera magnetni fluks oko magnetnog kola. MMS na primaru izaziva promenljiv magnetni fluks Φ_P u jezgru (siva boja) i indukuje EMS koja je suprotnog smera u odnosu na $\mathcal{U}_P$. Prema Faradejevom zakonu elektromagnetne indukcije, indukovani napon kroz primar je direktno proporcionalan brzini promene fluksa:

$$u_p = N_p \frac{d\phi_p}{dt}$$

Slično, napon koji je indukovao međusobni fluks kroz sekundar je:

$$u_s = N_s \frac{d\phi_s}{dt}$$

U idealnom slučaju, fluks na sekundaru je jednak onome u primaru i zato se mogu izjednačiti Φ_P i Φ_S . Iz ovog sledi:

$$\frac{u_p}{u_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

Dakle, u idealnom transformatoru, odnos primarnog i sekundarnog napona je jednak odnosu broja navojaka u namotajima, tj. napon po jednom navojku je isti u oba namotaja. Odnos struja u primaru i sekundaru je obrnuto proporcionalan odnosu broja navojaka. Ovo vodi najčešćoj upotrebi transformatora: preobražavanju električne energije jednog napona u električnu energiju drugog napona upotrebom namotaja sa različitim brojem navojaka.

EMS u sekundaru, u slučaju da je priključen na neko električno kolo, izaziva tok struje u njemu. MMS koju proizvodi struja u sekundaru je u opoziciji MMS primara i teži da poništi fluks u jezgru. Pošto smanjeni fluks smanjuje EMS indukovanu u primaru, u njemu teče povećana struja. Rezultat povećanja MMS zbog struje u primaru će izjednačiti efekat suprotne sekundarne MMS. Na ovaj način, električna energija dovedena na primar prenosi energiju na sekundar.

U praksi, visokonaponski namotaj ima više navojaka tanke žice, a niskonaponski malo navojaka debele žice.

Pošto jednosmerni napon neće dati promenljivi fluks u jezgru, ni EMS neće biti stvorena i struja koja teče kroz transformator će biti beskonačno velika. U praksi, redna veza otpornosti navojaka će ograničiti jačinu struje koja može teći, sve dok transformator ne dostigne termalnu ravnotežu ili bude uništen.

UPOTREBA TRANSFORMATORA

Za snabdevanje energijom iz prenosne mreže koja koristi naizmeničnu struju opreme koja koristi drugi napon. Može biti praćeno ispravljačkim kolom ako je potrebna jednosmerna struja.

Prilagođavanje električne opreme naponu za koji nije predviđena. Na primer, američka oprema je projektovana za 117 volti, a oprema u evropskim zemljama za 220-230 volti.

Prenos električne energije preko velikih razdaljina.

Za visokonaponske prenosne sisteme za jednosmernu struju.

Veliki, specijalno konstruisani transformatori se koriste u električnim pećima tokom proizvodnje čelika.

Rotirajući transformatori su dizajnirani tako da dok se jedan namotaj okreće, drugi miruje. Česta upotreba ovoga je bila u glavama video sistema koji se korišćeni u VHS

i Beta video plejerima. Oni mogu da prenesu energiju ili signale od mirujućeg do rotirajućeg mehanizma

NAZIVNA SNAGA

Nazivna snaga naponskog transformatora je ona snaga kojom se transformator može trajno opteretiti, a da transformator ne pređe definisanu klasu tačnosti. Nazivna snaga se izražava u VA. Potrebno je voditi računa i o graničnoj snazi naponskog transformatora u pogledu dozvoljenog zagrevanja. Potrebna nazivna snaga naponskog transformatora se određuje na osnovu snage instrumenata, releja i uređaja koji će biti priključeni na transformator. Snage ovih potrošača su reda VA (manje od 10 VA), pa su nazivne snage naponskih transformatora 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90, 120, 150, 180, 240, 300, 450, 600, 900 i 1200 VA.

Granična snaga je prividna snaga u volt-amperima koji naponski transformator može trajno davati kod nazivnog napona, a da se ne premaši dozvoljeno povišenje temperature. Ta se snaga može koristiti za napajanje zaštitnih uređaja (okidača) i drugih potrošača kod kojih tačnost nije potrebna, tj. kada naponski transformator radi kao energetski transformator.

GUBICI

Idealni transformator nema gubitaka i zato je stepen iskorišćenja 100%. U praksi se energija rasipa zbog otpornosti namotaja (poznato kao gubici u bakru) i magnetnih efekata koji se prvenstveno dešavaju u jezgru (poznato kao gubici u gvožđu). Transformatori obično imaju vrlo visok stepen iskorišćenja i veći transformatori (od 50 MVA i više) imaju stepen iskorišćenja od 99,75%. Mali transformatori koji se koriste u uređajima potrošačke elektronike imaju manje od 85% efikasnosti.

Gubici dolaze od:

otpornosti namotaja – struja koja teče kroz namotaje izaziva zagrevanje provodnika po Džulovom zakonu.

vtložnih struja – indukovana struja teče kroz jezgro i izaziva njegovo zagrevanje rasipanja – nisu sva magnetna polja koja stvara primar uhvaćena od strane sekundara. Deo rasutog fluksa može indukovati vrtložne struje u obližnjim provodnim objektima kao što je kućište transformatora i biva pretvoren u toplotu. Zujanje koje se čuje u blizini transformatora je rezultat rasutih linija polja koje izazivaju da kućište vibrira i takođe je od vibracija magnetorestrikcije u jezgru.

histerezisa – svaki put kada magnetno polje promeni smer, mala količina energije je izgubljena zbog histerezisa u magnetnom jezgru. Nivo histerezisa zavisi od materijala jezgra. mehaničkih gubitaka – naizmenično magnetno polje izaziva kolebanje elektromagnetne sile između navojaka, jezgra i obližnjih metalnih delova, izazivajući vibracije i buku koje troše snagu

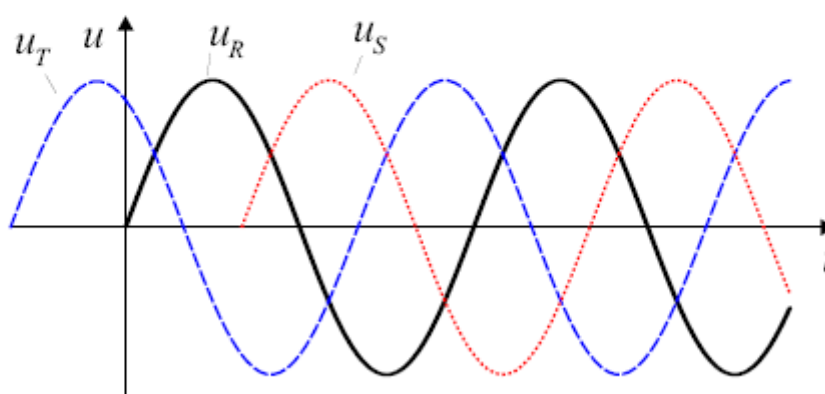
magnetorestrikcije – fluks u jezgru izaziva fizičko širenje i skupljanje neznatno od promenljivog magnetnog polja, efekat poznat pod imenom magnetorestrikcija. Ovo se pretvara u gubitke zbog zagrevanja u osetljivim feromagnetnim jezgrima.

sistema za hlađenje – veliki energetski transformatori mogu biti opremljenim ventilatorima, pumpama za ulje ili vodenim izmenjivačima toplote dizajniranim da odstrane toplotu izazvanu gubicima u bakru i gvožđu. Energija potrebna za rad sistema za hlađenje se obično smatra kao deo gubitaka transformatora.

GENERATORI ELEKTRIČNE STRUJE

Generatori električne struje su električne masine koje mehanicku energiju pretvaraju u električnu. Oni se mogu podeliti na generatore naizmenične struje (alternatore) i generatore jednosmerne struje. Znacaj prvih je neuporedivo veći, pa će se stoga oni obraditi u kratkim crtama. Savremeni izvori naizmenične struje su, skoro isključivo, indukcion generatori, čiji se princip rada zasniva na elektromagnetnoj indukciji. Kod njih se obrtanjem provodnika u magnetnom polju dobija naizmenična *ems*. Danas su skoro svi generatori naizmenične struje trofazni. To znači da oni u svom pokretnom delu koji se naziva rotor imaju tri posebna navoja, pomerena međusobno za ugao od 120° , u kojima se indukuju tri *ems* fazno pomerene upravo za 120° , ili vremenski, za trećinu perioda.

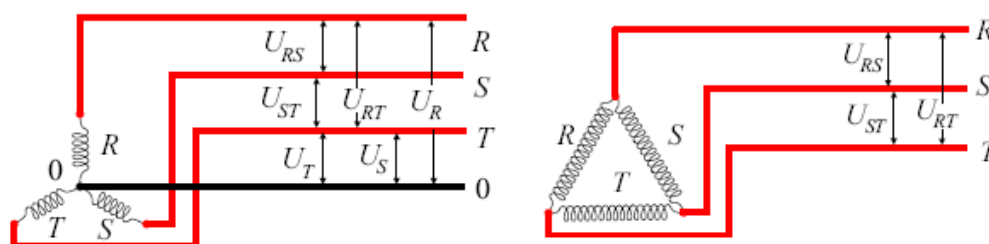
$$\begin{aligned}u_R &= U_0 \sin \omega t, \\u_S &= U_0 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right), \\u_T &= U_0 \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right).\end{aligned}$$



Slika 5.22. Trofazni sistem.

)..

Kalemovi se obično označavaju slovima R, S i T i svaki od njih definiše jednu fazu. U zavisnosti od vezivanja ovih kalemova, prenos električne energije od generatora do potrošača obavlja se sa 4 ili sa 3 provodnika. Ako su početci svih kalemova vezani u jednu tačku (tzv. nulta tačka) onda govorimo o vezi u zvezdu. Tada sa svakog drugog kraja kalema kreće po jedan, fazni (ili linijski) provodnik, a sa nulte tačke, nulti provodnik (slika 5.23), pa se prenos obavlja sa 4 provodnika. Ako su pak kalemovi vezani tako da je jedan kraj jednog provodnika vezan za početak sledećeg, i tako do kraja, onda se takva veza naziva veza u trougao (slika 5.24), a prenos se obavlja sa tri provodnika. Kod veze u zvezdu, naponi između pojedinih faznih provodnika i nultog provodnika nazivaju se fazni naponi.



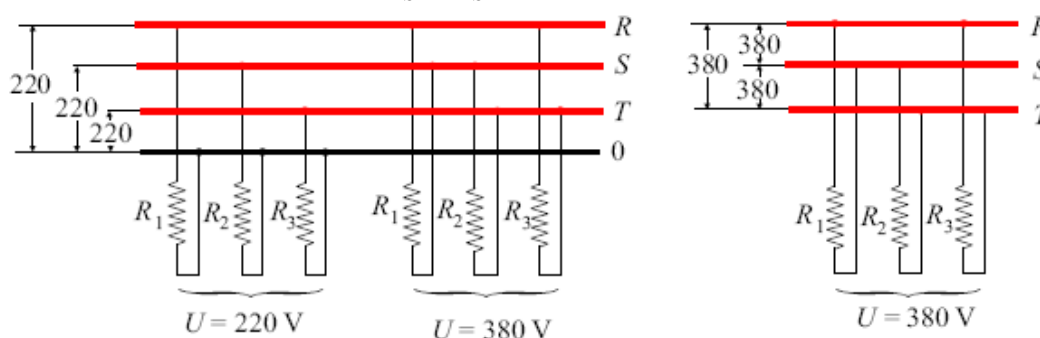
Slika 5.23. Veza u zvezdu i Veza u trougao.

Svi fazni naponi ravnomerno opterećene mreže jednaki su i za gradsku mrežu iznose 220 V efektivne vrednosti:

$$U_R = U_S = U_T = 220 \text{ V.}$$

Sa druge strane, naponi između pojedinih faznih provodnika nazivaju se međufazni ili linijski naponi. Međufazni naponi su U_{RS} , U_{ST} i U_{RT} i oni su 1.73 puta veći od faznih napona. Njihova efektivna vrednost iznosi 380 V:

$$U_{RS} = U_{ST} = U_{RT} = 380 \text{ V}$$



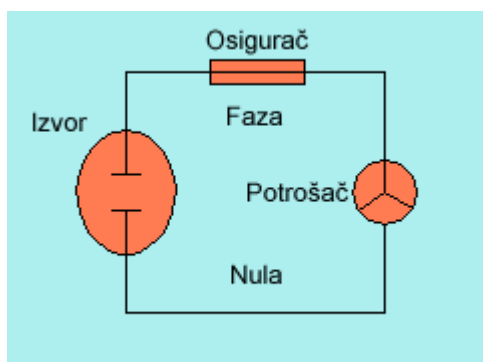
Slika 5.25. Vezivanje potrošača električne energije na trofaznu električnu mrežu.

Za vezu u zvezdu takodje je karakteristično da je jačina struje kroz nulti provodnik jednaka nuli, ali samo pri ravnomernom opterećenju sve tri faze. Tada su jačine struja kroz linijske provodnike jednake, ali međusobno fazno pomerene za 120° . Savršeno ravnomerno opterećenje faza teško se ostvaruje u praksi, pa kroz nulti provodnik uvek protiče slabija ili jača struja. Međtim, ona je uvek slabija od struja u linijskim provodnicima, usled čega nulti provodnik može da bude tanji, po čemu se on može i prepoznati.

Sijalice i ostali potrošači koji se uključuju u obične utičnice sa dva otvora kao na slici. Kada se skine utikač sa zida unutra su tri žice: faza, nula u kojoj nema struje i žica koja se vezuje za metalni jezičak na utikaču – uzemljenje. Svrha uzemljenja jeste da odvede suvišno uzemljenje kada de do proboja faze.

U slučaju industrijskih potrošača, kao i velikih kućnih potrošača koriste se sve tri faze. Utikač za šporet ima pet klemi dva jezička i tri otvora. To pruža mogućnost šporetu da istovremeno upotrebi više monofaznih struja.

Nedostatak otpora (kratki spoj), kao i prevelika snaga potrošača rezultiraju prejakom strujom. Prejaka struja može oštetiti delove strujnog kola i ugroziti ljude. Osigurač mora biti najslabija karika u lancu i pregoreva ukoliko jačina stuje pređe predviđenu granicu. Snaga osigurača izražava se u amperima i označava maksimalnu struju koju osigurač može izdržati.



Koliki je osigurač potreban izračunava se prema formuli:

- $I = P / U$

Na pr. za rešo od 5kW potreban je osigurač od 25 A jer je

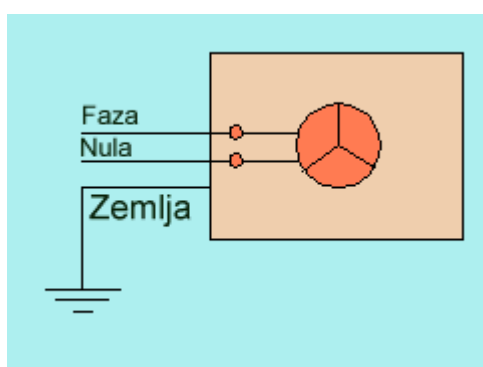
- $5000 / 220 = 9,09 \text{ (10 A)}$

Koliko možemo opteretiti osigurač izračunavamo prema formuli:

- $P = U \times I$

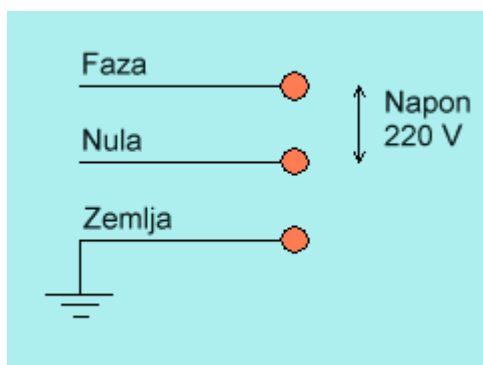
Na pr. osigurač od 16 A možemo opteretiti sa 3,5 kW jer je

- $220 \times 16 = 3520 \text{ W (3,5 kW)}$



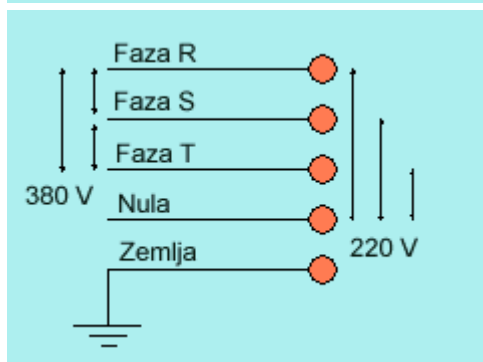
Struja uvijek bira put na kojem nailazi na manji otpor. Metalna kućišta reflektora se uzemljuju kako bi se u slučaju proboja faze na kućište strujni krug zatvorio prema zemlji, a ne kroz čoveka koji rukuje potrošačem.

Zbog toga je vrlo opasno priključivati potrošače u stare utičnice koje nemaju uzemljenje (koje nisu schuko).



Jednofazna (monofazna) struja je u svakodnevnoj upotrebi u domaćinstvima. Ima jednu fazu i nulu, a napon između faze i nule je 220 V.

Za distribuciju monofazne struje potrebni su trožilni kabal, pri čemu jedna linija provodi fazu, druga nulu a treća uzemljenje



Koristi se za distribuciju struje veće snage i na veće udaljenosti. Provodi se petorožilnim kablom: za tri faze, nulu i uzemljenje.

Napon između svake faze i nule je 220 V.

Napon među fazama je 380 V - što čini trofaznu struju dodatno opasnom

Načini dobijanja električne energije

Električna energija predstavlja tzv. sekundarni (ili transformisani) oblik energije za razliku od primarnih oblika energije koji se pojavljuju u prirodi. Već smo govorili da se generatorima električne struje mehanička energija pretvara u električnu. Međutim, osim mehanicke, za dobijanje električne energije može se koristiti i Sunčeva energija. Dakle, možemo kazati da za dobijanje električne energije postoje dva načina:

- direktnim pretvaranjem energije Sunca (elektromagnetnih talasa) u električnu energiju, što se postiže solarnim ćelijama;
- pretvaranjem mehaničke energije u električnu, što se izvodi u elektranama.

Direktno pretvaranje Sunčeve u električnu energiju je suštinski različito od pretvaranja mehaničke energije u električnu. Iako su sunčevi kilovati besplatni, energija po jedinici površine je mala, tako da bi bilo potrebno investirati ogromna sredstva da se ona uhvati i sačuva, osobito onda kada Sunce ne sija. Pošto se radi o malim snagama, ovako dobijena električna energija za sada se uglavnom koristi samo za osvetljenje i rad elektronskih uređaja male snage. Solarne ćelije i solarni paneli (skupovi solarnih ćelija) proizvode se u poluprovodničkoj tehnologiji, i stalno se razvijaju, tako da u budućnosti možemo očekivati povećanje efikasnosti solarnih sistema za direktno pretvaranje.

Pogon elektrana koje se još nazivaju i centrale može biti različit u zavisnosti od izvora mehaničke energije koja se koristi za proizvodnju električne energije:

1. • korišćenjem mehaničke energije tekućih voda -tzv. hidroelektrane;
2. • korišćenjem mehaničke energije stajaćih voda tj. plime i oseke -elektrane na plimu i oseku
3. • korišćenjem energije vetra -vetrenjače ili vetrogeneratori;

4. • korišćenjem mehaničke energije vodene pare pomoću parnih turbina.

Kod elektrana sa parnim turbinama postoji višestruki proces pretvaranja energije. Najpre se neka energija pretvara u toplotnu, zatim se ona pretvara u mehaničku (pri čemu se od vode dobija vodena para na povišenom pritisku), a zatim se uz pomoć turbina mehanička energija vodene pare pretvara u električnu. Ovde razlikujemo dva osnovna tipa elektrana:

1. • nuklearne elektrane, kod kojih se toplotna energija oslobađa procesom kontrolisane fuzije, tj. lančane reakcije u nuklearnom gorivu
2. • termoelektrane kod kojih se toplotna energija stvara sagorevanjem nekog energenta.

Energenti koji se koriste za sagorevanje u termoelektranama mogu biti različiti:

1. • gas
2. • neki naftni derivat (dizel ili mazut) (termoelektrane na tečna goriva)
3. • ugalj
4. biomase
5. • različiti organski i neorganski otpad

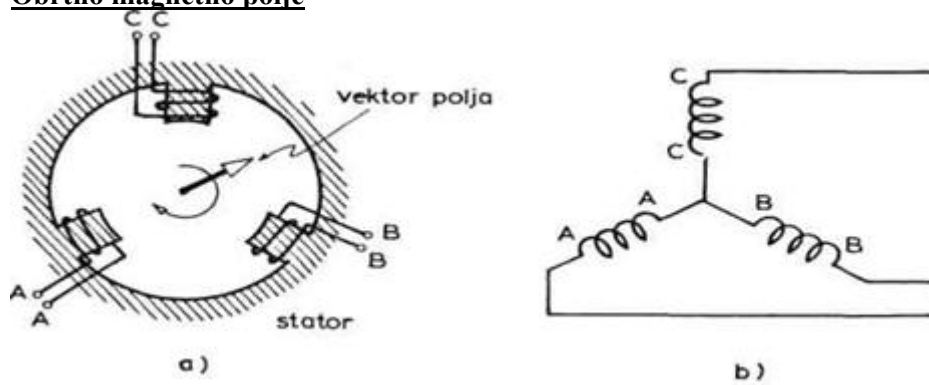
Sve izvore energije koji se koriste za dobijanje električne energije možemo podeliti na

1. • obnovljive izvore energije,
2. • neobnovljive izvore energije.

U obnovljive izvore energije spadaju energije Sunca, plime i oseke, tekućih voda i vetra, a u neobnovljive energija unutar atomskog jezgra, kao i fosilna goriva (ugalj, nafta, gas).

Globalna tendencija je da se proizvodnja električne energije sve više prebacuje na obnovljive izvore energije iz razumljivih ekoloških i ekonomskih razloga.

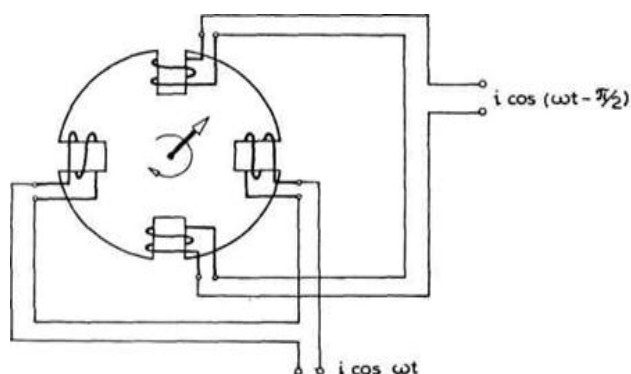
Obrtno magnetno polje



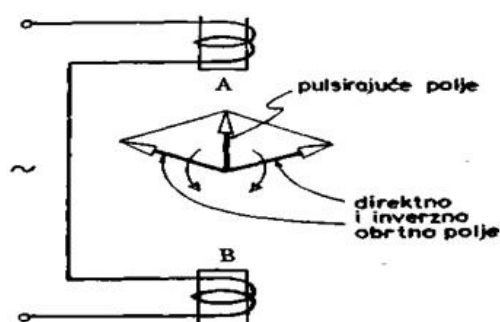
Obrtno magnetno polje je magnetno polje koje periodično menja pravac i smer.. Stalni magnet u takvom polju bi rotirao kako bi njegovi polovi ostali poravnati sa polovima tog spoljnog obrtnog polja. Ovaj efekat sa stalnim magnetom se koristio u prvobitnim motorima naizmenične struje. Obrtno magnetno polje se može dobiti koristeći dva namotaja pod pravim uglom kroz koje teku naizmenične struje koje su fazno pomerene za 90 stepeni. Međutim, sistem koji bi isporučivao takvu struju, morao bi da ima tri provodnika kroz koje teku struje različitih amplituda. U praktičnom smislu to znači da bi ovi provodnici morali da imaju različite preseke što bi ometalo standardizaciju provodnika. Da bi se ova prepreka prevazišla, usvojen je

trofazni sistem gde su tri struje jednake po amplitudi i fazno pomerene za 120 stepeni. Tri slična namotaja koji su međusobno prostorno pomereni za 120 stepeni mogu da stvore obrtno magnetno polje u slučaju ovog trofaznog napajanja. Mogućnost da se trofazni sistem upotrebi za stvaranje obrtnog magnetnog polja u motorima, osnovni je razlog zbog kojeg ovakav sistem električnog napajanja dominira u svetu.

Objasnimo prvo obrtno magnetno polje koje je kao što je već spomenuto ključni efekat za rad indukcionog motora. Ako stator sa trofaznim namotajima (sl. 3.17) priključimo na izvor trofazne naizmenične struje (fazna razlika $2\pi/3$), u unutrašnjoj će se obrazovati tzv. obrtno magnetno polje. Možemo ga predstaviti vektorom konstantnog intenziteta koji se obrće ugaonom brzinom $\omega_s = 2\pi f$, gde je f frekvencija struje. Ovu brzinu zovemo sinhrona brzina. Obrtno polje možemo postići i dvofaznim sistemom (fazna razlika $\pi/2$) ako se polovi postave kao što je prikazano na slici 3.18.



Sl. 3.18. Obrtno magnetno polje - shema dvofaznog statora



Sl. 3.19. Monofazni stator i magnetno polje

U slučaju monofaznog napajanja statora (sl. 3.19) dobija se pulsirajuće magnetno polje stalnog pravca (AB na slici). Ovakvo polje, koje nije obrtno, može se posmatrati kao superpozicija dva obrtna polja koja se obrću u različitim smerovima, a intenziteti su im jednaki polovini amplitude pulsirajućeg polja. Ova obrtna magnetna polja nazivaju se direktno i inverzno polje. Stvar je slobodnog izbora koje će se polje smatrati direktnim.

Zamislamo sada kratkospojeni rotor na koji deluje obrtno magnetno polje. Polje će tada presecati kolo rotora i u provodnicima rotora indukovaće se struja, a za tim elektrodinamička sila koja će pokrenuti rotor u smeru obrtanja polja. Pri obrtanju rotora njegova brzina ω biće manja od brzine obrtanja magnetnog polja ω_s (tj. od sinhronne brzine). Ova razlika naziva se brzina klizanja $(\omega_s - \omega)$, a često se izražava relativno $s = (\omega_s - \omega) / \omega_s$ i naziva klizanje.

Struja u rotoru izazvaće svoje magnetno polje. Može se pokazati da će se polje rotora, bez obzira na klizanje rotora, obrtati sinhronom brzinom. Tako, sabiranjem polja statora i rotora formira se rezultujuće polje koje se obrće sinhronom brzinom. Kako ovo polje seče kolo rotora (zbog klizanja) održava se indukcija u rotoru. Dejstvom resultantnog polja na rotor sa strujom (Lorencove sile) pojavljuje se obrtni moment na osovini rotora. Očigledno, moment postoji sve dok postoji klizanje. Ako bi se rotor obrtao sinhronom brzinom, prestala bi indukcija i rotoru, a time nestao i momenat. Ukupno, možemo reći da obrtno magnetno polje "vuče" rotor i on se obrće u smeru obrtanja polja. U slučaju monofaznog motora kod koga postoji direktno i inverzno obrtno polje, rotor može pratiti bilo koje od njih. Zato se koristi posebno pokretačko kolo tj. dopunski namotaji koji povuku rotor u željenom smeru. Nakon postizanja određene brzine centrifugalni prekidač isključuje pokretačko kolo. Karakteristika svih indukcionih motora je njihova težnja da se obrću konstantnom brzinom. Ukoliko se želi ostvariti promenljiva brzina, kao što je slučaj kod primene u robotici, to se postiže menjanjem napona i frekvence napajanja motora. Sinhroni motor za naizmeničnu struju ima trofazne namotaje na statoru dok je rotor ili u obliku stalnog magneta ili u obliku namotaja napajanih jednosmernom strujom. U savremenim servosistemima se, po pravilu, sreću motori sa stalnim magnetima. Shema motora prikazana je na slici 3.4. Dakle, konstrukcija je shematski slična konstrukciji motora jednosmerne struje sa elektronskom komutacijom. Suštinska razlika je u tome što se statorski namotaji ne napajaju elektronski komutiranom jednosmernom strujom, već trofaznom naizmeničnom strujom. Stator sa trofaznom strujom stvara u motoru obrtno magnetno polje sinhronne brzine (ω_s) . Ovo polje deluje na polove stalnog magneta stvarajući momenat oko osovine motora. Rotor će se obrtati istom brzinom kao i polje (ω_s) ali će zaostajati za određeni ugao δ koji je utoliko veći ukoliko je veće opterećenje na osovini motora.

Regulacija brzine ovih motora ostvaruje se promenom frekvence napajanja statora čime se menja sinhrona brzina. Ovi motori su relativno skoro ušli u širu primenu kod robotskih sistema. Razlog leži u složenosti regulacije ovog pogona. Međutim, savremena elektronika omogućava uspešnu regulaciju ovih motora i to u veoma širokom opsegu (od brzine 0 do nekoliko hiljada obrtaja u minuti). Budući da sinhroni motori imaju veoma dobre pogonske karakteristike (stalan momenat u širokom opsegu brzina) njihova primena u robotici doživljava nagli rast.

Elektromotor



Obrtno magnetsko polje kao suma vektora magnetnih indukcija tri fazna namotaja

Elektromotor je električna mašina koja pretvara električnu energiju u mehaničku energiju. Obrnuti proces, pretvaranje mehaničke energije u električnu energiju, se vrši generatorom.

Većina elektromotora rade na principu elektromagnetne indukcije, ali postoje i motori koji koriste druge elektromehaničke fenomene, kao što su elektrostatička sila i piezoelektrični efekat. Fundamentalni princip na kom se zasnivaju elektromagnetski motori je mehanička sila koja deluje na provodnik kroz koji protiče električna struja i koji se nalazi u magnetskom polju. Ova sila je opisana Lorencovim zakonom i njen pravac je normalan na provodnik i magnetno polje.

Većina elektromagnetnih motora je rotacionog tipa, ali postoje i linearni motori. U rotacionom motoru, obrtni deo se naziva rotor, a nepomični se naziva stator. Rotor se obrće pošto su namotaji na njemu i magnetno polje u statoru postavljeni tako da razvijaju obrtni moment na osovini rotora.

Asinhroni motor

Asinhrona (indukciona) mašina je vrsta električne mašine za naizmeničnu struju. Kod asinhronih mašina, brzina obrtanja rotora i brzina obrtanja obrtnog magnetnog polja nisu sinhronizovane, pa otuda ime. Asinhronne mašine za razliku od sinhronne mašine ne mogu da proizvode reaktivnu snagu, pa se u glavnom koriste kao elektromotori.

Neka je stator mašine priključen na sistem naizmeničnih trofaznih napona. Kada kroz namote statora protiču trofazne naizmenične struje koje stvaraju obrtno magnetno polje, koje obrće rotor brzinom Ω . Obrtno polje rotira u zazoru i zatvara se kroz stator i rotor, zbog čega se u provodnicima indukuju odgovarajuće elektromotorne sile.

U namotu statora javlja se kontraelektromotorna sila E_s koja drži ravnotežu priključenom naponu statora U i čiji se moduo razlikuje za nekoliko procenata od dovedenog napona za pad napona na omskoj otpornosti i reaktansi rasipanja. U namotu rotora se takođe indukuje elektromotorna sila. Ako je električno kolo rotora zatvoreno, kroz njega će proticati struja I_r , čija je aktivna komponenta istog smera kao i indukovana elektromotorna sila. Pošto se provodnik sa strujom I_r nalazi u magnetnom polju, na njega će delovati elektromagnenta sila F koja će obrtati rotor u smeru obrtanja obrtnog magnetnog polja. Zbir svih proizvoda pojedinačnih sila u provodnicima rotora i poluprečnika predstavlja obrtni momenat elektromagnetnih sila mašine. Kako se energija sa statora na rotor prenosi putem elektromagnetne indukcije, asinhronne mašine se često nazivaju i indukzione mašine.

Rotor ne može nikada postići sinhronu brzinu, odnosno brzinu obrtanja magnetnog polja. Ako bi se rotor okretao sinhronom brzinom, onda ne bi bilo relativne brzine između obrtnog polja i rotora, zbog čega magnetni fluks ne bi presecao provodnike rotora i ne bi postojala indukovana elektromotorna sila u namotajima rotora, a bez nje ni struja, elektromagnetna sila i obrtni momenat. Zbog toga bi rotor počeo da zaostaje, zbog čega bi provodnici ponovo presecali magnetni fluks i pojavio bi se obrtni momenat. Kada rotor nije opterećen radnom mašinom (asinhroni motor u praznom hodu), tada rotor mora da savlada samo mehaničke gubitke usled trenja u ležajevima i trenja rotora o vazduh. Kako su gubici usled trenja i ventilacije mali, tada se rotor okreće brzinom koja je bliska sinhronoj brzini.

Namoti su po svojoj prirodi omsko-induktivnog karaktera. Za magnećenje magnetnog materijala i vazdušnog zazora između statora i rotora potrebna je reaktivna energija. Kako asinhrona mašina ne može da proizvodi reaktivnu energiju, pa je ona mora uzimati iz mreže. Struja koju napon mreže tera kroz namot će uvek biti induktivna. Zbog toga je asinhrona mašina u i motorskom i u generatorskom režimu potrošač reaktivne energije, što je jedan od osnovnih razloga zašto se asinhrona mašina koristi pretežno kao motor. U generatorskom režimu asinhrona mašina se koristi u okviru autonomnih elektroenergetskih sistema i tada se reaktivna energija obezbeđuje iz kondenzatorske baterije. U velikim industrijskim potrošačima sa puno asinhronih motora velikih snaga, često se postavljaju statički kompenzator (uglavnom kondenzatorska baterija) za popravku faktora snage, da se reaktivna energija ne povlači iz mreže, sa obzirom da se plaća.

Razlika između brzine obrtanja rotora i brzine obrtnog polja opisuje se veličinom koja se naziva klizanje. Klizanje se izračunava po formuli:

$$S = (N_{sin} - N_{AM}) / N_{sin} \cdot 100$$

gde je:

N_{sin} - sinhrona mehanička brzina obrtanja

N_{AM} - asinhrona (stvarna) mehanička brzina obrtanja rotora

Sinhrona mehanička brzina obrtanja zavisi od broj pari polova i iznosi

$$N_{sin} = \frac{60 \cdot f_2}{p}$$

Klizanje pri nazivnom opterećenju S_n iznosi od 10 % do 2 % za motore nominalnih snaga. Kako je

$$\begin{aligned} N_{sin} &= N_{AM} + S \cdot N_{sin}, \\ \omega_2 &= \omega_m + S \cdot \omega_2 = \omega_m + \omega_1 \\ \omega_1 &= S \cdot \omega_2 \end{aligned}$$

dobija se da je frekvencija struje u rotoru

$$f_1 = S \cdot f_2.$$

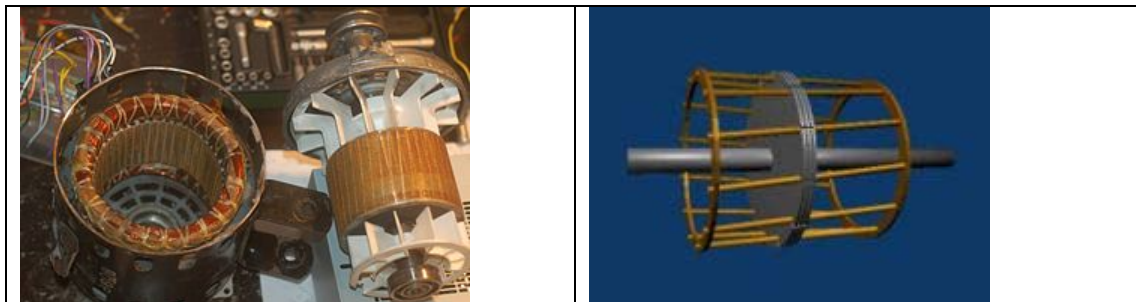
Vrednost frekvencije struje u rotoru u nominalnom režimu iznosi nekoliko herca, pa su gubici u rotoru usled histerezisa i vrtložnih u struja zanemarljivi u odnosu na gubitke u statoru.

KONSTRUKCIJA ASINHRONIH MOTORA

Stator asinhronih mašina se izrađuje od feromagnetnog materijala u obliku limova, koji se slažu u pakete potrebne dužine, pri čemu se između limova postavlja izolacija. Ovakvo lameliranje se vrši kako bi se smanjili gubici usled histerezisa i vrtložnih

struja. Magnetni likomi od kojih se pravi jezgro su legirani silicijumom radi suzbijanja gubitaka zbog histerezisa, pošto dodatak silicijuma sužava histerezisnu petlju, a legiranjem se povećava električna otpornost limova, zbog čega se smanjuju vrtložne struje i gubici uslet njih. Žljebovi u koje se smeštaju namotaji statora mogu biti poluzatvoreni za snage do 200 kW, a iznad 200 kW se koriste otvoreni.

Rotor mašine se takođe pravi od feromagnetnog materijala pošto u namotaju rotora protiče naizmenična struja. Namotaji na rotor se smeštaju na dva načina, zbog čega se razlikuju dve podgrupe asinhronih mašina. U zavisnosti od načina smeštanja namotaja postoje mašine sa motanim namotom ili klizno-kolutne mašine i kavezni asinhroni motori.



Kavezni kratkospojeni rotor

Kod klizno-kolutnih mašina rotor može imati trofazni namotaj, čiji se počeci izvode na tri klizna koluta, dok se krajevi veuju u zvezdište. Svrha kliznih kolutova je mogućnost spoljnog pristupa namotaju rotora. Po kliznim kolutovima klize četkice koje su pričvršćene za stator i čiji su krajevi izvedeni na stator. Na ovaj način je omogućeno dovodenje i odvođenje električne energije. Klizni prstenovi se mogu kratko spojiti, čime trofazni rotorski namotaj postaje kratko spojen namotaj, pri čemu se četkice podižu.

Kod kaveznih kratkospojenih motora namotaj rotora se uliva u žljebove i spaja sa obe strane kratkospojnim prstenovima. Namotaj je od bakra i aluminijuma. Kavezni namotaj je potpuno kratko spojen što znači da nema električni pristup rotorskom namotaju.

Jednofazni asinhroni motor

Indukcijski motor može raditi i sa samo jednom fazom (bez obrtnog magnetskog polja), ali u tom se slučaju ne može sam pokrenuti (nema potezni moment) i smer obrtanja zavisi od smera spoljašnjeg početnog momenta. Uslov razvijanja vremenski nepromenljivog polja za ovu mašinu se ne može zadovoljiti zbog pulsirajućeg polja.

Ovi problemi se rešavaju dodavanjem polova sa kratko spojenim namotom ili pomoćnom fazom u kojoj se postiže veštački fazni pomak struje - obično serijskim spajanjem kondenzatora (koji se nakon zaleta motora može i isključiti). Ovakvi motori se široko koriste u kućnim aparatima

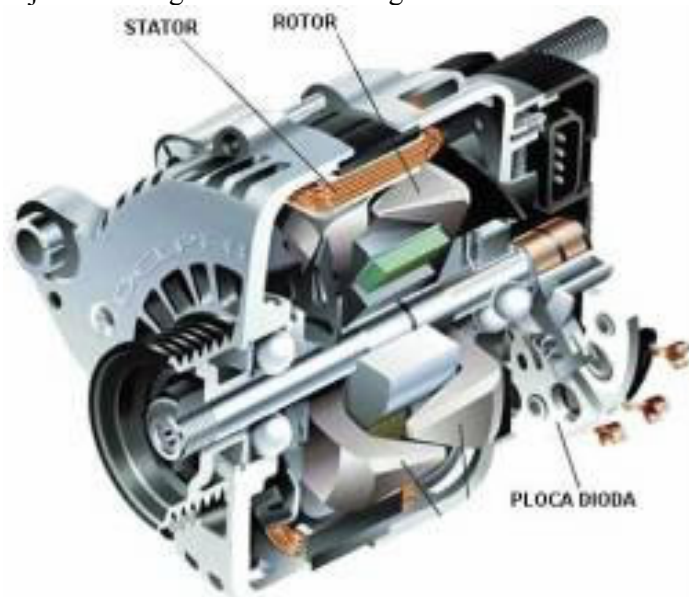
ALTERNATOR

Danas se umesto dinamo masina na motornim vozilima skoro isključivo koriste alternatori, tj. generatori naizmenične struje. Zbog izvanrednih svojstava oni nadmasuju dinamo masine i potpuno su ih istisnuli iz upotrebe. U odnosu na dinamo, alternatori su manji, lakši i bolje

podnose rezim rada automobilskeg motora. Osim toga, bolje snabdevaju vozilo elektricnom energijom i izdasnije pune akumulator. Ali, imaju i manjih nedostataka: ispravljacke diode su veoma osetljive. Tesko ih je prilagoditi uslovima rada motora sa unutrašnjim sagorevanjem gde ima povisene temperature, vlage i prljavstine. Zbog toga se diode veoma lako ostecuju i brzo sagorevaju i pri najmanjem kvaru na elektricnim instalacijama.

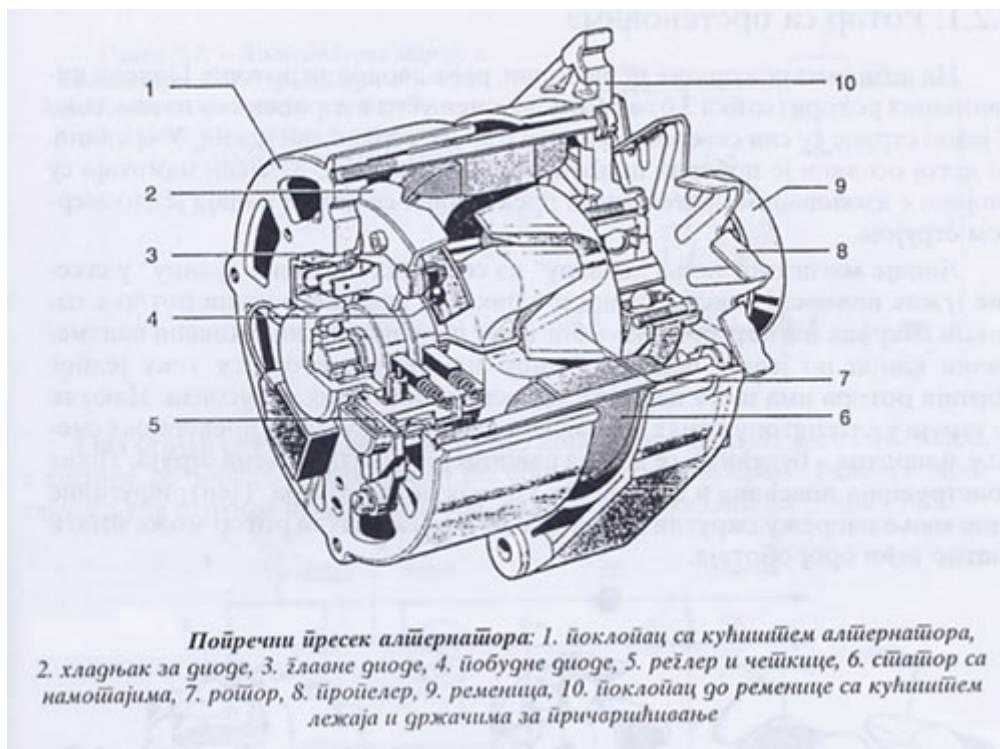
Prednosti alternatora su:

- Napajanje prijemnika i punjenje akumulatora i pri praznom hodu motora;
- Lako podnosi i vrlo velike brojeve obrtaja motora;
- Lako se održava i ima duzi vek trajanja;
- Nema kolektora (sa velikim varnicenjima), koji je najvise ogranicavo broj obrtaja dinama;
- Na regleru nema potrebe za relejom povratne struje;
- Ne zavisi od smera obrtaja (izuzev ventilatora za hladjenje);
- Omogucava koriscenje manjih akumulatora zbog efikasnijeg punjenja;
- Manjih je dimenzija i mase nego dinamo iste snage.



Konstrukcija alternatora

Osnovni delovi alternatora su: stator sa zlebovima u kome je smesten trofazni namotaj, rotor na cijoj su osovini magnetni polovi sa pobudnim namotajem i dva klizna prstena. Osovina se s obe strane oslanja na kuglicne lezajeve smestene u baznim poklopcima. Alternator ima sest glavnih dioda snage i tri pomocne manje diode za napajanje pobude. Naspram kliznih prstenova su male cetkice pomocu kojih se rotor napaja strujom. U sklopu cetkica, sa spoljne strane je i mali tranzitorski regler koji je preko alternatora povezan s akumulatorom i ostalim delovima elektricne instalacije.



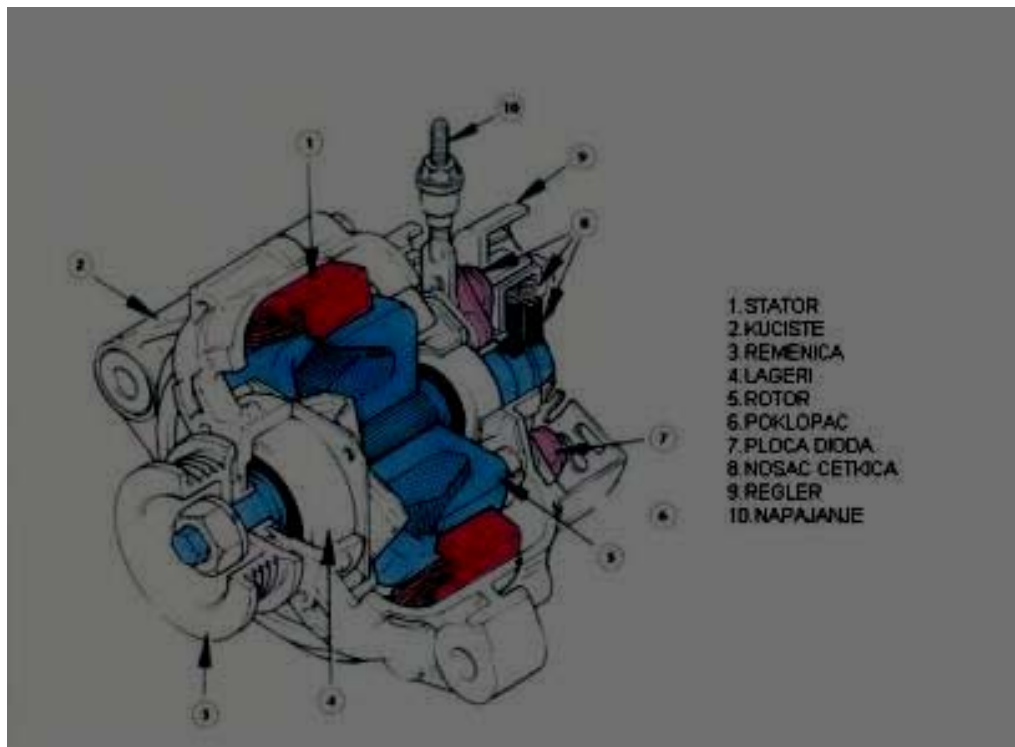
Kontrola rada alternatora

Zbog silicijumskih dioda kontrolna lampica alternatora se ne može vezati tako jednostavno kao kod dinama. Ako bi se i ovde vezala na isti način, sijalica ne bi svetlela posto se strujno kolo lampice zatvara preko dioda i to u zapretnom smeru. Prema tome, ona ne bi zasvetlela kada se okrene kontakt ključ za paljenje.

Veza kontrolne lampice je izvedena ili preko releja ili preko pobudnih dioda. U prvom slučaju namotaj releja se napaja preko zvezdista namotaja statora. Kontrolna lampica je sa jedne strane vezana za kontakt-ključ (klima 15), a sa druge strane za "mirni" kontakt releja i preko tog kontakta je u spoju sa masom. Kada se okrene kontakt-ključ, a motor se još ne pokrene sijalica svetli. Sa jedne strane je preko kontakt-ključa dosla u vezu sa plus polom akumulatora, a sa druge strane, preko releja i mase, sa minus polom akumulatora. Posle pokretanja motora, alternator se pobudjuje i zahvaljujući naponu koji se javlja između zvezdista i mase, relej privlači kotvu i prekida vezu sijalice sa masom. Tada se sijalica gasi, što je znak da je alternator proradio i da daje struju. Ako se sijalica ne ugasi posle paljenja motora, ili se upali u toku vožnje, s alternatorom, i prestaje da daje struju.

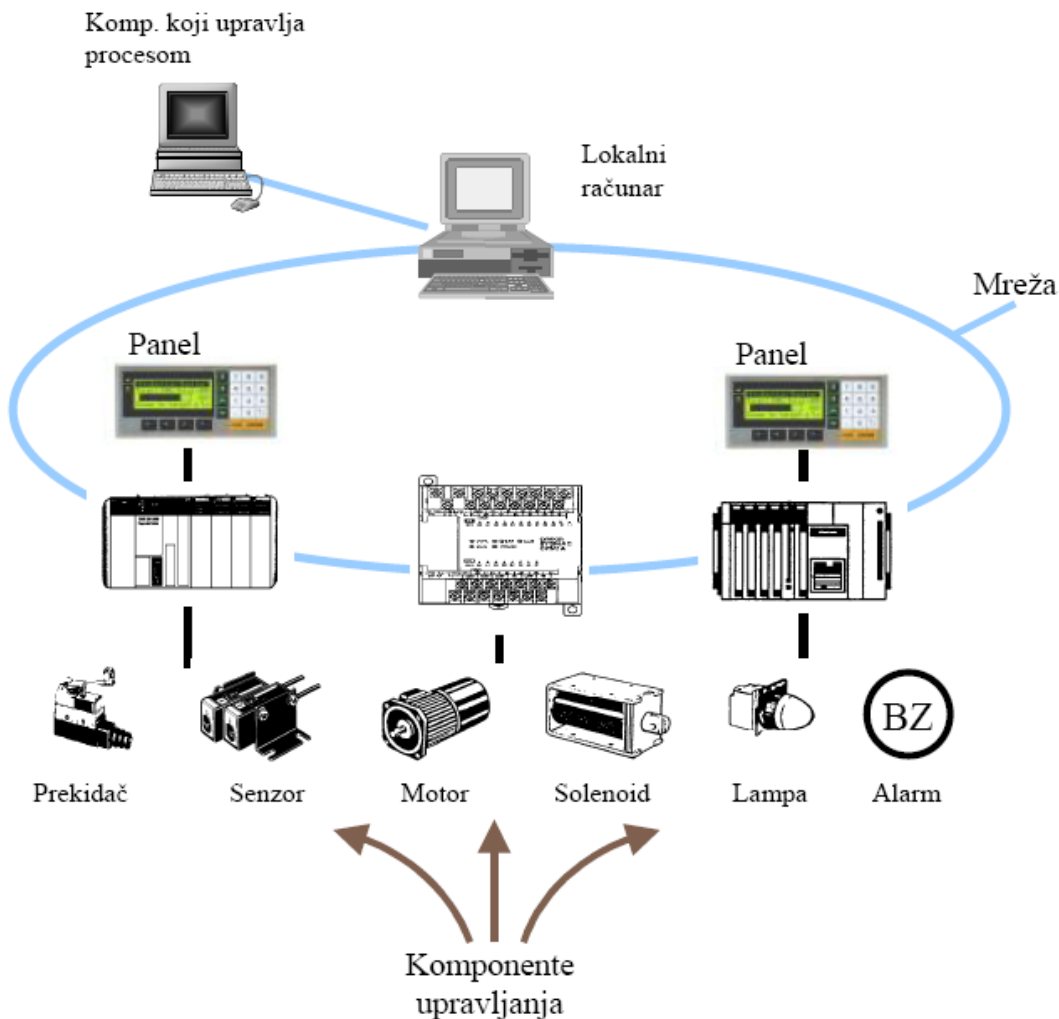
U drugom slučaju, kod veze preko pobudne diode, veza je jednostavna, i slična onoj kod dinama. S jedne strane, preko kontakt-ključa kontrolna lampica je vezana za plus pol akumulatora (B+), a sa druge strane za plus pol pobudnih dioda.

Kontrolna lampica se pali čim se okrene kontakt-ključ ali bez pokretanja motora. Tada se strujno kolo zatvara od plus pola akumulatora pa preko kontakt-ključa, kontrolne lampice, reglera i namotaja rotora do mase. Posle pokretanja motora alternator se pobudjuje i počinje da daje struju. Ako je sve ispravno, sijalica se gasi posto je izjednačen napon između priključaka (D+) i (B+), odnosno između oba kraja lampice. Ako se lampica ne ugasi ni pri većim obrtajima motora, to je znak da postoji smetnja ili u alternatoru ili u regleru.



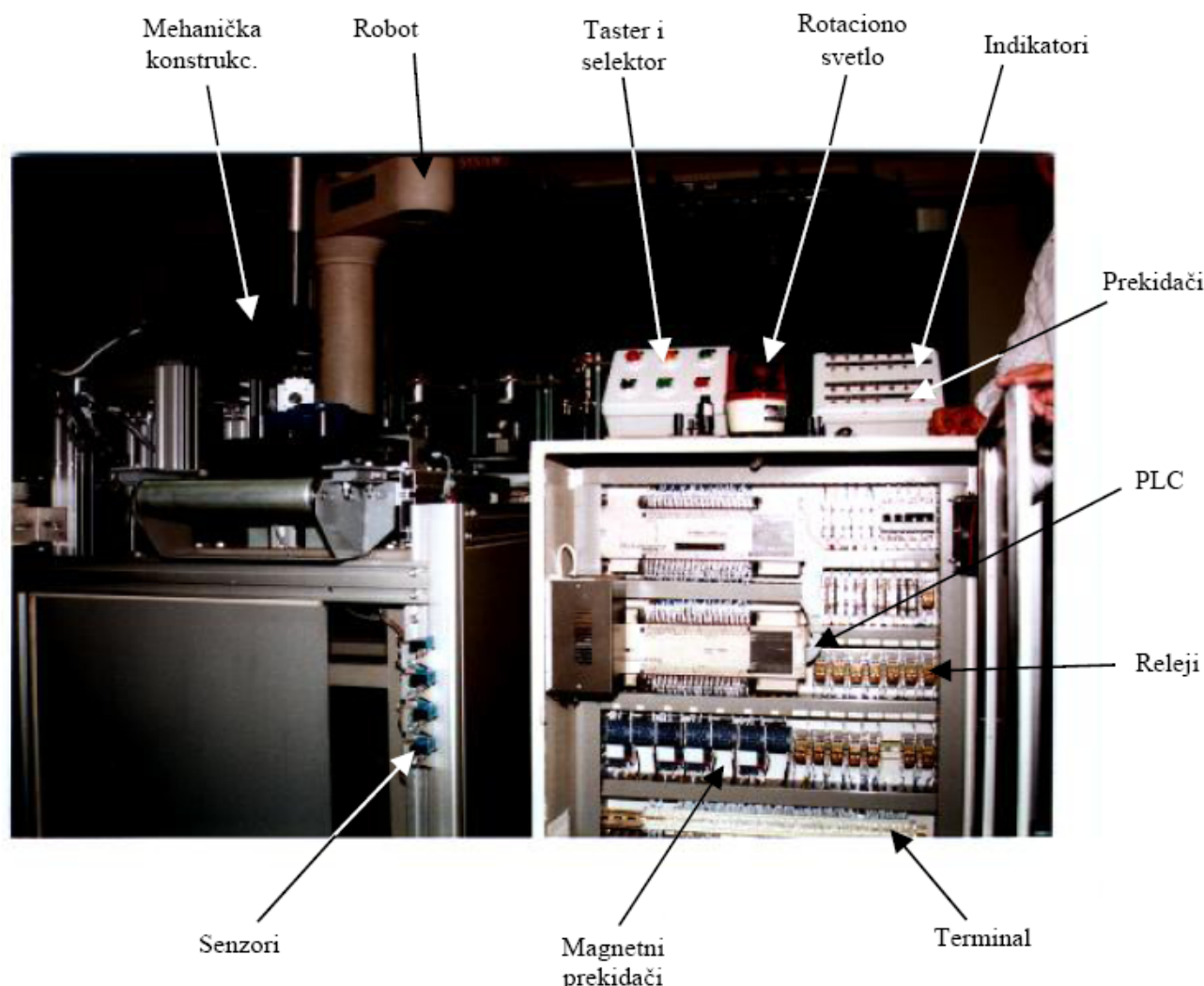
SISTEMI UPRAVLJANJA

Sistem upravljanja uopšte, predstavlja zbir elektronskih uređaja i opreme koji se koriste za obezbeđivanje stabilnosti, tačnosti i glatkog prelaza procesa ili proizvođačke aktivnosti. Mogu biti različiti, od elektrana do poluprovodničke mašine. Kao rezultat brzog napredovanja tehnologije, moguće je upravljati vrlo komplikovanim procesima, pomoću PLC-a i na primer računarom, itd. Svaka komponenta sistema upravljanja igra veoma važnu ulogu bez obzira na njenu veličinu. Tako na primer PLC na slici 1.1 ne bi znao šta se u sistemu dešava da ne postoje senzori.



Slika 1.

Na slici 2.1 je prikazana tipična primena Gantry Robota, koji se koristi za operaciju prenošenja nekog dela sa mesto na mesto. Ceo proces se kontroliše PLC-om. Kao ulazni uređaji koriste se tasteri, prekidači, senzori i selector prekidači. Izlazne uređaje predstavljaju rotaciono svetlo, releji, indikatori i solenoidni ventili. Ceo proces se kontroliše *ladder programom* koji je učitao u memoriju centralne procesorske jedinice PLC-a. Program izvršava sekvencu upravljanja koju je sračunao na osnovu prethodne sekvence. Postoje i ručne operacije koje dozvoljavaju operatoru da startuje mašinu, taster za uzbunu za svrhu bezbednosti itd.



Slika 2.1 Primena robota – upravljanje PLC-om.

U sistemu upravljanja, PLC se često naziva srcem upravljačkog sistema. PLC pomoću programa koji je učitao u njegovu memoriju, stalno prati stanje sistema kroz povratni signal i na osnovu logike programa određuje kako će se izlazne veličine, ako postoji potreba za tim, menjati. U ovom radu će biti obrađena prekidačka (ON/OFF) logika. Karakteristično za prekidačku logiku je to da se za ulaze i izlaze koriste digitalni signali.

PLC se može proširiti modulima koji drugačijom logikom generišu upravljački signal, za svrhu upravljanja zadatim objektom. To mogu biti moduli koji upravljački signal generišu u fuzzy logikom, upotrebom PID zakona upravljanja itd.

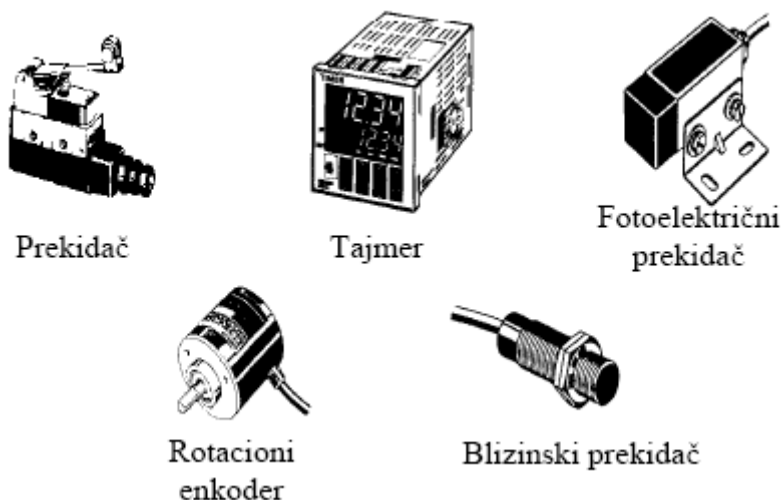
Treba naglasiti da postoje i posebni moduli kojima se nadgrađuje osnovni PLC tako da se za ulaz mogu imati i kontinualni signali.

Takođe se može povezati više PLC-ova sa nekim drugim kontrolerima u komunikacionu mrežu, u svrhu upravljanja kompleksnog procesa.

ULAZNI UREĐAJI

"Inteligencija" automatizovanog sistema uveliko zavisi od mogućnosti PLC-a da čita signale sa različitih tipova senzora i ručnih ulaznih uređaja. Ulazne signale može da zadaje operater preko tastera, tastatura i prekidača, i ti uređaji predstavljaju osnovni interfejs između čoveka i mašine. S druge strane, za detekciju radnog elementa, praćenja kretanja mehanizma,

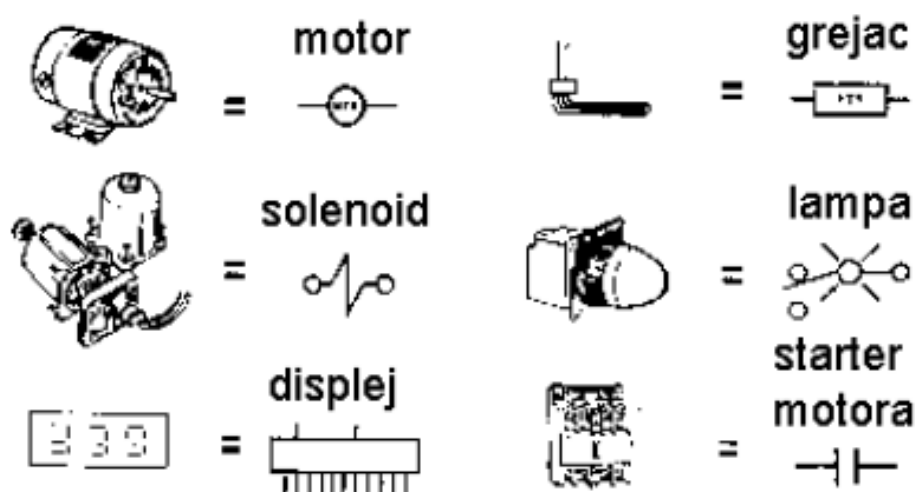
provere pritiska ili nivoa tečnosti itd., PLC mora da preuzme signal sa odgovarajućih uređaja – senzora kao što su na primer, fotoelektrični davač , davač nivoa itd.



Slika 2.2 Ulazni uređaji.

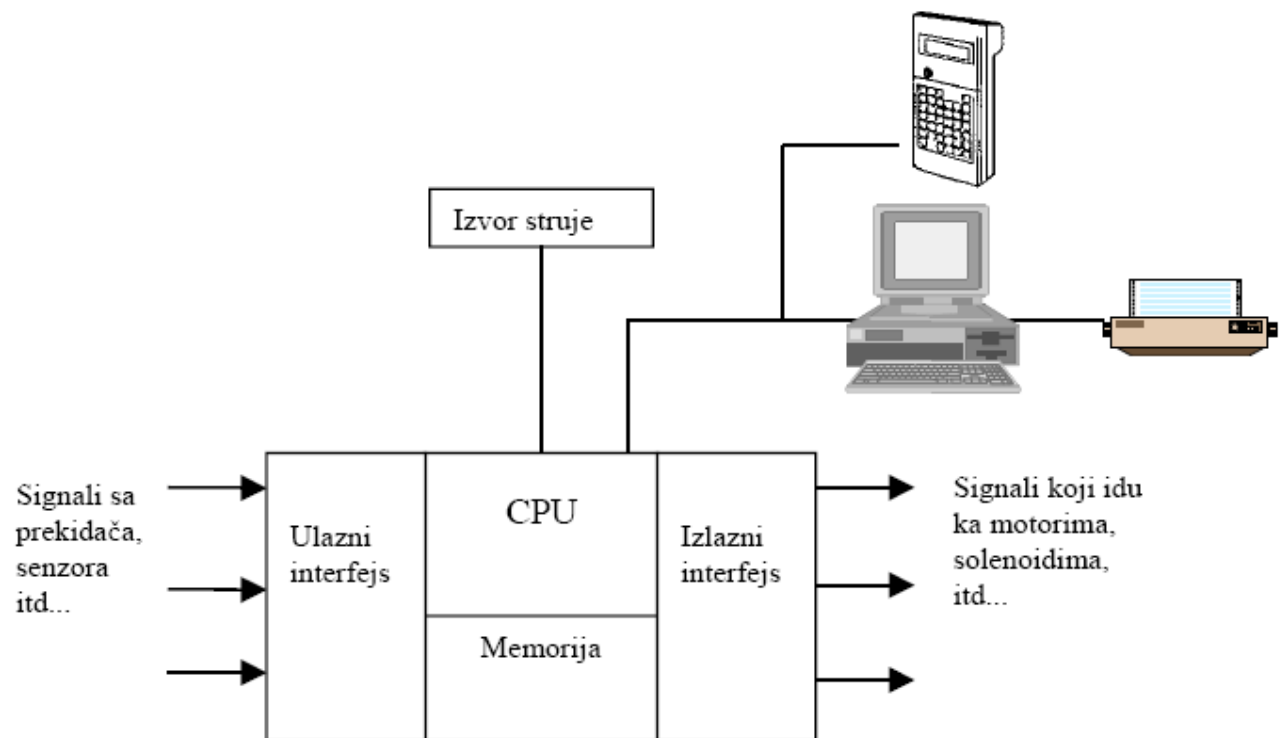
IZLAZNI UREĐAJI

Najčešći izlazni uređaji (izvršni uređaji) su motori, solenoidi, releji, alarmi itd. Kroz aktiviranje motora ili solenoida PLC može da kontroliše najrazličitije procese: od najprostijih kao što je uzimanje i spuštanje nekog objekta do sistema za servo pozicioniranje. Izbor izlaznog uređaja poput solenoida ili motora je veoma bitan korak u projektovanju SAU i on direktno utiče na performanse i specifikacije koje se zahtevaju. Naravno, iako se sijalice, alarm, displej itd. tretiraju kao izlazni uređaji oni ne utiču na performanse sistema i postavljaju se za svrhu obaveštavanja operatera.



Slika 2.3 Izlazni uređaji.

PLC se sastoji od centralne procesorske jedinice (CPU), koja sadrži program po kojem se generiše upravljačko dejstvo, i ulaznih i izlaznih modula koji su direktno povezani sa uređajima.

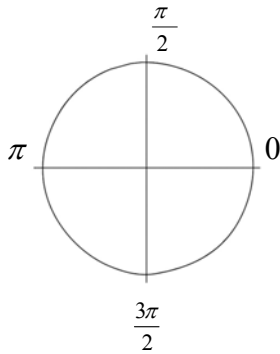


Dodatak

SI jedinice za elektromagnetizam			
ime	simbol	definicija	veličina
amper (SI osnovna jedinica)	A	A	jačina električne struje
kulon	C	$A \cdot s$	količina naelektrisanja
volt	V	$J/C = kg \cdot m^2 \cdot s^{-3} \cdot A^{-1}$	potencijalna razlika, napon
om	Ω	$V/A = kg \cdot m^2 \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$	otpor, impedansa
om metar	$\Omega \cdot m$	$kg \cdot m^3 \cdot s^{-3} \cdot A^{-2}$	specifični otpor
vat	W	$V \cdot A = kg \cdot m^2 \cdot s^{-3}$	električna snaga
farad	F	$C/V = kg^{-1} \cdot m^{-2} \cdot A^2 \cdot s^4$	električni kapacitet
farad po metru	F/m	$kg^{-1} \cdot m^{-3} \cdot A^2 \cdot s^4$	permitivnost
recipročni farad	F^{-1}	$kg^1 \cdot m^2 \cdot A^{-2} \cdot s^{-4}$	elastanca
simens	S	$\Omega^{-1} = kg^{-1} \cdot m^{-2} \cdot s^3 \cdot A^2$	električna provodnost
simens po metru	S/m	$kg^{-1} \cdot m^{-3} \cdot s^3 \cdot A^2$	specifična električna provodljivost
veber	Wb	$V \cdot s = kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$	fluks magnetnog polja
tesla	T	$Wb/m^2 = kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$	magnetna indukcija
amper po metru	A/m	$m^{-1} \cdot A$	jačina magnetnog polja
amper po veberu	A/Wb	$kg^{-1} \cdot m^{-2} \cdot s^2 \cdot A^2$	magnetna otpornost
henri	H	$V \cdot s/A = kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$	induktivnost
henri po metru	H/m	$kg \cdot m \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$	permeabilnost
(bez dimenzija)	-	-	magnetna osetljivost

Osnovne trigonometrijske funkcije

Digresija: trigonometrija



	0	$\frac{\pi}{2}$	π	$\frac{3\pi}{2}$
sin	0	1	0	-1
cos	1	0	-1	0

	$\frac{\pi}{3} = 60^\circ$	$\frac{\pi}{4} = 45^\circ$	$\frac{\pi}{6} = 30^\circ$
sin	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{1}{2}$
cos	$\frac{1}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$

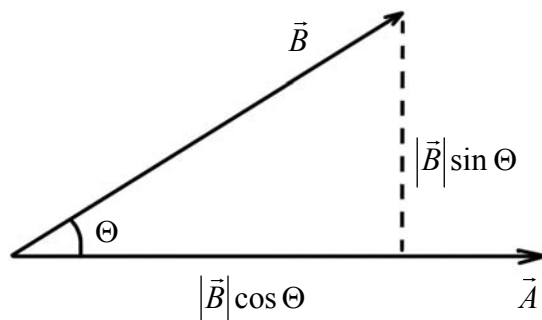
VEKTORI

Vektori su veličine koje su određene:

1. pravcem
2. smerom
3. intenzitetom (jačinom)

PROIZVOD VEKTORA

- SKALARNI proizvod vektora



Skalarni proizvod dva vektora je skalar:

$$\vec{A} \cdot \vec{B} = |\vec{A}| \cdot |\vec{B}| \cdot \cos \Theta$$

gde je :

Θ - ugao između vektora $\vec{A}$ i $\vec{B}$

$$|\vec{A}| = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + A_3^2}$$

$$|\vec{B}| = \sqrt{B_1^2 + B_2^2 + B_3^2}$$

$$\vec{A} \cdot \vec{B} = (A_1 \cdot \vec{i} + A_2 \cdot \vec{j} + A_3 \cdot \vec{k}) \cdot (B_1 \cdot \vec{i} + B_2 \cdot \vec{j} + B_3 \cdot \vec{k}) = A_1 B_1 + A_2 B_2 + A_3 B_3$$

$$|\vec{A}| \cdot |\vec{B}| \cdot \cos \Theta = A_1 B_1 + A_2 B_2 + A_3 B_3$$

PRIMERI:

- 1) Naći skalarni proizvod vektora $\vec{A} = 4 \cdot \vec{i} - 5 \cdot \vec{j} - \vec{k}$ i $\vec{B} = \vec{i} + 2 \cdot \vec{j} + 3 \cdot \vec{k}$

Rešenje:

$$\vec{A} \cdot \vec{B} = A_1 B_1 + A_2 B_2 + A_3 B_3 = 4 \cdot 1 + (-5) \cdot 2 + (-1) \cdot 3 = 4 - 10 - 3 = -9$$

$$\cos \Theta > 90^\circ$$

- 2) Naći ugao između vektora $\vec{A} = 2 \cdot \vec{i} + 2 \cdot \vec{j} - \vec{k}$ i $\vec{B} = 3 \cdot \vec{i} + 4 \cdot \vec{j}$

Rešenje:

$$|\vec{A}| = \sqrt{4 + 4 + 1} = \sqrt{9} = 3$$

$$|\vec{B}| = \sqrt{9+16} = \sqrt{25} = 5$$

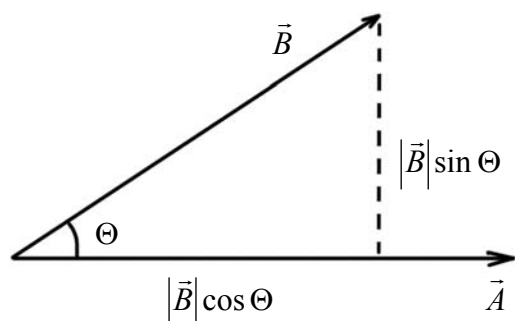
$$\vec{A} \cdot \vec{B} = A_1 B_1 + A_2 B_2 + A_3 B_3 = 6 + 8 - 0 = 14$$

$$\vec{A} \cdot \vec{B} = |\vec{A}| \cdot |\vec{B}| \cdot \cos \Theta \Rightarrow 14 = 3 \cdot 5 \cdot \cos \Theta$$

$$\cos \Theta = \frac{14}{15}$$

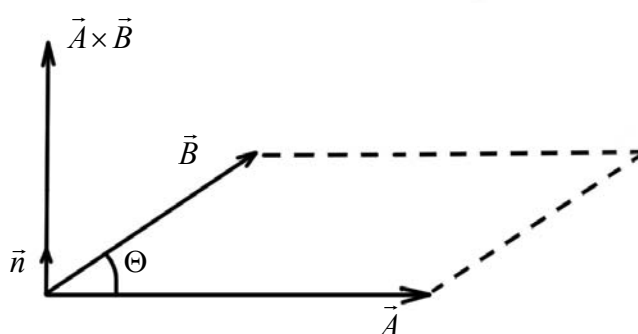
$$\Theta = \cos^{-1}\left(\frac{14}{15}\right)$$

- VEKTORSKI proizvod vektora**



Vektorski proizvod vektora je vektor:

$$\vec{A} \times \vec{B} = |\vec{A}| \cdot |\vec{B}| \cdot \sin \Theta \cdot \vec{n}$$



Pravac i smer vektora $\vec{A} \times \vec{B}$ određuje se pomoću pravila desnog zavrtnja: ovaj vektor će biti normalan na ravan koju obrazuju vektori $\vec{A}$ i $\vec{B}$, a smer će mu biti takav kao što napreduje zavrtnj (kada se vrti od $\vec{A}$ prema $\vec{B}$).

TABELA INTEGRALA

1. $\int x^n dx = \frac{1}{1+n} x^{n+1} + c$
2. $\int (x+a)^n dx = \frac{(x+a)^{n+1}}{n+1} + c, \quad n \neq -1$
3. $\int e^{ax} dx = \frac{1}{a} e^{ax} + c$
4. $\int x e^x dx = (x-1)e^x + c$
5. $\int x e^{ax} dx = \left(\frac{x}{a} - \frac{1}{a^2}\right) e^{ax} + c$
6. $\int \sin ax dx = -\frac{1}{a} \cos ax + c$
7. $\int \sin^2 ax dx = \frac{x}{2} - \frac{\sin 2ax}{4a} + c$
8. $\int \cos ax dx = \frac{1}{a} \sin ax + c$
9. $\int \cos^2 ax dx = \frac{x}{2} + \frac{\sin 2ax}{4a} + c$
10. $\int \cos ax \sin b x dx = \frac{\sin(a-b)x}{2(a-b)} - \frac{\cos(a+b)x}{2(a+b)} + c, \quad a \neq b$
11. $\int x \cos x dx = \cos x + x \sin x + c$
12. $\int x \cos ax dx = \frac{1}{a^2} \cos ax + \frac{x}{a} \sin ax + c$
13. $\int e^x \sin x dx = \frac{1}{2} e^x (\sin x - \cos x) + c$
14. $\int e^{bx} \sin ax dx = \frac{1}{a^2 + b^2} e^{bx} (b \sin ax - a \cos bx) + c$
15. $\int e^x \cos x dx = \frac{1}{2} e^x (\sin x + \cos x) + c$
16. $\int e^{bx} \cos ax dx = \frac{1}{a^2 + b^2} e^{bx} (b \sin ax + a \cos bx) + c$