

PRIPREMLIO: BRANKO PRENTIĆ, dip. el. inženjer
GORJANA ČERANIĆ, dip. el. inženjer

PRIRUČNIK

(ZBIRKA PITANJA I PROPISA)

ZA POLAGANJE STRUČNOG ISPITA I ISPITA RADNE
OSPOSOBLJENOSTI RADNIKA KOJI RADE NA POSLOVIMA
TEHNIČKOG RUKOVODENJA, TEHNIČKOG NADZORA I
RUKOVANJA ODREĐENIM ENERGETSKIM
POSTROJENJIMA

NIŠIĆ 1995.

OSNOVE ELEKTROTEHNIKE

ELEKTROSTATIKA

Elektrostatika je deo nauke o elektricitetu koji proučava naelektrisana tela u mirovanju, njihova uzajamna dejstva i fizičke procese u okolnom prostoru.

NAELEKTRISANJE. KULONOV ZAKON

Svoјstvo ćilibara i vunene tkanine da, nakon uzajamnog trenja, privlače lake deliće materije bilo je poznato još u antičkom dobu. Tek su broјna otkrića u XVII i XVIII veku omogućila brz razvoj nauke o elektricitetu. Ogledi su pokazali da se uzajamno dejstvo naelektrisanih tela uvek ispoljava pojavom mehaničkih sila, koje mogu biti privlačne i odbojne. Ovo se tumači postojanjem dve vrste elektriciteta, pozitivnog i negativnog. Električki neutralna tela obe vrste sadrže u jednakim količinama, pa se njihova dejstva poništavaju.

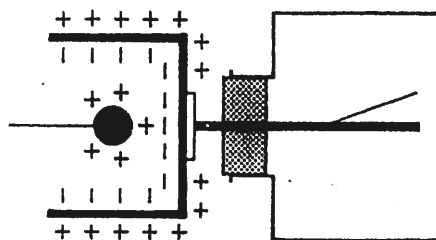
Isto kao ćilibar i vunena tkanina, i drugi materijali, koji se nazivaju izolatori ili dielektrici, mogu se naelektrisati trenjem i dodirnom. Ovde je bitan dodir, a trenjem se samo ostvaruje bolji kontakt i veće naelektrisanje. Dodirnom sa naelektrisanim telima mogu se, osim dielektrika, naelektrisati i drugi materijali koji se nazivaju provodnici i poluprovodnici.

Tela se mogu naelektrisati i bez neposrednog dodira, putem elektrostatičke indukcije. Elektrostatička indukcija je pojava razdvajanja pozitivnog i negativnog elektriciteta u nenaelektrisanom telu pod uticajem naelektrisanog tela koje se nalazi u njegovoj blizini.

Pomenuto svojstvo ćilibara objašnjava se tako što indukcija u lakim delićima materija izaziva razdvajanje (polarizaciju) naelektrisanja suprotnog znaka.

U poznatom ogledu (slika 2.1.) metalni listići elektroškopa se šire kada se naelektrisana loptica bez dodira unese u unutrašnjost metalne čaše, postavljene na kontrolnoj pločici elektroskopa. Usled elektrostatičke indukcije javlja se razdvajanje suprotnih vrsta elektriciteta. Ako bi kuglica dotakla dno čaše, došlo bi do neutralisanja elektriciteta na kuglici i unutrašnjoj strani, a preostao bi elektricitet na spoljašnjoj strani čaše.

Krajem XIX i početkom XX veka — otkrićem sastava atoma i upoznavanja svojstava elementarnih čestica: elektrona, protona i neutrona — potvrđena je električna priroda materije. Dok protoni



Sl. 2.1.

i neutroni ulaze u sastav jezgra atoma, elektroni kruže oko njega čineći tako ljudski atom. Elektron i proton su naelektrisane čestice i nose najmanje negativno odnosno pozitivno naelektrisanje koje se može naći u prirodi, jednako po apsolutnoj vrednosti. Zbog toga se ta količina naziva elementarni kvant naelektrisanja. *Popunatom se ponosa u odnosu na svoju okolinu električki neutralno, pošto se sastoji od jednakog broja elektrona i protona. Do naelektrisanja tela dolazi kada se ova ravnoteža poremeti.*

Svaka količina naelektrisanja Q , pozitivnog ili negativnog, koja se može naći u prirodi, može se iskazati kao celobrojni umnožak elementarnih količina električeta:

$$Q = \pm N e,$$

gde je e apsolutna vrednost naelektrisanja elektrona.

Jedinica količine naelektrisanja data je u čast francuskog fizičara Šarla Kulona i naziva se **kulon**. Označava se sa C i iznosi:

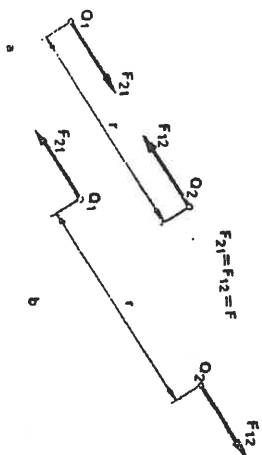
$$1 C = 6,242 \cdot 10^{18} e.$$

Eksperimentišući sa naelektrisanim telima veoma malih dimenzija, tzv. tačkastim naelektrisanjima, Kulon je (1785. god.) zaključio da je sila međusobnog dejstva srazmerna proizvodu količina električeta oba tela, a obrnuto srazmerna kvadratu njihovog rastojanja. Sila deluje duž linije koja najkraćim putem spaja tela, privlačna je ako su naelektrisanja suprotnog znaka (slika 2.2a), a odbojna ako su naelektrisanja istog znaka (slika 2.2b). U matematičkoj formi Kulonov zakon ima oblik:

$$F = k \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

gde je k konstanta proporcionalnosti koja zavisi od sredine i najreče je za vakuum ($k_0 = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$). Približno istu vrednost ima i konstanta vazduha. Umesto ove konstante često se upotrebljava izraz:

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon},$$



Sl. 2.2.

u kome je ϵ dielektrična konstanta. Za vazduh, odnosno vakuum ona približno iznosi:

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2.$$

ELEKTRIČNO POLJE. POTENCIJAL

Uzajamno delovanje naelektrisanih tela ostvaruje se kroz vakuum ili drugu materijalnu sredinu koja ih okružuje. Kulonove sile se ne javljaju neposredno i trenutno (teorija dejstva na daljinu), već posredstvom kvalitativno izmenjene sredine u okolini naelektrisanih tela. To naročito fizičko stanje u okolini naelektrisanog tela, koje se vidno manifestuje dejstvom sile na drugo naelektrisano telo, naziva se **električno polje**. Ako potiče od naelektrisanja u stanju mirovanja, polje se naziva **elektrostatičko**.

Jaćina električnog polja E može se izračunati na osnovu veličine elektrostatičke sile F koja u datoj tački polja dejstvuje na probnu količinu električeta Q_p . Probno naelektrisanje je pozitivno, tačkasto i dovoljno malo da sopstvenim poljem ne remeti ispitivano. Vektor jačine električnog polja definiše se kao količnik Kulonove sile kojom polje dejstvuje na probno naelektrisanje i samog tog naelektrisanja:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q_p}.$$

Vektor jačine električnog polja ima pravac i smer sile, a intenzitet mu je brojno jednak sili koja deluje na jedinično probno naelektrisanje.

Jaćina električnog polja, kao fizička veličina koja opisuje električno polje u nekoj tački, postoji nezavisno od prisustva i veličine probnog naelektrisanja. Primera radi, jačina polja E tačkastog naelektrisanja Q , na udaljenosti r iznosi:

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q}{r^2} : Q_p = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q}{r^2}.$$

U ovom slučaju jačina polja, kao i Kulonova sila, opada sa kvadratom udaljenosti od naelektrisanja.

Jedinica jačine električnog polja je:

$$E_u = \frac{F_u}{Q_u} = \frac{\text{njuton}}{\text{kulon}} = \frac{N}{C},$$

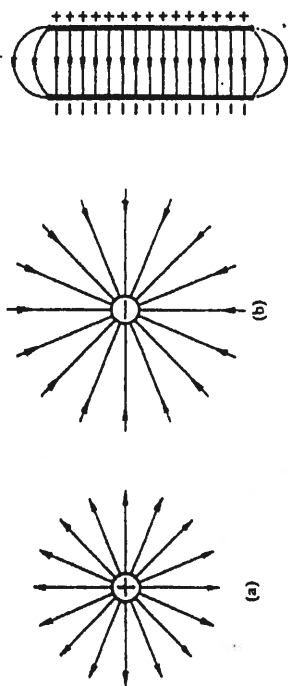
mada se u praksi upotrebljava ekvivalentna jedinica:

$$E_u = \frac{\text{volt}}{\text{metar}} = \frac{V}{m}.$$

Električno polje se može predstaviti na očigledan način pomoću linija polja. **Linije polja** su zamišljene linije, orijentisane u pravcu vektora polja, kojima je vektor polja u svakoj tački tangenta (slika 2.5). Polje je najjače tamo gde su linije polja najgušće. Na slici 2.3. prikazan je izgled radijalnog električnog polja koje se javlja u slučaju usamljenog tačkastog naelektrisanja, pozitivnog (slika 2.3a) ili negativnog (slika 2.3b).

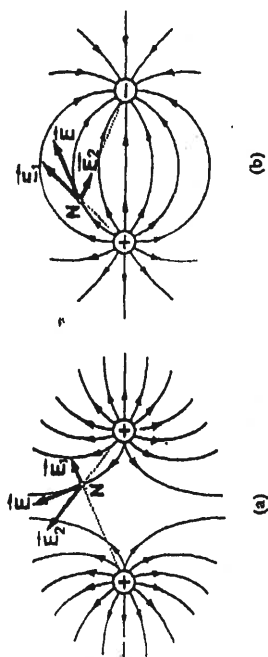
Električno polje koje u svakoj tački ima isti intenzitet, pravac i smer naziva se **homogeno električno polje**. Ovakvo polje postoji između dve ravne ploče koje su međusobno paralelne, na malom rastojanju i raznoimeno naelektrisane (slika 2.4).

Najčešće se sreće **nehomogeno električno polje**. Ako polje potiče od više naelektrisanih tela, rezultujuće polje se određuje principom superpozicije (zbir vektora pojedinačnih polja). Na slici 2.5a) dat je spektar polja dva jednaka tačkasta



Sl. 2.3.

naelektrisanja istog (pozitivnog) znaka, a na slici 2.5b) spektar polja dva tačkasta naelektrisanja suprotnog znaka jednaka po apsolutnoj vrednosti.



Sl. 2.5.

Linije električnog polja se nikada ne seku.

Probno naelektrisanje uneto u neku tačku električnog polja poseduje potencijalnu energiju W . Ono će se pod dejstvom Kulonove sile, $F = Q_p E$, kretati, pri čemu se njegova potencijalna energija smanjuje upravo za rad dobijen delovanjem sile F . Ukoliko spoljašnja sila, pri pomeranju probnog opterećenja, vrši rad savlađujući delovanje sile električnog polja, na račun uložene energije povećavaće se potencijalna energija probnog naelektrisanja. Ako se naka od tačaka polja uzme kao referentna, onda se sve druge tačke mogu energetski opisati skalarnom veličinom, nezavisnom od probnog opterećenja, koja se naziva **potencijal** posmatrane tačke u odnosu na referentnu:

$$V = \frac{W}{Q_p},$$

gde je W potencijalna energija probnog naelektrisanja računata u odnosu na referentnu tačku polja.

Jedinica potencijala je:

$$V_a = \frac{W_a}{Q_a} = \frac{J}{C} = \text{volt} = V.$$

Potencijal neke tačke električnog polja brojno je jednak radu koji bi izvršile električne sile pri pomeranju jediničnog opterećenja iz te tačke u referentnu.

Razlika potencijala između dve različite tačke električnog polja A i B naziva se **napon**:

$$U_{AB} = V_A - V_B = \frac{W_A - W_B}{Q_p} = \frac{A}{Q_p},$$

gde je sa A označen rad koji izvrše električne sile pri pomeranju tela naelektrisanja Q_p iz tačke A u tačku B.

Izbom druge referentne tačke (tačke nultog potencijala), potencijali svih tačaka menjaju se za isti iznos. To znači da razlika potencijala između dve tačke, odnosno napon, ne zavisi od izbora referentne tačke. Ovo se može lako razumeti pomoću sledeće analogije: ako se nivo svetskim mora poveća za jedan metar, sve visinske kote će se smanjiti za jedan metar, ali će zato sve razlike između pojedinih kota ostati nepromenjene.

Iz relacije 2.12. sledi:

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

$$A = Q_p U_{AB}.$$

Iz poslednjeg izraza može se odrediti jedinicu jačine električnog polja:

$$Q_a U_a = A_a = F_u \cdot l_u = Q_u \cdot E_u \cdot l_u,$$

odakle je:

$$E_u = \frac{U_u}{l_u} = \frac{V}{m}.$$

Pošto potencijal i napon imaju istu prirodu, jedinica napona je volt (V). Napon od jednog volta postoji između dveju tačaka polja ako pri pomeranju količine naelektrisanja od jednog kulona iz jedne u drugu tačku električne sile izvrše rad od jednog džula. Ovaj rad ne zavisi od izbora i oblika putanje, već od veličine naelektrisanja koje se pomera i položaja krajnjih tačaka.

ELEKTRIČNA KAPACITIVNOST

Između naelektrisanja usamljene provodne lopte (sfere) i njenog potencijala, računatog u odnosu na referentnu tačku u beskonačnosti, postoji linearna zavisnost:

$$Q = \frac{1}{k} R V = 4\pi\epsilon R V,$$

gde je R poluprečnik lopte. Zavisnost je linearna i kada elektroda nema loptast oblik. Naime,

$$Q = C V.$$

Koeficijent proporcionalnosti C naziva se električna kapacitivnost usamljenog provodnika. Definiše se kao količnik naelektrisanja i potencijala:

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

Kapacitivnost provodne lopte u vakuumu:

$$C = 4\pi\epsilon_0 R.$$

U opštem slučaju kapacitivnost zavisi samo od oblika usamljene elektrode i sredine u kojoj se ona nalazi.

Jedinica kapacitivnosti naziva se farad i obeležava simbolom F.

$$C_u = \frac{Q_u}{V_u} = \frac{C}{V} = farad = F.$$

Iz izraza 2.26 izvodi se jedinica za dielektričnu konstantu:

$$\epsilon_u = \frac{F}{m} = farad pometru,$$

kojasečesčeu potrebljavao dnoje kvivalentne $\epsilon_N m^2$.

ŠTETNO I OPASNO DEJSTVO STATIČKOG NAELEKTRISANJA U INDUSTRIJI

UVOD

Statičko naelektrisanje u industriji se javlja u eksploataciji svih tehnologija u kojima dolazi do kontakta i prekida kontakta dva različita materijala ili dva tela različitih osobina. Naelektrisanje je naročito intenzivno u procesima u kojima su brzine proizvodnje velike i u kojima se koriste materijali izraženih sposobnosti naelektrisanja.

Zbog prisustva generisanih statičkih naelektrisanja javljaju se sledeće smetnje: otežani radni procesi, nekvaleitna proizvodnja, smanjena brzina rada, loš kvalitet proizvoda, neprijatno dejstvo na manipulativno osoblje, požar i eksplozija u ugroženim tehnologijama, štetno i opasno dejstvo na čoveka itd. Zbog toga nastaju velike štete, pa je sasvim razumljivo što se ulažu veliki napori da se uklone nepoželjne neprijatnosti, koje donosi prisustvo statičkog naelektrisanja.

Bitan preduslov da se ovi problemi reše kvaliteitno i dugoročno je poznavanje osnovnih elektrostatičkih odnosa i zakonitosti. Pouzdana i kvaliteitna rešenja dobijaju se standardizacijom zahteva proizvodnje, opštom racionalizacijom pomoću odgovarajućih tehničkih mera, boljom organizacijom eksploatacije postojećih tehnologija i eliminacijom odgovarajućim eliminatorima.

GENERISANJE STATIČKIH NAELEKTRISANJA

Statička naelektrisanja se javljaju u industriji u kontaktnim procesima, gde su dva različita materijala dovedena u kontakt a potom odvojena, pri čemu svaki odnosi sa sobom jednaku količinu naelektrisanja suprotnog polariteta. Provođna tela mogu biti naelektrisana i usled indukcije, ako se nalaze u blizini naelektrisanih tela. Provođljivi objekti mogu takođe da prime naelektrisanje direktnim kontaktom od drugih naelektrisanih objekata ili ako se nađu u direktnoj struji jona.

Kontaktni procesi naelektrisanja mogu se javiti kod kontakata tela raznorodnih fizičkih osobina i agregatnog stanja: čvrsto — čvrsto, tečno — tečno i čvrsto — tečno. Gasovite materije se ne mogu naelektrisavati na ovaj način, ali ako sadrže sitne čestice prašine ili sitne kapljice tečnosti mogu se naelektrisati kontaktnim procesima kod različitih kretanja.

Kada su dva različita čvrsta materijala, sa nejednakim energetskim jamama, ne naelektrisana i nalaze se na potencijalu zemlje, dovedena u kontakt, između njih se javlja kontaktni potencijal oko 1 V. Kako je rastojanje između navedena dva

— **Papirna industrija:** kod izrade papirne folije, obrade papira i rezanja papira, statičko naelektrisanje utiče na nepravilno slaganje papirne folije ili listova papira, a namotavanjem papirne folije u papirne tambure nagomilava se statičko naelektrisanje, tako da se pojavljuju velike jačine polja, pri čemu dolazi do proboja dielektrika i do veoma neprijatnog pražnjenja na mašinama.

— **Tekstilna industrija:** statičko naelektrisanje dovodi do nepravilnog snovanja, a sačinim tim i do uništenja osnovne, nepravilnog tkanja, skupljanjem prašine pogoršava kvalitet proizvoda i slično.

Osime navedenih tehnologija, statičko naelektrisanje se javlja u filmskoj industriji, gde oštećuje filmsku traku, u industriji eksploziva, bezdimnih i crnih baruta, vojne i civilne municije gde predstavlja latentnu opasnost od eksplozije, u operacijama onim salama, u industriji plastičnih masa, itd.

Određena količina naelektrisanja koja se može nakupiti i na čoveku, može biti dovoljna, da se pri kontaktu sa uzemljenim delovima mašina, uzemljenim predmetima ili u kontaktu dva čoveka koji se nalaze na različitim potencijalima, pojavi pražnjenje varnicom.

Čovek, izolovan od zemlje, može biti na potencijalu $10 \div 15$ kV u odnosu na zemlju. Kapacitivnost ljudskih tela kreće se od $100 \div 300$ pF. Maksimalna energija koja se može nakupiti na čoveku i koja se može prazniti varnicom iznosi $5 \div 25$ mJ. Ova energija je dovoljna da zapali sve eksplozivne smeše para lako zapaljivih tečnosti i zapaljivih gasova sa vazduhom, a takođe i veći broj smeša zapaljivih prašina sa vazduhom.

Pored navedenih opasnosti od pražnjenja ljudskog tela varnicom određene energije, javlja se fiziološko dejstvo tih varnica na čoveka. Ovo dejstvo se manifestuje, zavisno od energije varnice, u obliku slabog, osrednjeg ili jakog uboda ili udara. Ovi ubodi ili udari nijesu opasni po život čoveka jer je energija pri ovom pražnjenju veoma mala (reda desetak mJ). Međutim, ova pražnjenja mogu izazvati nekontrolisane pokrete u blizini nezaštićenih rotirajućih delova mašina, pri čemu može doći do mehaničkih povreda, pada sa visine i sl.

Dugotrajno dejstvo navedenih pražnjenja naelektrisanja varnicom može štetno uticati na zdravlje čoveka i izazvati oboljenje nervnog sistema.

Pored ovog dejstva statičkog elektriciteta na čoveka, može se pretpostaviti da jako elektrostatičko polje pogoršava zdravstveno stanje osoblja koje manipuliše u blizini naelektrisanih mašina i materijala.

Iako do danas nijesu vršena ispitivanja u ovoj oblasti, može se po analogiji zaključiti, da je dejstvo jakih elektrostatičkih polja slično dejstvu električnih polja industrijske frekvencije, jer se u oba slučaja javlja indukovana struja, koja otiče u zemlju kapacitivnim putem, ili putem direktnog kontakta sa zemljom ili uzemljenim telom.

U stručnoj literaturi [5] i u nekim propisima (Japan, Rusija) navodi se, da indukovane struje od $50 \mu A$, kojima odgovara jačina električnog polja 5 kV/m, su granične vrednosti indukovanih struja koje ne zahtevaju posebne zaštitne mere na radnom mestu. Za sve veće indukovane struje treba sprovesti zaštitu od štetnog dejstva elektrostatičkog polja. Ova zaštita se izvodi odecom za ekranizaciju polja ili posebnim zaklonima (ekranima).

materijala u kontaktu reda $d = 2 \times 10^{-7}$ m, kontaktni potencijal obezbeđuje dovoljnu jačinu polja da negativna naelektrisanja iz energetske jame sa višim energetskim nivoom pređe u energetsku jamu sa nižim nivoom, pri čemu jedan materijal dobija elektrone a drugi šupljine. Kod veoma brzog razdvajanja ovih materijala naelektrisanja zadržavaju svoj novi položaj, tako da su materijali naelektrisani istom količinom naelektrisanja suprotnog polariteta. Kako je u ovom procesu količina naelektrisanja $Q = \text{const}$ kod razdvajanja kapacitivnost opada i potencijalna razlika raste, tj. kontaktni potencijal od 1 V naraste na potencijalnu razliku od nekoliko desetina kV. Ako bi se razdvajanje materijala odvijalo veoma sporo, naelektrisanja bi imala vremena da se vrate u svoj prvobitni položaj i materijali bi ostali električno neutralni. Praktično, kontakt naelektrisanje materijala je moguće u tehnološkim procesima u kojima je kontakt raznorodnih materijala dovoljno dug da naelektrisanja pređu u druge energetske jame, a vreme razdvajanja toliko kratko da se naelektrisanja ne mogu vratiti u svoje prvobitne položaje. U Rusiji smatraju da kod veoma brzih tehnoloških procesa (brzina kretanja materijala iznad 100 m/s) kontakt dva raznorodna materijala je veoma kratak, tako da ne može doći do prelaska naelektrisanja iz jedne jame u drugu, a to znači da do naelektrisanja uopšte ne može doći [5].

Kontakt naelektrisanje u tečnostima se javlja usled prisustva određene količine jona. Joni jednog polariteta se prikupljaju na površini razdvajanja, privlačeći jone suprotnog polariteta koji formiraju difuzni sloj u blizini površine razdvajanja. Ako se tečnost relativno kreće u odnosu na kontaktnu površinu, ona će odnositi sa sobom naelektrisani difuzni sloj, i na taj način doprineti razdvajanju naelektrisanja na kontaktnoj površini, što dovodi kao i u slučaju čvrstih tela, do pojave velikih razlika potencijala generisanih izvršenim radom pri razdvajanju. Ovi procesi se javljaju u slučaju veza čvrsto — tečno i tečno — tečno telo.

Statičko naelektrisanje u tečnostima se javlja u procesu pretakanja tečnosti kroz cevnu instalaciju, gde dolazi do razdvajanja pojedinih slojeva tečnosti zbog nejednake brzine kretanja tečnosti u cevima, odnosno slojevi tečnosti bliži površini cevi imaju manju brzinu kretanja od slojeva u sredini cevi. To dovodi do raslojavanja tečnosti, razdvajanja između pojedinih slojeva i do naelektrisanja. U tečnostima se javlja statičko naelektrisanje i pri filtriranju tečnosti, punjenju rezervoara, pretakanja iz jedne posude u drugu i sl.

Nosioci statičkih naelektrisanja mogu biti i ljudi u određenom tehnološkom procesu ako su izolovani od zemlje i ako se mogu naelektrisati u kontaktu sa mašinama koje intenzivno generišu statičko naelektrisanje, indukcijom, kretanjem po izolacionom podu i sl.

OPASNO I ŠETNO DEJSTVO STATIČKIH NAELEKTRISANJA

Tehnologije u kojima se javljaju određene smetnje zbog prisustva velike količine statičkih naelektrisanja su:

— **Grafička industrija:** kod pripreme štamparske forme, pripreme štampe i same štampe. Kod štampe sa bojom vrlo često dolazi do eksplozije eksplozivne smeše para rastvarača sa vazduhom. Ove eksplozije se nastavljaju požarom i dovode do konačnog uništenja štamparskih mašina.

Statističko naelektrisanje kao uzročnik požara i eksplozije

Najozbiljnija prateća pojava prisustva generisanih statičkih naelektrisanja je mogućnost izazivanja požara i eksplozije elektrostatičkom varnicom. Mogu se zapaliti skoro sve zapaljive materije u smeši a vazduhom u određenim zapreminskim ili težinskim odnosima.

Na taj način statički elektricitet može biti uzročnik velikih šteta i neopratičnosti u privredi, pa je neophodno ovom problemu posvetiti posebnu pažnju. Pošto je kod različitih materijala mogućnost paljenja i eksplozije različita, to je potrebno ukratko se osvrnuti na osobine zapaljivih materijala.

Svaki organski materijal je zapaljiv jer uvek u sebi sadrži ugljenik, po pravilu vodonik, azot, sumpor i druge elemente. Od neorganskih materijala zapaljivo je nekoliko elemenata nemetala, metala kao i njihovih jedinjenja.

Zavisno od hemijskog sastava, zapaljivost materijala može biti jača ili slabija. Pod eksplozivnim materijalom podrazumevamo one koji sadrže takve grupe, koje ubrzavaju gorenje i istovremeno povećavaju pritisak i pojavu toplote. Pod izvesnim okolnostima svaki zapaljivi materijal može biti eksplozivan. Gorenje i eksplozija su monomolekularne ili bimolekularne reakcije. Brzina gorenja i eksplozije zavise od hemijskog sastava i fizičkih osobina materijala kao i od temperature.

Sa porastom temperature materijal brže gori. Hemijisti mogu zajednički direktno reagovati samo joni, slobodni atomi i slobodni radikali. Ako želimo u molekulima da izazovemo reakciju potrebno je dovesti izvesnu energiju potrebnu za razdvajanje molekula na atome i slobodne radikale.

Kako će napredovati nastala reakcija zavisi od toga da li se materijal lakše ili teže raspada na svoje sastavne delove, kao i od toga koliko će se energije pri reakciji osloboditi. Za vreme gorenja se obično oslobađa toplota koja prouzrokuje nova raspadanja i novu pojavu reakcije pri čemu se stalno povećava broj reagujućih atoma. Povećavanjem količine toplote ubrzava se gorenje. Pošto je odvođenje toplote iz prostora u kome se odvija gorenje sporije od količine generisane toplote, to se temperatura u prostoru stalno povećava i sagorevanje ubrzava. Kada brzina gorenja dostigne određenu vrednost, pojavljuju se određeni zvučni efekti, povećava se pritisak i gorenje prelazi u eksploziju.

U pogledu nastajanja eksplozivne smeše i stepena opasnosti razvrstavamo isparenja i gasove u tri osnovne grupe paljenja:

- U prvu, najmanje opasnu grupu, spadaju pare lako zapaljivih tečnosti i gasova čija donja granica eksplozivnosti leži iznad 10%. Tu spadaju amonijak, generatorski gas i sl.
- U drugu grupu ubrajamo isparenja i gasove čija donja granica eksplozivnosti leži između 4 i 10%. U ovu grupu spadaju svedeli gas, vodonik, metan, sumpor vodonik, metilalkohol i dr.
- U treću grupu spadaju pare lakozapaljivih tečnosti i gasova čija donja granica eksplozivnosti leži ispod 4% i čije plamnište leži ispod 21 °C. Od tehnički važnih materijala ovoj grupi pripadaju acetalen, laki benzin, alkohol, aceton, etiletar, ugljendisulfid i dr.

Na stepen opasnosti od eksplozije utiče takođe i prostor u kome može doći do nastajanja eksplozivne smeše.

Postoji mnogo čvrstih materijala, koji u vazduhu uzvratili mogu pod izvesnim uslovima obrazovati eksplozivnu smešu.

JEDNOSMERNE STRUJE

Elektrokinetika je deo nauke o elektricitetu koja proučava usmerena kretanja električnih opterećenja, odnosno električne struje, kao i dejstva koja ta kretanja izazivaju u električnim kolima i van njih. Vremenski konstantne električne struje kraće se nazivaju jednosmerne ili stalne struje.

ELEKTRIČNA STRUJA. PRVI KIRHOFOV ZAKON

Svako usmereno kretanje naelektrisanih čestica naziva se električna struja. Prema vrsti pokretnih opterećenja, može biti elektronska (u metalnim provodnicima) i jonska (u elektrolitima i gasovima). Za nastanak i održavanje jednosmerne struje u provodnicima mora postojati stacionarno električno polje. Ono se razlikuje od elektrostatičkog upravo po tome što deluje i u unutrašnjosti provodnika. Na primeru opterećenog pločastog kondenzatora može se pokazati da elektrostatičko polje izaziva samo kratkotrajno proticanje elektriciteta (slika 3.1.).

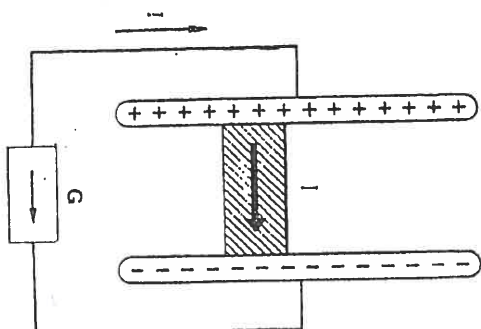
Ako se elektrode kondenzatora spoje provodnikom (šrafrana površina), u njemu će se javiti električna struja. Ali, pri svakom prelasku elektrona sa negativne na pozitivnu pololu, razlika potencijala i električno polje slabe, struja se smanjuje i potpuno prestaje teći kada se ploče razelektrišu.

Da bi struja bila stalna, potrebno je održavati stalnu razliku potencijala i stalno električno polje. To se postiže priključivanjem kondenzatora na električni uređaj koji, nasuprot silama stacionarnog električnog polja, sve pripisane elektrone sa pozitivne vrata na negativnu elektrodu. Ovakav uređaj naziva se strujni izvor, odnosno generator.

Veličina koja kvantitativno karakteriše električnu struju naziva se jačina struje i obeležava simbolom I . Jačina struje brojno je jednaka količini elektriciteta koja protokne kroz poprečni presek provodnika u jedinici vremena:

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

To je skalarna veličina kojoj se pripisuje i određeni smer u odnosu na provodnik. Konvencij-



Sl. 3.1.

jom je usvojeno da smer struje u provodniku bude od kraja na višem (pozitivnom) potencijalu ka kraju na nižem (negativnom) potencijalu, dakle suprotno stvarnom kretanju elektrona.

Pomoću jedinice jačine struje:

$$I_u = \text{amper} = A,$$

osnovne jedinice internacionalnog sistema jedinica (SI), o čijoj definiciji će biti reči kasnije, definiše se jedinica količine naelektrisanja:

$$Q_u = I_u \cdot t_u = A \cdot s = C.$$

Kulon je količina naelektrisanja koja protekne u jednoj sekundi kroz poprečni presek provodnika sa stalnom strujom jačine jednog ampera.

Brzina usmerenog kretanja slobodnih elektrona u metalnim provodnicima je veoma mala (na primer, u bakarnom provodniku preseka 1 mm^2 pri jačini struje od 1 A prosečna brzina je oko $7 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$), ali je brzina uspostavljanja struje jednaka brzini svetlosti.

Pored jačine struje često se u elektrotehnici koristi i gustina električne struje, označava se sa J . Ona je brojno jednaka jačini struje protokle kroz jedinični poprečni presek provodnika, tj. dobija se kao količnik jačine struje I i preska S :

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

Jedinica za gustinu struje u internacionalnom sistemu je amper po kvadratnom metru (A/m^2). S obzirom na vrlo male preseke provodnika koristi se jedinica amper po kvadratnom milimetru (A/mm^2).

Postojanje struje u provodniku ne može se neposredno posmatrati, ali se manifestuje nizom različitih pojava koje struja izaziva u samom provodniku i u okolnom prostoru. Najvažnija dejstva struje su:

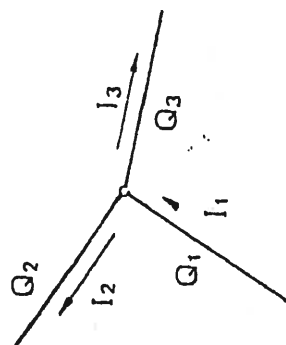
- toplošno, koje se ispoljava u zagrevanju provodnika kroz koje teče struja;
- magnetno, koje se ispoljava u pojavi magnetnog polja u blizini provodnika (jedan od najznačajnijih magnetnih efekata je mehaničko dejstvo elektromagnetnih sila);
- hemijsko, koje se ispoljava u pojavi elektrolize pri proticanju struje kroz elektrolite; i
- svetlosno dejstvo kao posledica drugih fizičkih procesa.

U električnim mrežama često se na jednom mestu granaju tri ili više provodnika. Za takvo mesto, koje se naziva čvor, važi zakon održanja količine naelektrisanja koji kaže da ukupna količina naelektrisanja koja u nekom vremenu pritekne u čvor mora biti jednaka ukupnoj količini naelektrisanja koja za isto vreme istekne iz čvora. Za čvor na slici 3.2. može se napisati:

$$Q_1 = Q_2 + Q_3.$$

Ako se relacija 3.4. podeli sa vremenom t , dobija se:

$$I_1 = I_2 + I_3.$$



Sl. 3.2.

To znači da je zbir struja koje imaju smer ka čvoru jednak zbiru struja koje imaju smer od čvora. Relacija 3.5. česće se piše kao:

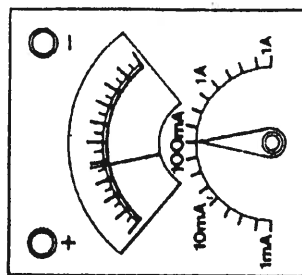
$$I_2 + I_3 - I_1 = 0.$$

Odnosno u opštem slučaju čvora sa n provodnika:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0.$$

Ovaj izraz predstavlja prvi Kirhofov zakon, koji, iskazan rečima, glasi: algebarski zbir jačina struja koje se susreću u nekom čvoru jednak je nuli. Pri tome se jačine struja čiji su referentni smerovi ka čvoru sa negativnim znakom. Referentni smer je pretpostavljeni smer, u odnosu na koji računata jačina struje može biti i negativnog znaka. To znači da je stvarni smer takve struje suprotan referentnom smeru.

Za merenje jačine električne struje upotrebljavaju se instrumenti koje nazivamo ampermetrima. Postoji više vrsta ampermetara, zavisno od toga na kom dejstvu struje se zasniva princip njihovog rada, ali su najčešće korišćeni oni koji rade na dejstvu elektromagnetne sile, o čemu će biti više reči kasnije. Da bi se u nekom preseku strujnog provodnika izmerila jačina struje, on se na tom mestu mora raskinuti, kako bi ampermetar bio vezan redno, tako da struja koja se meri prolazi kroz njega. Krajevi ampermetra su obično obeleženi sa $+$ i $-$, pri čemu se priključak $+$ vezuje na kraj provodnika koji je na višem potencijalu. Ampermetar se konstruiše tako da svojim prisustvom što manje remeti jačinu struje koju meri. U električnim shemama ampermetar se označava kružicom u kome je upisano slovo A (slika 3.3a.). Na slici 3.3b. dat je uprošćen izgled jednog ampermetra sa više mernih domaćaja.



Sl. 3.3.

OMOV ZAKON. ELEKTRIČNA OTPORNOST

Da bi jačina struje u nekom metalnom provodniku bila stalna (slika 3.4.) potrebno je na njegovim krajevima održavati razliku potencijala, odnosno naponu. Ako bi se vrednost napona menjala, srazmerno bi se menjala i jačina struje. Linearnu zavisnost jačine struje i napona datu relacijom: $I = \frac{U}{R}$.

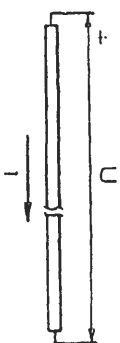
odnosno ekvivalentnim relacijama:

$$U = R I \quad \text{ i } \quad R = \frac{U}{I},$$

a zavisnost je eksperimentalnim putem utvrdio nemački fizičar Ohm, pa se ona naziva Ohmov zakon. Veličina R naziva se električna otpornost.

Jedinica otpornosti je na osnovu izraza 3.9.:

$$R_u = \frac{U_u}{I_u} = \frac{V}{A} = \Omega = \text{ohm}.$$



Sl. 3.4.

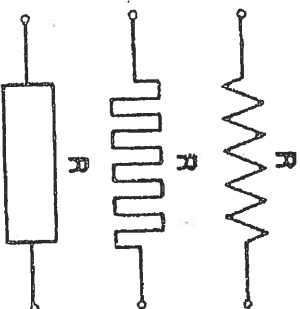
Otpornost od jednog oma ima onaj provodnik kod koga struja jačine jednog ampera stvara napon između njegovih krajeva od jednog volta.

Dobri provodnici električne struje, čija je otpornost zanemarljiva u odnosu na otpornosti drugih elemenata, označavaju se u električnim shemama izvučenim punim linijama. Elementi sa izraženom otpornošću R nazivaju se otpornici i predstavljaju jedan od sledeća tri simbola, na slici 3.5.

Na Ohmovom zakonu zasniiva se merenje napona pomoću voltmetra. Najčešće se voltmetar gradi od redne veze veoma osetljivog ampermetra (tzv. galvanometra) i otpornika velike otpornosti (slika 3.6a.). Veza između napona koji se meri i struje na koju reaguje instrument je:

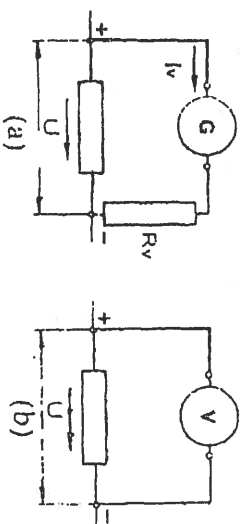
$$I_v = \frac{U}{R_v},$$

gde je R_v ukupna otpornost dodatnog otpornika i galvanometra. Skala instrumenta se baždari po naponu U .



Sl. 3.5.

U električnim shemama voltmetar se označava bez dodatog otpornika kružicom u kome je upisano slovo V (slika 3.6b.). Voltmetar se priključuje paralelno elementu na čijim krajevima se meri napon i da bi ga što manje remetio, potrebno je da otpornost voltmetra bude što veća. Kraj voltmetra obeležen sa + priključuje se na tačku koja je na višem potencijalu (slika 3.6b.).



Sl. 3.6.

Pri stalnoj temperaturi otpornost žičanog provodnika srazmerna je njegovoj dužini l , a obrnuto srazmerna površini poprečnog preseka S :

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

gde je koeficijent srazmernosti ρ fizička veličina koja zavisi od vrste provodnog materijala i naziva se specifična električna otpornost. Iz gornjeg izraza može se izvesti jedinica specifične otpornosti:

$$\rho_u = \Omega \mu.$$

Specifična otpornost metalnih provodnika u ograničenom temperaturnom području najčešće linearno raste sa porastom temperature:

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha_0 (T - T_0)]$$

gde je α_0 temperaturni koeficijent otpornosti. Na tabeli 3.1. prikazane su specifične otpornosti ρ_0 i temperaturni koeficijenti α_0 najčešće upotrebljivanih materijala u elektrotehnici na uobičajenoj temperaturi $T_0 = 20^\circ \text{C}$.

Tabela 3.1.

Materijal	Specifična otpornost $\Omega \text{ m}$	Temperaturni koeficijent $1/^\circ \text{C}$
Srebro	$1,5 \cdot 10^{-8}$	0,0038
Bakar	$1,7 \cdot 10^{-8}$	0,004
Aluminijum	$2,6 \cdot 10^{-8}$	0,004
Gvožđe	$10 \cdot 10^{-8}$	0,005
Grafit	$3500 \cdot 10^{-8}$	-0,0005
Konstantan	$49 \cdot 10^{-8}$	0,000002
Manganin	$44 \cdot 10^{-8}$	0,000000

DŽULOV ZAKON. ELEKTRIČNI RAD I SNAGA

Već je spomenuto da je jedno od veoma važnih dejstava električne struje njeno toplotno dejstvo, odnosno zagrevanje provodnika kroz koji protiče struja. Pojava se može fizički objasniti tako što se slobodni elektroni, koji se na određenoj temperaturi kreću haotično, na račun rada sile električnog polja dodatno usmeravaju i ubrzavaju, povećavajući svoju kinetičku energiju. Prilikom sudara sa jonima kristalne rešetke, deo ove energije se transformiše u toplotnu energiju provodnika.

Mereći oslobođenu toplotnu energiju kalorimetrom, engleski fizičar Džul je eksperimentalno pokazao da je ona srazmerna kvadratu jačine struje i vremenu u kome se proces posmatra, ako i električnoj otpornosti provodnika, odnosno:

$$W_j = R I^2 t.$$

Do ove relacije, poznate kao **Džulov zakon**, može se doći polazeći od izraza za rad sile električnog polja:

$$A = UQ = UI t = R I^2 t = \frac{U^2}{R} t = W_j.$$

To znači da se u slučaju otpornika kao prijemnika praktično sav električni rad transformiše u toplotu.

Primena toplotnog dejstva električne struje je raznovrsna. U domaćinstvima se koriste mnogi termički uređaji, kao što su: električni štednjak, rešo, grejalica, bojler, termoakumulaciona peć, mašina za pranje rublja, itd.

Radi zaštite od pregrevanja provodnika i topljenja izolacije, u električnim kolima se ugrađuju topljivi osigurači. Njihova uloga je da kod kritičkih vrednosti jačine struje, usled Džulovog efekta, izazovu kontrolisan prekid strujnog kola (topljenje osigurača).

Brzina kojom se transformiše električna energija u toplotu, odnosno rad u jedinici vremena, predstavlja električnu snagu (snaga Džulovog efekta):

$$P = \frac{A}{t} = UI = R I^2 = \frac{U^2}{R}.$$

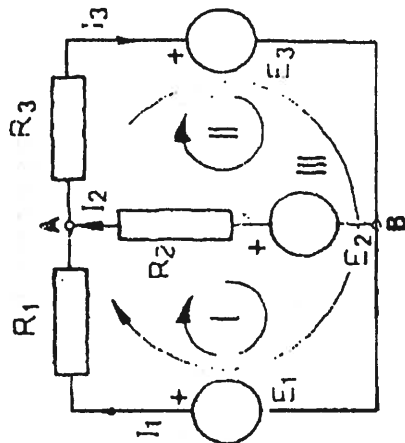
Jedinica za električnu snagu je vat (W), ali se na osnovu gornjeg izraza u nekim slučajevima koristi ekvivalentna jedinica volt—amper (VA). Isto tako, umesto jedinice za energiju i rad džul (J) upotrebljava se ekvivalentna jedinica vatssekunda (Ws), a u distribuciji električne energije i kilovatčas:

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

SLOŽENO KOLO. DRUGI KIRHOFOV ZAKON

U praksi češće se sreću složene veze izvora ems i otpornika koje se nazivaju složenim električnim kolima (električnim mrežama). Na slici 3.18. prikazano je jedno složeno kolo.

Mesta u kolu gde se spajaju najmanje tri provodnika nazivaju se čvorovi, a redna veza elemenata, koja povezuje dva čvora i kroz koje teče ista struja, naziva



Sl. 3.18.

se grana. Kontura (petlja) je zatvorena putanja duž grana kola. Složeno kolo na slici 3.18. ima dva čvora (A i B), tri grane (sa strujama I_1 , I_2 i I_3) i tri konture (I, II i III).

Drugi Kirhofov zakon ekvivalentan je relaciji 3.44. primenjenoj na jednu od kontura složenog kola, i glasi: algebarski zbir svih električnih sila u jednoj konturi složenog kola jednak je nuli. Matematički se iskazuje kao:

$$\sum E - \sum I R = 0.$$

Za razliku od izraza 3.44, u ovom izrazu struja ne mora imati istu jačinu.

Prilikom primene drugog Kirhofovog zakona treba se pridržavati sledećih pravila. Na odabranoj konturi proizvoljno se izabere smer obilaženja i označi strelicom. Elektromotorne sile treba unositi sa pozitivnim algebarskim znakom ako im se smerovi podudaraju sa smerom obilaženja, odnosno sa negativnim znakom ako su im smerovi suprotni. Napone na pojedinačnim otpornicima treba unositi sa pozitivnim algebarskim znakom ako su referentni smerovi struja suprotni smeru obilaženja, odnosno sa negativnim znakom ako im se smerovi podudaraju. Ista pravila važe i prilikom određivanja napona između dve tačke u složenom kolu (npr. U_{AB}).

Kada su svi elementi složenog kola poznati, rešavanje tog kola svodi se na nalaženje jačina struja u svim njegovim granama. Jedna od metoda za rešavanje složenih kola jeste i primena prvog i drugog Kirhofovog zakona. Broj nezavisnih jednačina treba biti jednak broju grana u kolu.

Broj jednačina koje se pišu po prvom Kirhofovom zakonu za jedan je manji od broja čvorova. Preostale jednačine pišu se po drugom Kirhofovom zakonu. Prilikom odabiranja kontura treba voditi računa da svaka sadrži makar jednu granu koja ne pripada drugim konturama.

Za kolo na slici 3.18. prvo su postavljeni referentni smerovi struja u granama. Pose toga proizvoljno je odabran jedan od dva čvora — čvor A za koji se piše jednačina po prvom Kirhofovom zakonu:

$$A) \quad I_3 - I_1 - I_2 = 0.$$

(Istovetna jednačina bi se dobila i za čvor B, pa je jasno zbog čega se izostavlja jedan čvor).

Od tri konture samo dve su nezavisne, pa su proizvoljno izabrane i orijentisane konture I i II, za koje se pišu jednačine po drugom Kirhofovom zakonu:

$$I) \quad E_1 - R_1 I_1 + R_2 I_2 - E_2 = 0.$$

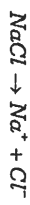
$$II) \quad E_2 - R_2 I_2 + R_3 I_3 - E_3 = 0.$$

(Sabiranjem ove dve jednačine dobila bi se jednačina za konturu III, pa je jasno zbog čega nije nezavisna).

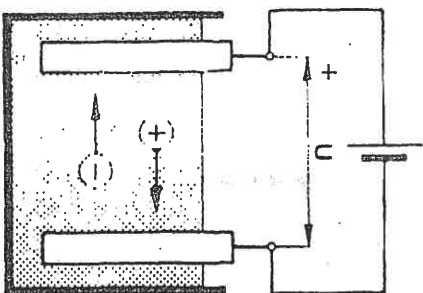
Preostaje da se reši sistem od tri jednačine sa tri nepoznate.

ELEKTROLIZA

Tečni rastvori kiselina, baza i soli dobro provode električnu struju i nazivaju se elektroliti. Pokrećljiva opterećenja u elektrolitima su joni nastali u procesu elektrolitičke disocijacije, odnosno razlaganja izvesnog broja polarnih molekula. Na primer, neutralni molekul NaCl (kuhinjska so) u vodenom rastvoru razlaze se na pozitivan jon natrijuma, Na^+ , i negativan jon hlora, Cl^- ,



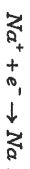
Polarnost molekula NaCl posledica je prelaska jedinog valentnog elektrona natrijuma u elektronski omotač hlora koji ima sedam valentnih elektrona. Za razliku od metalnih provodnika, kod kojih kretanje elektrona nije praćeno nikakvim hemijskim promenama, u elektrolitima su takve promene neizbežan pratilac proticanja električne struje. Zbog toga se elektroliti nazivaju i provodnicima druge vrste. Specifična provodnost elektrolita raste sa temperaturom (povećava se disocijacija, a smanjuje viskoznost), pa im je temperaturni koeficijent otpornosti negativan.



Sl. 3.19.

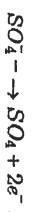
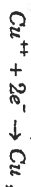
Ako se u posudu sa elektrolitom, tzv. voltametar, urone dve metalne ili grafitne elektrode i priključe na izvor električnog napona (slika 3.19), pod uticajem uspostavljenog električnog polja nastaje kretanje jona u elektrolitu. Pozitivni joni se kreću u pravcu i smernu polja — prema negativnoj elektrodi, odnosno katodi, pa se nazivaju katijoni (joni metala ili vodičnika). Negativni joni se kreću u suprotnom smeru — prema pozitivnoj elektrodi, odnosno anodi, pa se nazivaju anijoni (radikali). Ova pojava se naziva elektroliza.

Po dolasku na anodu anijoni predaju višak elektrona i prelaze u neutralne atome. Po dolasku na katodu katijoni se neutrališu oduzimanjem slobodnih elektrona. U slučaju kuhinjske soli, biće:

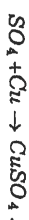


Konačan rezultat je izdvajanje na elektrodama natrijuma i hlora.

U nekim slučajevima, na primer, kod sulfata bakra $\text{CuSO}_4 \rightarrow \text{Cu}^{++} + \text{SO}_4^{--}$, neutralizovani joni stupaju u sekundarne hemijske reakcije sa elektrodama ili elektrolitom:



Dok je elektroliza bakra završena, radikal SO_4 je hemijski veoma aktivan i stupa u hemijsku reakciju sa anodom od bakra:



stvarajući pri tome sulfat bakra i održavajući tako njegovu koncentraciju u elektrolitu. Ako bi anoda bila od grafita, radikal SO_4 stupa u hemijsku reakciju sa vodenim rastvaračem:



Faradej je ustanovio, eksperimentalnim putem, dva osnovna zakona elektrolize. Prvi Faradejev zakon glasi: masa supstance m , koja se izdvoji na bilo kojoj elektrodi, srazmerna je količini elektriciteta (Q), koja protekne kroz elektrolit:

$$m = K Q,$$

gde je K konstanta srazmernosti i naziva se elektrohemijski ekvivalent. Prema relaciji 3.54, jedinica elektrohemijskog ekvivalenta je $\text{Kg} = \text{kilogram/kulon} = \text{kg/C}$. Drugi Faradejev zakon glasi: elektrohemijski ekvivalent elektrolizom izdvojenih supstanci K srazmeran je njihovim hemijskim ekvivalentima A/z :

$$K = \frac{1}{F} \frac{A}{z}$$

gde je konstanta srazmernosti $1/F$ ista za sve supstance i jednaka recipročnoj vrednosti tzv. Faradejeve konstante: $F = 96500 \text{ C}$. Hemijski ekvivalent je odnos relativne atomske mase A , i valencije atoma elementa ili atomske grupe.

Oba Faradejeva zakona mogu se dati u jednoj relaciji:

$$m = \frac{A}{z} \frac{Q}{F}$$

Pri istoj protokloj količini elektriciteta, mase izdvojenih elemenata odnose se kao njihovi hemijski ekvivalenti:

$$m_1 : m_2 = \frac{A_1}{z_1} : \frac{A_2}{z_2}$$

Tabela 3.2.

Elementat	A	z	K (kg/C)
Vodonik	1,008	1	$1,045 \cdot 10^{-8}$
Kiseonik	16,000	2	$8,293 \cdot 10^{-8}$
Hlor	35,46	1	$3,675 \cdot 10^{-7}$
Bakar	63,57	2	$3,294 \cdot 10^{-7}$
Srebro	107,9	1	$1,118 \cdot 10^{-6}$

U tabeli 3.2. dati su elektrohemijski ekvivalenti, atomske mase i valencije za nekoliko elemenata.

Primena elektrohemijskog dejstva struje odnosno elektrolize u tehnici je široka. Pomenućemo najvažnije.

Galvanoplastika je postupak izrade metalnih otisaka reljefnih modela od voska ili parafina. Površina modela se pokrije slojem grafitnog praha i uroni u elektrolytičku kadu. Elektrolizom će se nataložiti reljefan sloj metala.

Galvanostegija je postupak kojim se, pomoću elektrolize, na površinu metalnih predmeta nanosi tanak sloj drugog metala (pozлата, cinkovanje, niklovanje, hromiranje, i dr.).

Precišćavanje metala je postupak kojim se sa anode, izrađene od metala sa primesama i uronjene u elektrolytički rastvor soli istog metala, čist metal, posredstvom elektrolize, taloži na katodi izrađenoj od istog metala bez primesa.

Elektrometalurgija je postupak dobijanja nekih metala (aluminijum, natrijum, mangan, i dr.) elektrolizom rastopljene rude. Elektroliza se vrši na visokoj temperaturi, koja se održava samom strujom elektrolize.

Elektrolitički kondenzatori imaju veliku primenu u elektrotehnici zbog relativno velike kapacitivnosti. Papirna folija natopljena u elektrolit stavlja se između dve folije od aluminijuma. Kada se priključi radni napon, anoda se zbog elektrolize prekrije veoma tankim slojem aluminijevog oksida, koji je odličan izolator. Prilikom ugradnje važno je usaglasiti polaritet priključaka.

ELEKTROHEMIJSKI GENERATORI

Rad elektrohemijskih generatora zasniva se na pojavi, koju je uočio L. Galvani, da se između metalne elektrode i elektrolita, u koji je ova potopljena, spontano javlja razlika potencijala. Potencijal elektrode u odnosu na elektrolit naziva se elektrohemijski potencijal i on zavisi od vrste metala i elektrolita, temperature i koncentracije jona. Pojava se objašnjava hemijskom reakcijom između disociranih jona u elektrolitu i atoma na površini metalne elektrode. Kod jedne grupe metala (kalijum, natrijum, magnezijum, aluminijum, cink, gvožđe, olovo, i dr.) elektroda se naelektriše negativno pošto pozitivni joni metala prelaze sa elektrode u rastvor.

Kod druge grupe metala (zlato, platina, srebro, bakar, živa, i dr.) elektroda se naelektriše pozitivno pošto se pozitivni joni metala skupljaju na njenoj površini.

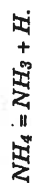
Prvi elektrohemijski generator načinio je 1800. godine A. Volta, stavljajući u razblaženu sumpornu kiselinu anodu od bakra i katodu od cinka. Potencijalna razlika, odnosno elektromotorna sila, jednaka je razlici elektrohemijskih potencijala obe elektrode i kod Voltinog elementa iznosi oko 1 V. Radni vek ovog elementa je kratak zbog pojave polarizacije, odnosno skupljanja vodonika oko anode, što utiče na smanjenje ems i povećanje unutrašnje otpornosti. Zbog toga se kod većine ostalih elektrohemijskih generatora (nazivaju se i galvanski elementi) pozitivna elektroda oblaže vrlo aktivnim depolarizatorom, koji izdvojeni vodonik prevodi u vodu.

Na slici 3.20 prikazana je jedna varijanta Leklanševog elementa, tzv. suvi element, koji se dosta upotrebljava. Negativna elektroda je valjkasta posuda od cinka u koju je nasut vodeni rastvor amonijevog hlorida, NH_4Cl (tzv. nišador), pomešan sa brašnom da se spreči izlivanje elektrolita. Pozitivna elektroda je grafitni štap obložen presovanim prahom manganovog superoksida (MnO_2), koji služi kao

depolarizator. Lončić je zaliven smolom, a na vrh grafitne elektrode stavljena metalna kapa. Elektromotorna sila suvog elementa je oko 1,5 V.

Molekul NH_4Cl disocira u NH_4^+ i Cl^- . Negativni jon hlor, pri proticanju struje, stiže do cinkane elektrode, predaje elektron i vezuje se sa atomom cinka u cink-hlorid (ZnCl).

Pozitivni jon NH_4^+ stiže na pozitivnu elektrodu, neutrališe se uzimajući jedan elektron, i raspada na amonijak i vodonik:



Pošto je manganov superoksid jak oksidator, stupiće u reakciju sa vodonikom dajući vodu i manganov oksid:



Tako mehurići vodonika na grafitnoj elektrodi neće polarizovati generator.

Često se tri suva elementa vezuju na red u „bateriju“ kako bi se utrošućila ems (4,5 V), ali će i unutrašnja otpornost biti trostruko veća.

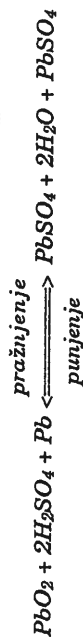
Suvi element spada u tzv. primarne elektrohemijske izvore, pošto su hemijski procesi u njemu bespovratni. Kada istroši svoju hemijsku energiju, ne mogu se vratiti u prvobitno stanje propuštanjem struje u prvobitnom smeru.

Akumulatori spadaju u tzv. sekundarne elektrohemijske izvore, pošto se u njima odvijaju reverzibilni hemijski procesi. Napunjen (kako se još i polarizovan) akumulator u procesu pražnjenja troši hemijsku energiju, pretvarajući je u električni rad. Priključenjem ispražnjenog akumulatora na izvor električne struje, odvija se proces elektrolize (punjenje) i on se u hemijskom i energetskom pogledu dovodi u prethodno stanje.

U praksi se najčešće upotrebljavaju dve vrste akumulatora: olovni i čelični ili Edisonov akumulator.

Olovni akumulator ima elektrode od olova potopljene u vodeni rastvor sumporne kiseline (H_2SO_4). Pod dejstvom kiseline ubrzo se obe elektrode prevuku slojem olovosulfata (PbSO_4). Priključenjem izvors, na anodu će stizati disocirani negativni joni SO_4^{2-} , a na katodu pozitivni H^+ joni. Zbog toga dolazi do polarizacije elektroda, odnosno takvih hemijskih reakcija da se na anodi izdvaja olovo-oksidi (PbO_2), a na katodi čisto olovo (Pb) (slika 3.21). Pri tome se obrazuju molekuli sumporne kiseline, što znači da se u procesu punjenja povećava koncentracija elektrolita. Elektromotorna sila olovnog akumulatora je nešto veća od 2 V, dok mu je unutrašnja otpornost veoma mala.

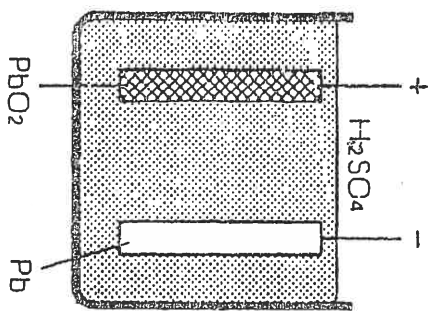
U procesu pražnjenja smer struje je suprotan i javljaju se obrnute hemijske reakcije:



A (+)

K (-)

K (-)



Sl. 3.21.

Pored napona, važna karakteristika je i kapacitet akumulatora (Q), koji je jednak proizvodu jačine struje, koju akumulator daje sve dok mu napon ne padne na donju granicu, i odgovarajućeg vremena:

$$Q = It.$$

Kapacitet se izražava u amperčasovima (Ah). Akumulator koji ima kapacitet od 45 Ah može održavati struju od 10 ampera punih 4,5 časova.

Da bi se povećao kapacitet akumulatora i smanjila unutrašnja otpornost, paralelno se veže više ćelija u bateriju. Rednim vezivanjem više baterija dobija se veći radni napon.

TERMOJONSKA EMISIJA. TERMOELEKTRIČNE POJAVE

Ako se blizu pozitivno naelektorisane kontaktne pločice elektroskopa primese usijani komad metala, nastupice praznjenje elektroskopa, utoliko brže ukoliko je viša temperatura metala. Metali, a naročito oksidi nekih metala, kada se zagreju, emituju elektrone. Ova pojava se naziva termoelektronska emisija, a elektricitet dobijen na ovaj način — termoelektricitet. Rad koji su izvršili elektroni koji su napustili metal, tzv. izlazni rad, dobijen je na račun termičke energije. Zbog gubitka negativnog elektriciteta, metal postaje pozitivno naelektisan, sprečavajući svojim poljem da se oblak elektrona udalji. Ako se u blizinu usijanog metala postavi pozitivna anoda, izazvaće se kretanje elektrona odnosno električna struja.

Ako usijani metal nije čist, pri višim temperaturama se u izvesnoj meri javlja i emisija jona koji se nazivaju termojoni. Termojonska emisija je naročito izražena kad usijani metali sadrže primese alkalnih metala.

Termojonska emisija naša je značajnu primenu u tehnici, a posebno u elektronici. Najprostija elektronska cev (diode) konstruisana je tako što je sistem:

U praksi se ploče izrađuju tako da im je aktivna površina što veća, a na anodama je nanet gotov sloj oksida. Pri praznjenju struje koji iskoristi do 85% od rada električne struje koji je utrošen prilikom punjenja. Proces praznjenja treba prekinuti kada napon akumulatora opadne ispod 1,85 V.

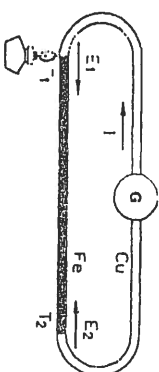
Čelični akumulator ima anodu od nikla, a katodu od gvožđa, potopljene u vodenom rastvor kalijum-hidroksida (KOH). Prednosti čeličnog, ili Edisonovog alkalnog akumulatora u odnosu na olovni su: manja mu je težina i manja osetljivost na opterećenja i mehaničke udare. Nedostaci su: manja mu je električna otpornost.

U alkalne akumulatora spada i kadmijski, ili Ni-Cd akumulator. Ovaj akumulator se razlikuje od čeličnog samo po tome što mu je katoda od kadmijuma.

usijana katoda — anoda ugrađen u stakleni balon iz koga je izvučen vazduh. Dodavanjem jedne ili više novi elektrode, kojima se može uticati na oblik linija električnog polja, a time i na sam elektronski mlaz, dobijene su cevi sa više elektroda (triode, pentode, itd.). Ovo otkriće omogućilo je brz razvoj radio-tehnike, televizijske tehnike i elektronskih računara.

Posle otkrića tranzistora i drugih poluprovodničkih komponenti, mnoge vrste elektronskih cevi su isključene iz upotrebe. Međutim, neke elektronske cevi posebne konstrukcije, kao što je katodna cev, imaju i danas veliki značaj. Katodna cev, o kojoj će biti više reči u okviru poglavlja iz elektronike, ima široku primenu u mernoj tehnici kod katodnog osciloskopa, a u nešto složenijoj izvedbi kao deo radara, TV-prijemnika i monitora elektronskih računara.

Volta je ustanovio da se pri dodiru dva različita metala između njih javlja dodirna ili kontaktna elektromotorna sila. Kontaktne pojave se mogu objasniti nejednakim vrednostima izlaznog rada i koncentracija elektrona u različitim metalima, zbog čega dolazi do prelaska elektrona iz jednog u drugi metal. Ove pojave se javljaju i kod nemetala i njima se može objasniti naelektisanje tela dodirnom.



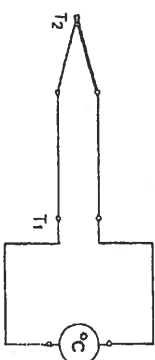
Sl. 3.26.

od toplijeg ka hladnijem spoju gde je termičko kretanje elektrona manje. Kao posledica pretvaranja toplotne energije u električnu nastaje termoelektromotorna sila i termoelektrična struja. Ovakav spoj dva metala naziva se termoelement ili termopar. Termoelektromotorna sila zavisi od vrste metala u termoelementu i srazmerna je razlici temperatura na spojevima:

$$E = \alpha (T_1 - T_2),$$

gde je α konstanta koja karakteriše vrstu termopara.

Termoelementi se najčešće koriste za merenje temperature. U termoelektrični termometar topli spoj termoelementa ugrađen je u metalnu zaštitnu cev sa keramičkom izolacijom. Hladni kraj termoelementa je razdvojen i priključen na osetljivi galvanometar čija je skala baždarena u stepenima Celzijusa ili u Kelvinima (slika 3.27). Pri merenju temperature porebena temperatura (0°C), tj. temperatura hladnog kraja, mora biti što stalnija i najčešće je termostatski regulisana. Granične pogonske temperature zavise od vrste termoelementa. Tako termopar gvožđe — konstantan ima graničnu temperaturu od samo 800°C, ali je vrlo osetljiv i na njoj daje napon od oko 50 mV. Termopar volfram-volframbilben daje mogućnost merenja do 3000°C.



Sl. 3.27.

ELEKTROMAGNETIZAM

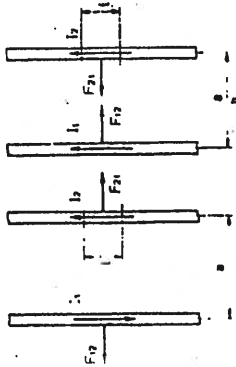
$$F_{21} = \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi r} \quad (4.1.)$$

gde je μ_0 koeficijent srazmernosti koja se naziva magnetna permeabilnost (propustljivost) vakuuma. Za vakuum, a vrlo približno i za vazduh, magnetna permeabilnost iznosi:

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \frac{N}{A^2}$$

Jedinica N/A^2 sledi neposredno iz relacije (4.1.), ali se češće koristi njjoj ekvivalentna jedinica henri po metru, H/m.

Na osnovu zakona elektrodinamičke sile (4.1.), definisana je osnovna jedinica internacionalnog sistema — amper. Amper je jačina stalne električne struje koja, pri prolazu kroz dva paralelna pravolinijska provodnika i neograničene dužine, kružnog preseka neznatne veličine, a koji se nalaze u vakuumu na međusobnom rastojanju od 1 m, izaziva silu od $2 \cdot 10^{-7}$ njutna po metru dužine provodnika.



Sl. 4.1a Sl. 4.1b

Uzajamno delovanje dva provodnika sa strujom osvrću se kroz materijalnu sredinu koja ih okružuje. Elektrodinamičke sile se ne javljaju neposredno i trenutno, već posredstvom kvalitativno izmenjenog prostora u okolini provodnika sa strujom. To naročito fizičko stanje u sredini u kojoj se provodnik sa strujom nalazi, koje se manifestuje pojavom sile na drugi provodnik sa strujom, naziva se **magnetno polje**.

Uvodeći po analogiji pojam probnog strujnog elementa $I_p l_p$ dovoljno malog da svojim poljem ne remeti ispitivano (vidi izraz 2.6.), može se definisati osnovna veličina koja opisuje magnetno polje u nekoj tački prostora. Ta veličina naziva se **magnetna indukcija**, a obeležava se simbolom B . Intenzitet vektora magnetne indukcije jednak je količniku:

$$B = \frac{F_{\max}}{I_p l_p},$$

gde je F_{\max} najveća vrednost elektromagnetne, odnosno elektrodinamičke sile koja deluje na probni strujni element.

Zamenjujući u izrazu $I_p l_p$ sa $I_1 l_1$, magnetna indukcija pravolinijskog provodnika sa strujom $I_1 = I$, u nekoj tački na rastojanju a od provodnika, prema (4.3.), iznosi:

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

Ova jednačina predstavlja Bio-Savardov zakon, koji je prvobitno otkriven eksperimentalnim putem. Bio-Savardov zakon pokazuje da je magnetno polje beskonačno (vrlo dugog) pravolinijskog strujnog provodnika srazmerno struji, a obrnuto srazmerno rastojanju tačke od provodnika.

Elektromagnetizam je deo nauke o elektricitetu koji proučava svako kretanje elektriciteta (makroskopsko i mikroskopsko), uzajamna dejstva elektriciteta u kretanju i fizičke procese u okolnom prostoru. Za razliku od elektrostatike, koja se bavi statikom odnosno jednosmernom strujom u kojoj se izučava kinetika, elektromagnetizam proučava dinamiku elektriciteta.

ELEKTROMAGNETNA SILA I MAGNETNA INDUKCIJA

Još u staroj Grčkoj bilo je poznato da komadi gvozdene rude magnetita (Fe_3O_4), nazvane prema nalazištu u blizini maloazijskog grada Magnetije, privlače sitnije komade gvožđa. Kasnije je primećeno da neki metali (čelik, nikal, kobalt) i njihove legure koji su bili u blizini ili u kontaktu sa ovim prirodnim magnetima i sami pokazuju magnetne osobine, tj. ostaju namagnetisani. Prirodni ili veštački magneti u obliku šipke odnosno igle, koja se može slobodno okretati oko vertikalne centralne ose, spontano zauzimaju pravac sever — jug. Kraj magneti koji se uvek okrene prema severnom polu Zemlje, nazvan je severni, a suprotni kraj — južni pol magneti. Severni magnetni pol označava se simbolom N, a južni sa S. Ova pojava, iskorišćena kod osnovnog navigacionog instrumenta, kompasa, omogućila je velika pomorska putovanja i otkrića novih kontinenata.

Magnetni polovi dva i više magneti međusobno deluju mehaničkim silama tako što se istoimeni polovi odbijaju, a raznoimeni privlače. Međutim, sečenjem magneti uvek se dobijaju novi magneti sa oba pola.

Danski fizičar H. Ersted je 1819. godine primetio da na provodnik s strujom u blizini magneti deluju mehanička sile. Nešto kasnije francuski fizičar A. Amper otkriva da elektromagnetne sile deluju i između dva provodnika sa strujama i postavlja smelu hipotezu da magnetna svojstva stalnih magneti potiču od kretanja elektriciteta unutar magneti. Danas znamo da su sve magnetne pojave izazvane kretanjem elementarnih naelektrisanih čestica.

Mehaničke sile uzajamnog dejstva dva provodnika kroz koje teku jednosmerne struje nazivaju se **elektrodinamičke sile**. Oglad sa dva tanka veoma duga paralelna provodnika, postavljena na malom rastojanju, kroz koje protiču jednosmerne struje jačine I_1 i I_2 , pokazuje da su mehaničke sile odbojne ako je smer struja suprotan (slika 4.1a), odnosno privlačne ako su struje istog smera (slika 4.1b). Intenzitet sile kojom provodnik sa strujom I_1 deluje na dužini I_2 drugog provodnika srazmeran je proizvodu jačina obe struje, a obrnuto srazmeran rastojanju a između provodnika:

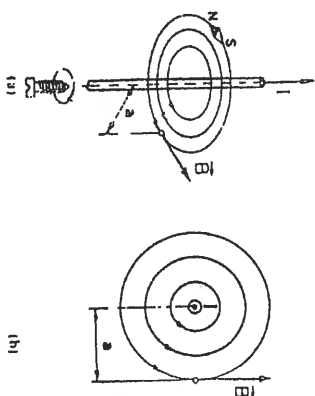
Jedinica magnetne indukcije — tesla, dobila je naziv u čast našeg pronalazača svetskog glasa Nikole Tesle. Na osnovu prethodne relacije, dobija se:

$$B_n = \frac{F_n}{I_n l_n} = \frac{N}{A \cdot m} = T.$$

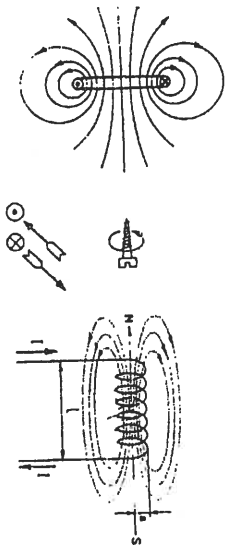
Magnetno polje se može predstaviti na očigledan način pomoću magnetskih linija. To su zamišljene linije, orijentisane u smeru vektora magnetne indukcije, kojima je pravac vektora u svakoj tački tangenta. Usvojeno je da smer i pravac vektora magnetne indukcije pokazuje mala magnetska igla kada se unese u odgovarajuću tačku prostora. Smer severnog magnetnog pola igle uzet je kao smer ovog vektora (slika 4.2a).

Spektar polja dugačkog pravolinijskog provodnika sa strujom I čini skup koncentričnih krugova sa centrom u osi provodnika u ravni upravnoj na pravac provodnika (slika 4.2b). Iz izraza (4.4.) vidi se da je intenzitet vektora magnetne indukcije B u svakoj tački poluprečnika a isti, a opada sa povećanjem rastojanja. Promenom smera struje u provodniku menja se i orijentacija linija polja. Smer vektora magnetne indukcije poklapa se sa smerom okretanja desnog zavrtnja, ako se smer napredovanja zavrtnja poklapa sa smerom struje.

Ako provodnik sa strujom ima kružni oblik, naziva se strujna kontura ili navojak (zavojak). Spektar linija magnetnog polja u ravni koja preseca krug duž centralne ose ima oblik prikazan na slici 4.3a). Ovde se pravi



Sl. 4.2.



Sl. 4.3.

postaje praktično homogeno. Na slici 4.3a) smer struje je prikazan konvencionalnim oznakama koje liče na vrh dolazeće, odnosno pero odlazeće strelice.

Linije vektora magnetne indukcije nemaju ni početak ni kraj, već su to uvek zatvorene linije koje se zahvataju sa provodnicima kao susedne karlike na lancu. Uzrok tome je što u prirodi nema „magnetnih opterećenja“ koja bi bila analoga električnim opterećenjima.

AMPEROV ZAKON

Za opisivanje magnetnog polja pogodno je uvesti nov vektor, kolinearan vektoru magnetne indukcije, a definishe se kao:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0}.$$

Vektor \vec{H} naziva se jačina magnetnog polja. Jačina magnetnog polja H u nekoj tački na rastojanju a od pravolinijskog provodnika sa strujom I (slika 4.2.).

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{I}{2\pi a} = \frac{1}{l},$$

gde je $l = 2\pi a$ dužina magnetne linije (obim kruga) poluprečnika a . Jedinica jačine magnetnog polja je prema gornjem amper po metru:

$$H_n = \frac{I_n}{l_n} = \frac{A}{m}.$$

$$Hl = I.$$

Ovaj rezultat predstavlja poseban izraz Amperovog zakona. U opštem slučaju Amperov zakon, koji kaže da je cirkulacija vektora \vec{H} po nekoj zatvorenoj konturi jednaka ukupnoj jačini električne struje obuhvaćene konturom, zahteva primenu složene matematičke proračuna. Međutim, u jednostavnijim primerima visokog stepena simetrije, kod kojih magnetno polje ne menja jačinu duž zatvorene linije, primenom Amperovog zakona lako se određuje jačina magnetnog polja.

Primer a): U unutrašnjosti solenoida prikazanog na slici 4.3b) sa gusto i ravnomerno namotanom navojcima, kod koga je dužina mnogo veća od poluprečnika, $l \gg a$, magnetno polje je homogeno. Pošto je magnetno polje van solenoida mnogo slabije i praktično zanemarljivo u odnosu na polje H u unutrašnjosti, prema Amperovom zakonu je:

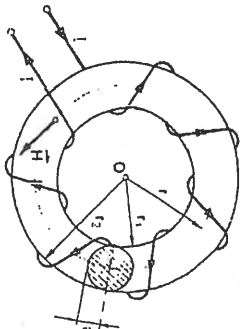
$$Hl = NI,$$

gde je N broj navojaka obuhvaćen zatvorenom konturom. Jačina magnetnog polja u solenoidu je:

$$H = \frac{NI}{l}.$$

Primer b): Homogeno magnetno polje postoji i u unutrašnjosti gusto motanog torusa (slika 4.4.) ako je srednji poluprečnik torusa r mnogo veći od poluprečnika poprečnog preseka a , $r \gg a$. Linije vektora magnetnog polja \vec{H} su krugovi sa centrom u osi torusa. Zbog male debljine tela torusa, dužine ovih linija se međusobno malo razlikuju, pa se može smatrati da su jednake obimu srednjeg kruga torusa $l = 2\pi r$. Iz Amperovog zakona:

$$Hl = NI.$$



Sl. 4.4.

sledi da je jačina magnetnog polja u torusu:

$$H = \frac{NI}{l} = \frac{NI}{2\pi r}$$

Jačina magnetnog polja van torusa je neznatna i praktično je jednaka nuli. Ako se u blizini krajeva solenoida, prikazanog na slici (4.3b), nađe provodnik sa strujom (npr. strujna kontura), magnetna igla ili komadić gvožđa, na njih će delovati elektrodinamička, odnosno elektromagnetna sila, ukoliko kroz navojke solenoida protiče električna struja I . Ako se u unutrašnjost solenoida unese jezgro od čistog gvožđa (naziva se i meko gvožđe), privlačno dejstvo solenoida biće mnogo snažnije. Kako je elektrodinamička odnosno elektromagnetna sila srazmerna magnetnoj indukciji B (vidi izraz 4.3.), može se zaključiti da se stavljanjem jezgra u solenoid povećala vrednost B . Do povećanja magnetne indukcije moglo je doći samo zato što je magnetna permeabilnost μ jezgra veća od permeabilnosti vakuuma (vazduha) μ_0 . Naime, prema Amperovom zakonu, jačina magnetnog polja H ostaje nepromenjena, jer se nije menjala ni jačina električne struje I . Magnetna indukcija u vakuumu, prema relaciji (4.6.), iznosi:

$$B_0 = \mu_0 H,$$

a u prisustvu mekog gvožđa (ili nekog drugog materijala):

$$B = \mu H.$$

Količnik B/B_0 koji pokazuje koliko puta je elektromagnetna sila u prisustvu nekog materijala veća nego u vakuumu, naziva se relativna magnetna permeabilnost i označava se μ_r :

$$\mu_r = \frac{B}{B_0} = \frac{\mu}{\mu_0}.$$

Relativna magnetna permeabilnost μ_r je neimenovan broj koji pokazuje odnos vrednosti magnetne permeabilnosti neke sredine μ prema magnetnoj permeabilnosti vakuuma μ_0 .

MAGNETNI FLUKS I MAGNETNO KOLO

Za svaku ravnu površinu S može se definisati vektor površine \vec{S} . Ovaj vektor je upravan na površinu, a intenzitet mu je jednak samoj površini S . Smer vektora površine određuje se pravilom desnog zavrtnja, pri čemu se najpre odredi referentni smer obilaženja po graničnoj konturi. Na slici 4.5. data je jedna takva orijentisana površina S u homogenom magnetnom polju indukcije B .

Fluks vektora magnetne indukcije B kroz zatvorenu površinu S ili kraće magnetni fluks Φ definiše se kao skalarni proizvod vektora B i \vec{S} i ima vrednost:

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B S \cos(\vec{B}, \vec{S}) = B S \cos \theta,$$

gde je θ ugao između vektora \vec{B} i \vec{S} . Fluks je maksimalan kada je površina S upravna na vektor \vec{B} tj. kada je $\theta = 0^\circ$ (vektori \vec{B} i \vec{S} su kolinearni): $\Phi_m = B S \cos 0^\circ = B S$.

Jedinica magnetnog fluksa je veber: $\Phi_v = B_v S_v = T m^2 = Wb$.

Magnetni fluks od 1 Wb postoji kroz ravnu površinu od 1 m², kada se ona nalazi u homogenom magnetnom polju indukcije od 1 T i upravna je na vektor \vec{B} .

Magnetno polje se može predstaviti tako da broj magnetnih linija po jedinici normalne površine odgovara brojnoj vrednosti jačine magnetne indukcije na tom mestu. U tom slučaju magnetni fluks kroz neku površinu S jednak je ukupnom broju magnetnih linija koje prodiru kroz tu površinu.

Magnetni fluks je jedna od najvažnijih veličina u elektrotehnici, jer se sve električne mašine projektuju na osnovu vrednosti fluksa. Na osnovu poznate vrednosti magnetnog fluksa Φ , lako se određuje vrednost magnetne indukcije B .

Meko gvožđe i drugi feromagnetni materijali imaju mnogo veću magnetnu permeabilnost od okolnog vazduha i ostalih materijala. Kod raznih električnih mašina i mernih instrumenata potrebno je ostvariti visoke vrednosti fluksa i indukcije i kanalisati ih po određenom putu, a kolo kojim se to postiže, građeno od feromagnetnih materijala, naziva se magnetno kolo.

Idealan primer magnetnog kola predstavlja torusni namotaj (slika 4.4.), pogotovo ako u torusu postoji jezgro od feromagnetika. Tada će se skoro sve linije magnetne indukcije i celokupan fluks lokalizovati u unutrašnjosti jezgra i kada je magnetizacioni namotaj postavljen samo na jednom dijelu torusa (slika 4.6a). Samo mali deo ukupnog magnetnog fluksa se zatvara kroz vazduh oko magnetizacionog namotaja i on se naziva rasipni fluks. Odnos rasipnog i ukupnog fluksa neznatno će se povećati ako kolo sadrži i vazdušni procep (međugvožđe), pod uslovom da je dužina međugvožđa mala u odnosu na dimenzije poprečnog preseka torusa.

Za jednostavniji slučaj torusa, bez međugvožđa, magnetno polje u jezgru dato je izrazom:

$$H = \frac{NI}{2\pi r} = \frac{NI}{l},$$

a intenzitet vektora magnetne indukcije izrazom:

$$B = \mu H.$$

Ako je S površina poprečnog preseka jezgra, onda je fluks vektora \vec{B} u jezgru torusa:

$$\Phi = B S = \mu \frac{NI}{l} S = \frac{NI}{l} \frac{F_M}{\mu S},$$

gde je:

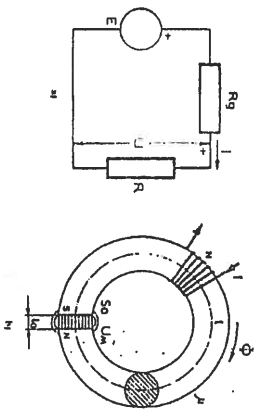
$$F_M = NI$$

magnetomotorna ili magnetopobudna sila.

Jedinica za magnetopobudnu silu F_M je amper, odnosno amper-navojak. Izraz:

$$R_M = \frac{l}{\mu S}$$

predstavlja magnetnu otpornost torusa i ona zavisi od dimenzija magnetnog kola (S i l) i od vrste materijala (l/μ), dakle, isto kao što od odgovarajućih veličina zavisi i električna otpornost ($R = \rho \frac{l}{S} = \frac{l}{\gamma S}$).



Sl. 4.6.

Umesto magnetne otpornosti R_M , često se upotrebljava magnetna provodnost:

$$\Lambda = \frac{l}{R_M},$$

pa relacija dobija oblik:

$$\Phi = \frac{F_M}{R_M} = \Lambda F_M.$$

Jednačina (4.24.) predstavlja Kap-Hopkinsonov zakon, koji se još naziva i Oinov zakon za magnetno kolo, zbog sličnosti sa Oinovim zakonom za prosto električno kolo:

$$I = \frac{E}{R_e} = G_e E.$$

Fluks Φ odgovara jačini struje I u električnom kolu.

Za slučaj torusa sa međugvođenim (slika 4.5a), analoga električna shema prikazana je na slici 4.6b). Ovde je magnetni otpor znatno veći:

$$R_{Mo} = R_{Mf} + R_{Mo} = \frac{l - l_0}{\mu S} + \frac{l_0}{\mu_0 S},$$

jer jedan deo kola sačinjava vazduh. Zbog toga će magnetni fluks Φ biti manji za istu vrednost magnetopobudne sile:

$$\Phi = \frac{F_M}{R_{Mo}} = \frac{NI}{R_{Mf} + R_{Mo}}.$$

Ako je data vrednost magnetnog fluksa Φ iz ove relacije, može se, nakon izračunavanja magnetne otpornosti R_{Mo} , odrediti magnetopobudna sila $F_M = NI$.

FARADEJEV ZAKON ELEKTROMAGNETNE INDUKCIJE

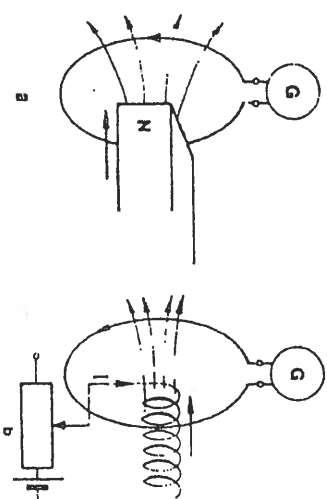
Zakon elektromagnetne indukcije otkrio je 1831. godine, eksperimentalnim putem, engleski fizičar Majkl Faradej. Eksperimentišući sa kalemom žice, čiji su krajevi vezani za osetljiv galvanometar u polju stalnog magneta (slika 4.13a), ili u polju drugog kalema napajanog strujom iz galvanskog elementa (slika 4.13b), on otkriva da će kazaljka galvanometra registrovati pojavu kratkotrajne struje u sledećim slučajevima: (1) ako se menja relativni položaj kalema sa instrumentom i stalnog magneta; (2) ako se menja relativni položaj kalema sa instrumentom i drugog kalema; i (3) ako se prekida ili menja jačina struje u drugom kalemu, pri čemu oba kola miruju.

Analizirajući na prvi pogled različite okolnosti pod kojima dolazi do pojave elektromagnetne indukcije, Faradej izvodi zaključak da je uzrok indukcije u svim slučajevima promena magnetnog fluksa kroz zatvorenu konturu, a da je intenzitet indukovane struje srazmeran brzini promene fluksa.

Indukovana struja je posledica indukovane elektromotorne sile, koja postoji i u slučaju kada kontura nije zatvorena. Faradejev zakon elektromagnetne indukcije glasi: Indukovana elektromotorna sila u zatvorenoj konturi srazmerna je brzini promene fluksa. Ako vremenski promenljivu indukovanu ems obeležimo malim slovom e , kao i druge promenljive veličine, matematički oblik zakona biće:

$$e = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}.$$

Sl. 4.13.



Količnik $\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$, u kome je $\Delta \Phi$ promena (prirušak) fluksa, a Δt odgovarajući vremenski interval, predstavlja brzinu promene fluksa.

Znak „minus“ na desnoj strani izraza predstavlja matematički iskaz Lencovog pravila, koji glasi: indukovana ems ima uvek takav smer da u zatvorenoj konturi stvara struju koja se svojim poljem suprotstavlja promeni fluksa, koji je izazvao indukciju. Tako, na primer, ako se kalem sa strujom na slici 4.13b) primiče zatvorenoj konturi, ili se u njemu reoslatom pojačava struja, raste fluks kroz zatvorenu konturu. Indukovana struja će imati takav smer da sopstvenim magnetnim poljem sprečava promenu fluksa. U slučaju da se kalem sa strujom odmiče, indukovana struja ima suprotan smer, tj. svojim poljem podržava podubno polje, sprečavajući smanjenje fluksa.

U prethodnom primeru opisana je tzv. statička indukcija, za koju je bitno da se oko nepokretne konture magnetno polje menja u vremenu. Na ovakvoj elektromagnetnoj indukciji zasniva se princip rada transformatora. Rad generatora za jednosmernu ili naizmeničnu struju zasniva se na dinamičkoj indukciji. Ona nastaje kada se zatvorena kontura kreće u magnetnom polju, presecajući linije vektora magnetne indukcije B . Na slici 4.14. prikazan je pravolinijski provodnik dužine l , koji se pod dejstvom spoljašnje sile F_s kreće upravno na pravac linije homogenog magnetnog polja indukcije B , konstantnom brzinom v . U toku vremenskog intervala Δt provodnik se pomerio za rastojanje $v\Delta t$ i prebrisao površinu: $\Delta S = lv\Delta t$. Magnetni fluks vektora B kroz prebrisanu površinu iznosi:

$$\Delta \Phi = B \Delta S = Blv\Delta t.$$

Intenzitet indukovane ems prema Faradejevom zakonu je:

$$e = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{Blv\Delta t}{\Delta t} = Blv.$$

Smer indukovane struje je takav da je indukovano magnetno polje s leve strane provodnika suprotnog smera od vektora B , a smer elektromagnetne sile koja deluje na provodnik sa strujom u magnetnom polju suprotan smeru spoljašnje sile. Ako je vektor brzine kolinearan vektoru magnetne indukcije B , odnosno ako provodnik, krećući se, ne preseca magnetne linije, neće doći do pojave elektromagnetne indukcije. U opštem slučaju indukovana ems zavisi od sinusa ugla između v i B tj:

$$e = Blv \sin(\bar{v}, \bar{B})$$

i najveća je kada vektor brzine \bar{v} , vektor magnetne indukcije \bar{B} i pravac provodnika dužine l stoje pod uglovima od 90° .

Indukovana ems i struja javiće se u svakom masivnom provodniku, ako je izložen promenama magnetnog fluksa. Struje koje nastaju pod dejstvom indukovnog električnog polja nazivaju se vihorne ili vrtložne struje. Kao posledica tih struja, dolazi do zagrevanja feromagnetnih materijala, pošto sa porastom temperature gubi sposobnost magnetećenja, da bi se potpuno izgubili na kritičnoj, tzv. Kirijevoj temperaturi.

Gubici u magnetnim kolima električnih mašina i njihovo beskorisno zagrevanje biće manje ako se smanji jačina vrtložnih struja. To se postiže tako što se umesto masivnog jezgra koristi jezgro od tankih, međusobno izolovanih limova. Najčešće se upotrebljava dinamolim debljine $0,1 \div 0,5$ mm. Još bolji rezultati, posebno na visokim učestanostima, postižu se primenom feritnih jezgara kod kojih su feromagnetna zrnca međusobno izolovana vezivnim dilektričnim materijalom.

Kod lameliranih jezgara srednja snaga Džulovih gubitaka, usled vrtložnih struja, data je izrazom:

$$P = 1,64 \gamma a^2 V f^2 B_m^2,$$

SAMOINDUKCIJA I MEĐUSOBNA INDUKCIJA

Svaka zatvorena strujna kontura poseduje sopstveni magnetni fluks koji potiče od sopstvenog polja. Prema Kaphopkinsonovom zakonu ($\Phi = \Delta F_M = \Delta NI$), ovaj fluks je srazmeran sopstvenoj struji I , pa se može napisati:

$$\Phi = LI.$$

Koeficijent srazmernosti između fluksa i struje koja ga je izazvala naziva se induktivnost kola i označava se sa L .

$$L = \frac{\Phi}{I},$$

jedinica za induktivnost biće henri:

$$L_u = \frac{\Phi_u}{I_u} = \frac{Wb}{A} = H.$$

Induktivnost od 1 H ima kolo čiji sopstveni fluks iznosi 1 Wb pri struji u kolu od 1 A.

Induktivnost solenoidnog ili torusnog namotaja lako se može odrediti polazeći od izraza za jačinu polja u jezgri:

$$H = \frac{NI}{l}.$$

Fluks kroz jedan navojak Φ_1 biće:

$$\Phi_1 = B S = \mu \frac{NI}{l} S,$$

a ukupan fluks, pošto kalem ima N navojaka, N puta veći:

$$\Phi = N\Phi_1 = \mu \frac{N^2 I}{l} S = LI$$

Indukovanost L solenoidnog ili torusnog namotaja je:

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

Iz poslednje relacije pokazuje se da je jedinica za magnetnu permeabilnost henri po metru ($\mu_u = \frac{H}{m}$).

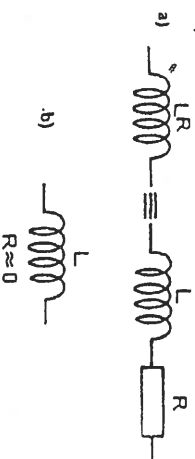
Ako je u kolu struja promenljiva, tada će i sopstveni fluks kola biti vremenski promenljiv, zbog čega nastaje pojava samoindukcije. Indukovana ems samoindukcija je vremenski promenljiva veličina određena Faradejevim zakonom:

$$e_L = - \frac{\Delta \Phi(t)}{\Delta t} = - L \frac{\Delta i(t)}{\Delta t},$$

pod uslovom da je karakteristika magnetnog materijala linearna, tj. μ konstantna (kod feromagnetika uslov je približno ispunjen samo za male promene polja).

Iz izraza (4.37.) sledi da je ems samoindukcije srazmerna brzini promene sopstvene struje sa promenjenim znakom. Znak (—) prema Lencovom pravilu znači da je smer indukovane ems takav da se protivi rasti, ali i opadanju struje u kolu (suprotan smeru struje kad ona raste, a istog smera kada opada). Koeficijent srazmerna je induktivnost kola, pa se L naziva i koeficijent samoindukcije.

Kada kroz kalem protiče jednosmerna struja, onda je $\Delta I(t) = 0$, pa je $\mathcal{E} = 0$, tako da postoji samo otpornost žice kalema, $R = \rho \frac{l}{S}$, a ona najčešće ima malu vrednost. Međutim, u kolu naizmenične struje, zbog ems samoindukcije, kalem unosi u kolo neku induktivnu otpornost.

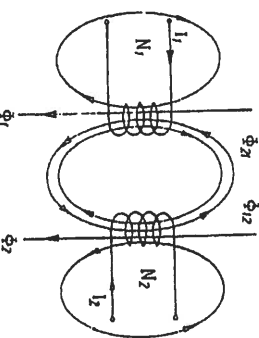


Kao element električnih kola, kalem ima veliku primenu u elektrotehnici. Velike induktivnosti dobijaju se motanjem velikog broja navoja ili umetanjem feritnog jezgra. Na slici 4.15. prikazane su oznake realnog (a) i idealnog (b) kalema koje se koriste u električnim shemama.

Sl. 4.15.

su dva kalema na malom rastojanju, za koja kažemo da su induktivno spregnuta. Ukupan fluks drugog kalema Φ_2 sastoji se od sopstvenog fluksa Φ_{22} , koga stvara struja I_2 , i međusobnog fluksa Φ_{21} , koji zajedno sa rasipnim fluksom čini sopstveni fluks prvog kalema, a koji zavisi od struje I_1 , tj.:

$$\Phi_2 = \Phi_{22} + \Phi_{21} = L_2 I_2 + L_{21} I_1.$$



Parametar L_2 je sopstvena induktivnost drugog kola i ona je nezavisna od prvog kola. L_{21} je međusobna induktivnost koja pokazuje koliki je uticaj struje prvog kola na fluks u drugom kalemu. Međusobna induktivnost zavisi od sredine, oblika oba kola, njihovog uzajamnog položaja i rastojanja.

Analogno jednačini (4.38.), može se napisati i izraz za ukupan fluks prvog kalema:

$$\Phi_1 = \Phi_{11} + \Phi_{12} = L_1 I_1 + L_{12} I_2.$$

Sl. 4.16.

Parametri L_{12} i L_{21} su međusobno jednaki, pa se međusobna induktivnost označava sa M , tj.:

$$L_{12} = \frac{\Phi_{12}}{I_2} = L_{21} = \frac{\Phi_{21}}{I_1} = M.$$

Fluks Φ_{21} biće:

$$\Phi_{21} = B_1 N_2 S = \mu \frac{N_1 I_1}{l} N_2 S,$$

pa je prema gornjim izrazima:

$$L_{21} = \frac{\Phi_{21}}{I_1} = \mu \frac{N_1 N_2}{l} S.$$

Analogno tome, biće:

$$\Phi_{12} = B_2 N_1 S = \mu \frac{N_2 I_2}{l} N_1 S,$$

pa je:

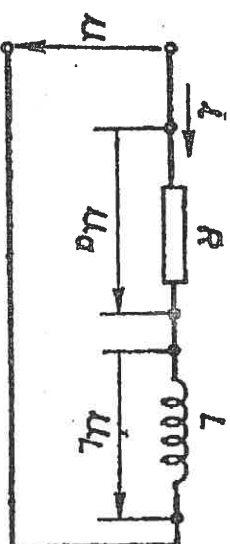
$$L_{12} = \frac{\Phi_{12}}{I_2} = \mu \frac{N_2 N_1}{l} S,$$

dakle, isto kao i L_{21} .

REDNA VEZA ELEMENATA U KOLU PROSTOPERIODIČNE STRUJE

Redna veza otpornika i kalema, pojam impedanse

Posmatrajmo kolo prostopeiodične struje koje se sastoji od otpornika otpornosti R i kalema induktivnosti L , vezanih u red (sl. 4.1.). Pomoću ovakvog kola može se predstaviti stvaran (realan) kalem, pošto on pored induktivnosti ima i određenu otpornost.



Ako na krajevima ovog kola deluje naizmeničan i harmoničan napon u , u kolu će poteći struja i koja će se takođe menjati po harmoničnom zakonu:

$$i = I_m \sin \omega t.$$

Drugi Kirhofov zakon za posmatrano kolo daje:

$$-u + (-e_L) + Ri = 0,$$

Sl. 4.1. Shema kola koja sadrži rednu vezu otpornika otpornosti R i kalema induktivnosti L

odnosno:

$$u = Ri - e_L = u_a + u_L.$$

Pri član na desnoj strani poslednje jednačine:

$$u_a = Ri$$

naziva se aktivni (onski) pad napona ili, prosto, *aktivni napon*, na drugi član:

$$u_L = -eL$$

naziva se indukovani pad napona ili, prosto, *induktivni napon*. Aktivni napon (sl. 4.2a):

$$u_a = Ri = RI_m \sin \omega t = U_{am} \sin \omega t$$

menja se po sinusnom zakonu i u fazi je sa strujom (i). Amplituda aktivnog napona je:

$$U_{am} = RI_m,$$

a njegova efektivna vrednost:

$$U_a = RI.$$

Pošto je $u_L = -eL$, možemo da pišemo $u_L = N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = L \frac{\Delta i}{\Delta t}$, pa se na osnovu razmatranja iz prethodnog odeljka može zaključiti da induktivni napon (u_L) prednjači (po fazi) struji za $\pi/2$, odnosno za četvrtinu periode ($T/4$). Dakle, izraz za induktivni napon je (sl. 4.1.):

$$u_L = N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = L \frac{\Delta i}{\Delta t} = \omega L I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = U_{Lm} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = U_{Lm} \cos \omega t.$$

Amplituda induktivnog napona je:

$$U_{Lm} = \omega L I_m = X_L I_m,$$

a njegova efektivna vrednost:

$$U_L = \omega L I = X_L I.$$

Napon na krajevima posmatranog kola je sada (sl. 4.2a):

$$\begin{aligned} u &= u_a = u_L = R I_m \sin \omega t + X_L I_m \cos \omega t = \\ &= I_m (R \sin \omega t + X_L \cos \omega t) = U_m \sin (\omega t + \varphi). \end{aligned}$$

Da bismo našli U_m i φ , koristimo sledeće obrasce iz trigonometrije:

$$m \sin \alpha \pm n \cos \varphi = \sqrt{m^2 + n^2} \cdot \sin (\alpha \pm \varphi),$$

Dakle,

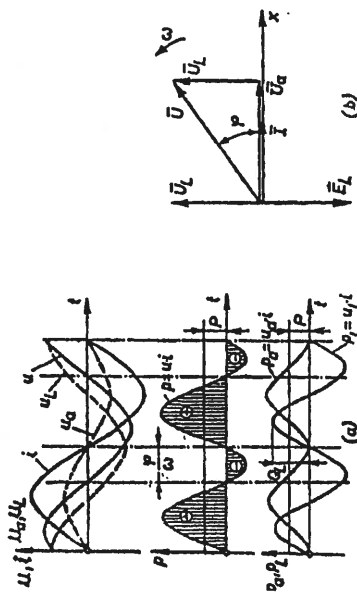
$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi &= \frac{n}{m}, & \varphi &= \arctg \frac{n}{m}. \end{aligned}$$

$$U_m = I_m \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L}{R}, \quad \varphi = \arctg \frac{X_L}{R}.$$

Znači, napon (u) u kolu sa rednom vezom otpornika otpornosti R i kalema induktivnosti L prednjači (po fazi) struji (i) za ugao φ (sl. 4.2a). Ugao φ zavisi od odnosa aktivne (R) i induktivne (X_L) otpornosti i može da ima vrednost između 0 i

$\pi/2$ ($0 < \varphi < \pi/2$). Ukoliko je X_L veće u odnosu na R , utoliko je veća i fazna razlika (φ) između u i i .



Sl. 4.2. Redno RL kolo: (a) talasni oblici struje (i), napona (u) i snage (p); (b) vektorski dijagram

Konstruišemo sada vektorski dijagram za posmatrano kolo (sl. 4.2b). Pošto je struja ista u svim delovima kola, konstrukcija počinje sa vektorom struje I koji se postavlja horizontalno i uzima kao vektor poređenja. Zatim se crtaju vektori aktivnog U_a i induktivnog napona U_L , uzimajući u obzir njihove početne faze. Vektor priključenog napona U nalazi se kao geometrijski zbir vektora napona U_a i U_L :

$$\vec{U} = \vec{U}_a + \vec{U}_L.$$

Vektori \vec{U} , \vec{U}_a i \vec{U}_L obrazuju pravougli trougao napona (sl. 4.2b) iz kojeg prema Pitagorinoj teoremi sledi:

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2}.$$

Ovakav odnos važi i za amplitude respektivnih napona:

$$U_m = \sqrt{U_{am}^2 + U_{Lm}^2}.$$

Fazna razlika između priključenog napona i struje u kolu takođe se određuje iz trougla napona na slici 4.2b:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_L}{U_a}, \quad \varphi = \arctg \left(\frac{U_L}{U_a} \right).$$

Ako komponentne napone u jednačini (4.19) izrazimo kao proizvod struje i odgovarajuće otpornosti ($U_a = RI$, $U_L = X_L I$), dobija se:

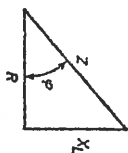
$$U = \sqrt{(RI)^2 + (X_L I)^2} = I \cdot \sqrt{R^2 + X_L^2} = IZ,$$

odakle sledi izraz za struju u posmatranom kolu:

$$I = \frac{U}{Z}.$$

Na sličan način dobija se:

$$tg \varphi = \frac{X_L \cdot I}{R \cdot I} = \frac{X_L}{R}, \quad \varphi = \arctg \left(\frac{X_L}{R} \right).$$



$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

Otpornost R , induktivna otpornost X_L i impedansa Z mogu se predstaviti grafički kao strane pravouglog trougla *impedanse** (sl. 4.3.). Ovaj trougao lako se dobija iz trougla napona, kad se njegove stranice podele efektivnom vrednošću struje u kolu (I). Doista, katete trougla impedanse su:

$$R = U_o/I, \quad X_L = U_L/I, \text{ a hipotenuza: } Z = U/I.$$

Iz trouglova napona i impedanse sledi:

$$tg \varphi = \frac{X_L}{R} \quad 0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$$

Sl. 4.3. Trougao impedanse za redno RL kolo

$$\cos \varphi = \frac{U_o}{U} = \frac{R}{Z}.$$

Primenimo sada kompleksni metod za određivanje struje u posmatranom kolu. Kompleksne efektivne vrednosti struje (i) i napona (u) su:

$$I = \exp(j\omega t) = I e^{j\omega t}$$

$$\underline{U} = U \exp(j\omega t) = \underline{U}_o + \underline{U}_L = U_o \exp(j\omega t) + U_L \exp(j\omega t) \left[j \frac{\pi}{2} \right] = U_o + U_L \cos \frac{\pi}{2} +$$

$$+ j U_L \sin \frac{\pi}{2} = U_o + j U_L = RI + j X_L I.$$

gde su, shodno obrascima (2.26) i (2.27), moduo (U) i argument (φ) kompleksnog napona \underline{U} :

$$U = \sqrt{U_o^2 + U_L^2} = I \sqrt{R^2 + X_L^2} = IZ,$$

$$\varphi = \arctg \frac{U_L}{U_o} = \arctg \frac{X_L}{R}.$$

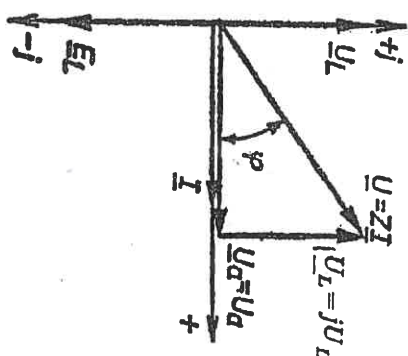
Dakle, primenjujući tri različita metoda: analitički, vektorski i kompleksni došli smo do stih osnovnih obrazaca koji opisuju posmatrano kolo.

Kompleksne veličine \underline{I} , \underline{U}_o , \underline{U}_L i \underline{U} mogu se prikazati kao vektori u kompleksnoj ravni. Njihov vektorski dijagram prikazan je na slici 4.4. Poređenjem vektorskih dijagrama na slikama 4.2b i 4.5 zaključujemo da se oni potpuno poklapaju. Osnovna razlika između njih je što je vektorski dijagram na slici 4.2a nacrtan u $x-y$ pravouglom koordinatnom sistemu, a onaj na slici 4.4 u kompleksnoj ravni. To znači da vektori na slici 4.2a predstavljaju obrtne vektore, a oni na slici 4.4 — kompleksne brojeve. *Nadalje ćemo crtati samo jedan vektorski dijagram, imajući uvek na umu ovu razliku.*

Ako izraz (4.27) podelimo izrazom (4.26), imaćemo:

$$\frac{\underline{U}}{I} = \frac{I(R + jX_L)}{I} = R + jX_L,$$

odakle dolazimo do Omovog zakona u kompleksnom obliku:



Sl. 4.4. Vektorski dijagram u kompleksnoj ravni za redno RL kolo

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{R + jX_L}.$$

U poslednjem izrazu veličina:

$$Z = R + jX_L = Z \exp(j\varphi)$$

predstavlja kompleksni lik impedanse, ili prosto *kompleksnu impedansu* posmatranog kola. Moduo (Z) i argument (φ) kompleksne impedanse nalazimo prema obrascima:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}, \quad \varphi = \arctg \left(\frac{X_L}{R} \right).$$

Realni deo impedanse naziva se *aktivni otpor*, a imaginarni deo kompleksna reaktansa ili prosto *reaktansa*.

Redna veza otpornika, kalema i kondenzatora

Metod analize i proračuna kola prostoperiodične struje zavisi od konfiguracije posmatranog kola, tj. od toga kakve veze — redne, paralelne ili mešovite — obrazuju elementi posmatranog kola. Najprostije se proračunavaju kola sa *rednom* vezom aktivnih i reaktivnih otpornosti.

Ako na krajeve električnog kola, koje se sastoji od redne veze otpornika otpornosti R , kalema induktivnosti L i kondenzatora kapacitivnosti C , priključimo harmoničan napon (u), u kolu će se javiti harmonična struja (i):

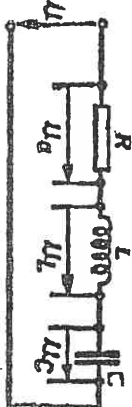
$$i = I_m \sin \omega t.$$

Napon u jednak je algebarskom zbiru harmoničnih napona na pojedinih elementima kola (drugi Kirhofov zakon):

$$u = u_o + u_L + u_C,$$

$$u_L = -e_L, \quad u_C = -e_C.$$

Sl. 4.11. Shema RLC kola



Napon u_o na aktivnoj otpornosti R u fazi je sa strujom i , napon u_L na induktivnosti L *prednjači*, a napon u_C na kapacitivnosti *kasni* po fazi za strujom i za četvrtinu periode ($T/4$), odnosno za ugao $\pi/2$ (sl. 4.12a).

Dakle, napon (u) na krajevima kola može da se izrazi u trigonometrijskom obliku kao:

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi) = R I_m \sin \omega t + \omega L I_m \cos \omega t - \frac{1}{\omega C} I_m \cos \omega t = R I_m \sin \omega t + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) I_m \cos \omega t.$$

Veličina

$$X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$$

u izrazu (4.68) predstavlja *reaktivnu otpornost* kola, koja u zavisnosti od znaka može imati *induktivni* ($X > 0$) ili *kapacitivni* ($X < 0$) karakter. Za razliku od reaktivne otpornosti (X), aktivna otpornost (R) je uvek pozitivna.

Omov zakon za amplitudne i efektivne vrednosti rednog RLC kola:

$$I_m = \frac{U_m}{Z}, \quad I = \frac{U}{Z},$$

gde je:

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

Vektorski dijagram za posmatrano kolo prikazan je na slici 4.13. Vektor struje (I) postavljen je horizontalno i uzet za vektor poređenja. Nakon toga, crtaju se vektori aktivnog (\bar{U}_a), induktivnog (\bar{U}_L) i kapacitivnog napona (\bar{U}_C) shodno njihovim početnim fazama. Vektor priključenog napona (\bar{U}) dobija se onda kao geometrijski zbir vektora napona \bar{U}_a , \bar{U}_L i \bar{U}_C .

Sli. 4.13. Trougao impedanse rednog RLC kola $X > 0$

$$\bar{U} = \bar{U}_a + \bar{U}_L + \bar{U}_C.$$

Prema tome, da bismo na slici 4.13b dobili vektor \bar{U} , na vektor \bar{U}_a nadovezujemo najpre vektor \bar{U}_L , a potom vektor \bar{U}_C . Razultantni vektor koji spaja početak vektora \bar{U}_a i kraj vektora \bar{U}_C predstavlja vektor priključenog napona \bar{U} koji prednjači struji za ugao φ , a to je slučaj kada je kolo induktivnog karaktera ($X > 0$, odnosno $X_L > X_C$).

$$\text{Vektori } \bar{U}, \bar{U}_a \text{ i } \bar{U}_x = \bar{U}_L + \bar{U}_C \text{ (} \bar{U}_x = \bar{U}_L - \bar{U}_C \text{)}$$

obrazuju trougao napona, iz kojeg sledi:

$$U^2 = U_a^2 + (U_L - U_C)^2 = (R I)^2 + (X_L - X_C)^2 I^2,$$

odakle je:

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X^2}} = \frac{U}{Z}$$

Impedansa

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + X^2}$$

predstavlja hipotenuzu pravouglog trougla impedanse (sl. 4.13) koji se dobija iz trougla napona, kada se ovome sve strane podele efektivnom vrednošću struje u kolu (I). Iz trougla impedanse ugao φ se može odrediti pomoću jednog od obrazaca:

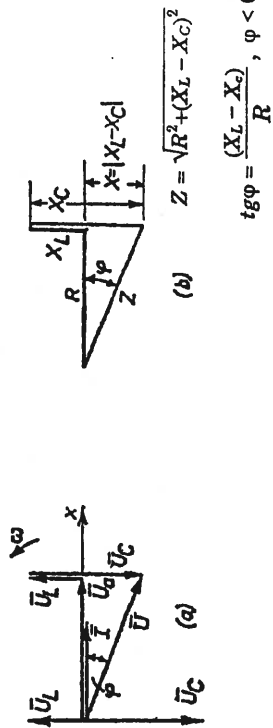
$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L - X_C}{R}$$

ili

$$\cos \varphi = \frac{R}{\sqrt{R^2 + X^2}}.$$

Znak ugla određuje se prema odnosu X_L i X_C . Za posmatrani slučaj ugao je pozitivan ($\varphi > 0$) jer je $X_L > X_C$.

Na slici 4.14a prikazan je vektorski dijagram RLC kola pri $X < 0$, a na slici 4.14b odgovarajući trougao impedanse.



Sli. 4.14. (a) Vektorski dijagram rednog RLC pri $X < 0$; (b) odgovarajući trougao impedanse. Struja u rednom RLC kolu može se odrediti i pomoću kompleksnog metoda. Kompleksne efektivne vrednosti struje (\bar{i}) i napona (\bar{u}) su:

$$\bar{I} = I \exp(j\varphi) = I,$$

$$\bar{U} - \exp(j\varphi) = \bar{U}_a + \bar{U}_L + \bar{U}_C = U_a \exp(j\varphi) + U_L \exp\left(j\frac{\pi}{2}\right) + U_C \exp\left(-j\frac{\pi}{2}\right) =$$

$$= U_a + U_L \cos \frac{\pi}{2} + j U_L \sin \frac{\pi}{2} + U_C \cdot \cos \frac{\pi}{2} - j U_C \cdot \sin \frac{\pi}{2} = U_a + j U_L - j U_C =$$

$$= U_a + j(U_L - U_C) = R I + j I(X_L - X_C);$$

modno (U) i argument (φ) kompleksnog napona \bar{U} nalaze se prema obrascima (2.26) i (2.27):

$$U = \sqrt{U_a^2 + (U_L - U_C)^2} = I \cdot \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = I Z,$$

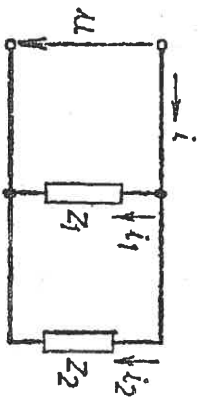
$$\varphi = \arctg \frac{U_L - U_C}{U_a} = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}.$$

PARALELNA VEZA ELEMENATA U KOLU PROSTOPERIODIČNE STRUJE

Paralelna veza prijemnika. Pojam admittance. Ekvivalentna impedansa

Prijemnici električne energije (električni motori, sijalice, aparati u domaćinstvima itd.) uključuju se, po pravilu, *paralelno* (otično) na mrežu napona U (sl. 5.1). U praksi je često potrebno odrediti struju i snagu, koje zahtevaju pojedini prijemnici, kao i rezultantnu struju i ukupnu snagu grupe paralelno vezanih prijemnika.

Rezultantna struja i u ma kom trenutku vremena jednaka je algebarskom zbiru trenutnih vrednosti struja pojedinih paralelnih grana (prvi Kirchhoffov zakon):



Kad ova algebarska jednačina važi za trenutne vrednosti, mora da važi ista takva vektorska jednačina za efektivne vrednosti:

$$\bar{I} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2,$$

dok za kompleksne efektivne vrednosti važi:

$$\bar{I} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2.$$

Pošto pri paralelnom uključivanju prijemnika na krajevima svakog od njih vlada isti napon, jednačina (5.3.) može se napisati u obliku:

$$I = I_1 + I_2 = \frac{U}{Z_1} + \frac{U}{Z_2} = U Y_1 + U Y_2 = U (Y_1 + Y_2) = U Y,$$

gde su:

$$Y_1 = \frac{1}{Z_1} \text{ — admittance prvog prijemnika,}$$

$$Y_2 = \frac{1}{Z_2} \text{ — admittance drugog prijemnika,}$$

$$Y = Y_1 + Y_2 = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \text{ — admittance* posmatranog kola.}$$

Pojam *admittance* prijemnika. Uopšte, ako je kompleksni oblik *impedance* nekog prijemnika:

$$Z_p = R_p + jX_p,$$

njegova kompleksna *admittance* (*prividna provodnost*) biće:

$$Y_p = \frac{1}{Z_p} = \frac{1}{R_p + jX_p} = \frac{R_p - jX_p}{R_p^2 + X_p^2} = G_p - jB_p,$$

gde su:

$$G_p = \frac{R_p}{R_p^2 + X_p^2} = \frac{R_p}{Z_p^2}$$

aktivna provodnost ili *konduktansa* prijemnika,

$$B_p = \frac{X_p}{R_p^2 + X_p^2} = \frac{X_p}{Z_p^2}$$

reaktivna provodnost ili *susceptansa* prijemnika, a

$$-jB_p = -j \frac{X_p}{Z_p^2}$$

kompleksna reaktivna provodnost ili *kompleksna susceptansa* prijemnika.

Ekvivalentna impedansa. Grupu paralelno uključenih prijemnika možemo da zamenimo jednim *ekvivalentnim* električnim prijemnikom. *Ekvivalentna impedansa* ovog prijemnika mora da bude takva da struja kroz ovaj prijemnik, kada ga priključimo na isti napon U , bude jednaka sa rezultantnom strujom I posmatrane grupe paralelnih prijemnika. Za posmatrano kolo (sl. 5.1) imali bismo shodno izrazu (5.4.):

$$I = \frac{U}{Z_{ekv}} = U \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \right),$$

odakle sledi:

$$\frac{1}{Z_{ekv}} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2},$$

odnosno

$$Z_{ekv} = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}.$$

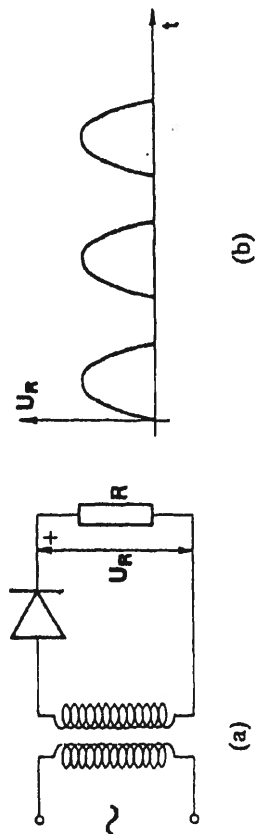
O paralelnoj vezi prijemnika biće još reči u odeljcima VI i VII.

ISPRAVLJAČI

Uloga ispravljača (usmerača) je pretvaranje naizmeničnog, najčešće mrežnog napona u jednosmerni. Kao ispravljački element, po pravilu se koristi poluprovodnička dioda, koja ima svojstvo da zatvara strujni krug sa vrlo malim otporom (oko 10 Ω), ukoliko ima svojstvo da zatvara strujni krug sa vrlo velikim otporom (oko 1 M Ω). U analizi kola realna dioda se može zameniti idealnom koja ima zanemarljivo mali otpor u propusnom, a beskonačno velik u nepropusnom smeru.

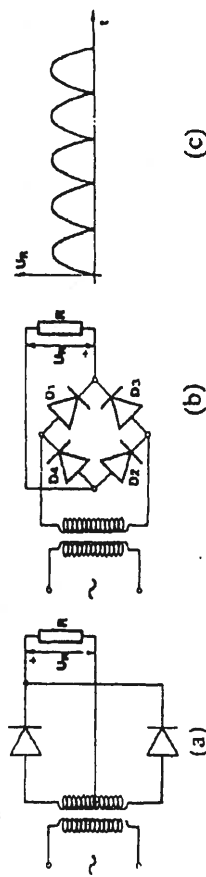
Najjednostavniji je, ali i najlošiji, *jednostostrani* (polutalasti) ispravljač prikazan na slici 8.32a. Dioda propušta samo pozitivne poluperiode naizmeničnog napona koji se javlja na sekundarnu transformatora. Ispravljeni napon dat je na slici 8.32b. Srednja vrednost ispravljenog napona iznos: $U_p = 0,318 U_m$, gde je U_m maksimalna vrednost napona na sekundarnu transformatora. Pošto je dioda pri

negativnoj poluperiodi inverzno polarizovana, napon U_m mora biti manji od probojnog napona diode.



Sl. 8.32.

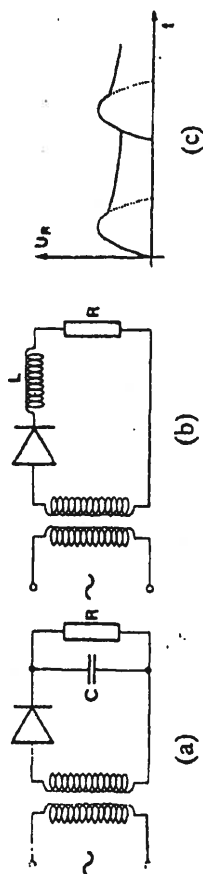
Znatno bolja svojstva ima dvostrani ispravljač sa dve diode (slika 8.33a), ili sa četiri diode u Grečovom spoju (slika 8.33b), pošto je srednja vrednost ispravljenog napona (slika 8.33c) dvostruko veća, tj. $U_p = 0,637 U_m$. Za vreme pozitivne poluperiode u Grečovom spoju provode diode D_1 i D_2 , a za vreme negativne poluperiode D_3 i D_4 .



Sl. 8.33.

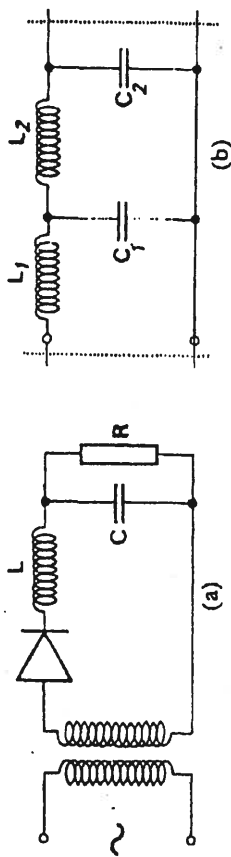
U svim ovim ispravljačima uz jednosmernu komponentu ispravljenog napona javlja se i naizmenična komponenta. Talasnost ispravljenog napona smanjuje se primenom električnih filtera.

Dodavanjem kondenzatora paralelno (slika 8.34a) ili kalema na red sa prijemnikom (slika 8.34b), dobija se najjednostavniji kapacitivni (RC), odnosno induktivni (RL) filter. Zbog jednostavnosti filtriranja je prikazano kod jednostranog ispravljača, ali se još bolji rezultat postiže kod dvostranog. Kondenzator koji se brzo puni za vreme pozitivne poluperiode, polako se prazni preko otpora prijemnika za vreme negativne poluperiode „poravnavajući“ tako ispravljeni napon (slika 8.34c). Sličan je i uticaj kalema (naziva se i prigušnica, a sadrži jezgro od mekog gvožđa), s tim što se struja u kolu za vreme negativne poluperiode održava na račun magnetne energije.



Sl. 8.34.

Slaba strana ovih filtera je potreba za velikim vrednostima kapacitivnosti, odnosno induktivnosti, pa se to otklanja upotrebom LC-filtara sa jednom ili dve LC-čelije (slika 8.35a i b).



Sl. 8.35.

Kod nekih elektronskih sklopova potrebno je da ispravljeni jednosmerni napon ima stalnu vrednost bez obzira na moguća odstupanja napona gradske mreže ili promene otpornosti prijemnika. Da bi se to postiglo, primenjuju se stabilizatori jednosmernog napona.

Regulacija ispravljene struje, a time i promena jednosmernog napona u širem opsegu može se vršiti pomoću tiristora. Tiristorska regulacija ima prednost u odnosu na potencijometarsku jer se praktično vrši bez gubitaka. Najjednostavniji regulisani jednosmerni ispravljač dobio bi se od jednostranog ispravljača (vidi sliku 8.32a), ako se dioda zameni tiristorom. Tiristor će početi da provodi struju tek kada na upravljačkoj elektrodi dobije odgovarajući strujni impuls, a ne za vreme čitave pozitivne poluperiode. Ovaj impuls se dobija iz posebnog elektronskog sklopa uz mogućnost njegovog faznog pomeranja.

Oblast primene ispravljača je vrlo široka. Najviše se koriste za napajanje raznih elektronskih uređaja pošto elektronski sklopovi sadržani u njima zahtevaju napajanje iz izvora jednosmernog napona. Takođe služe za punjenje akumulatora i u svim postrojenjima gde se odvija elektroliza.

TRANZISTOR KAO PREKIDAČ

Videli smo da na familijama izlaznih karakteristika bipolarnih tranzistora (vidi sliku 8.23) razlikujemo dve karakteristične oblasti: oblast zakločenja i oblast zasićenja. Svojsstvo bipolarnog tranzistora da se može relativno brzo prebacivati iz stanja zakločenja u stanje punog provođenja, omogućava upotrebu ovog tranzistora kao prekidača. U elektronici prekidači obavljaju važnu ulogu uključivanja i isključivanja različitih vrsta potrošača.

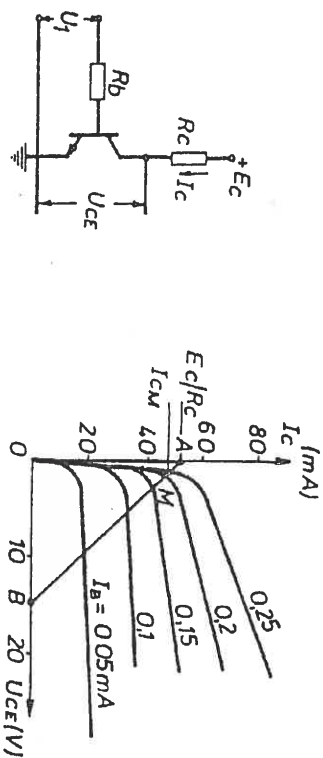
Na slici 8.50. dat je primer jednog elektronskog kola u kome bipolarni tranzistor radi kao prekidač. Potrošač se nalazi u glavnom (izlaznom) kolu tranzistora i označen je kao otpornik R_c . Ovde je primenjen spoj sa zajedničkim emitorom, ali se koriste i druga dva spoja.

U odsustvu napona na ulazu struja baze je jednaka nuli. Tada tranzistor ne provodi jer mu je i struja kolektora jednaka nuli. Iz jednačine koja pokazuje vrednost izlaznog napona U_{CE} (izlazno kolo je zatvoreno preko izvora jednosmernog napona E_C):

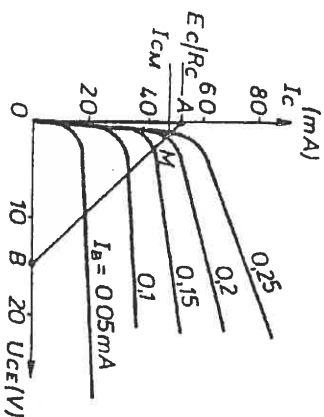
$$U_{CE} = E_C - R_c I_C \quad (8.38)$$

sledi da u tom slučaju izlazni napon, odnosno potencijal kolektora, ima najveću vrednost jednaku naponu izvora napajanja E_C .

Na familiji izlaznih karakteristika prikazanih na slici 8.51. ova radna tačka tranzistora označena je se B.



Sl. 8.50.

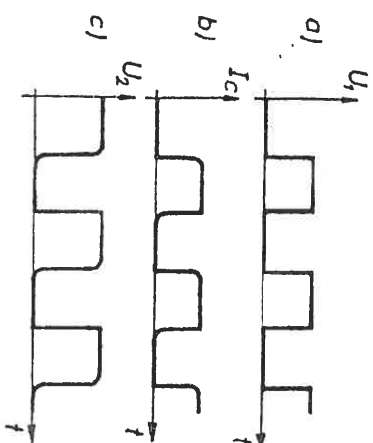


Sl. 8.51.

Relacija 8.38. predstavlja jednačinu prave pa se zbog toga naziva radna prava tranzistora. Ona je pored tačke B određena i tačkom preseka sa ordinatom A, koja se dobija kada se u pomenutoj relaciji U_{CE} zameni vrednošću $U_{CE} = 0$ pa je $I_C = E_C/R_c$. Radna prava uctana je na dijagramu datom na slici 8.51.

Sa uspostavljanjem pozitivnog napona na ulazu, struje baze i kolektora počinju da rastu, a napon na izlazu $U_2 = U_{CE}$ da opada. Radna tačka će se kretati ulavo duž radne prave dok kolektorska struja ne dostigne svoju maksimalnu vrednost I_{CM} (tačka M na slici 8.51). U ovom slučaju napon između kolektora i emitora ima najmanju vrednost, obično manju od 0,5 V.

U slučaju da se na ulaz tranzistoranskog prekidača dovede povorka pravougaonih impulsa, kao što je prikazano na slici 8.52a, vremenski oblik struje kolektora izlaznog napona biće takode povorka impulsa data na istoj slici pod b i c.



Sl. 8.52.

Upoređivanjem vremenskih oblika ulaznog U_1 i izlaznog napona U_2 uočava se da je dobitan inverzan, odnosno obrnut naponski oblik. Zbog toga se kolo prikazano na slici 8.50. naziva i inverter.

Tranzistoranski prekidači našli su veliku primenu u raznim vrstama prekidackih kola u elektronici i automatiki.

