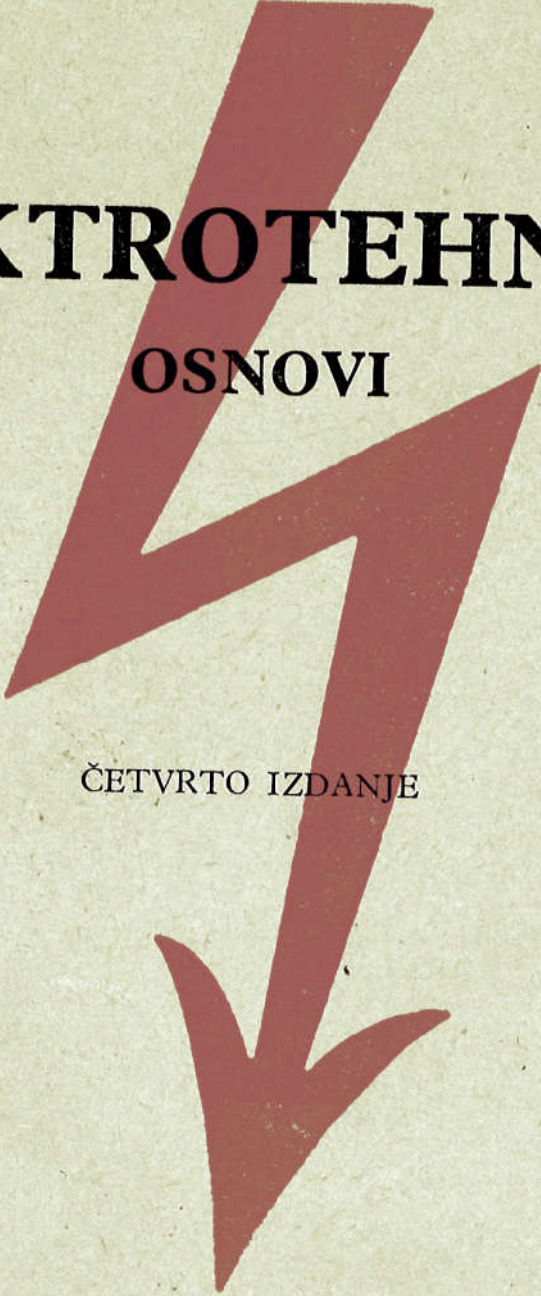


ING. DRAGUTIN KAISER



ELEKTROTEHNIKA

OSNOVI

ČETVRTO IZDANJE

TEHNIČKA KNJIGA
ZAGREB

Ing. Dragutin Kaiser:
ELEKTROTEHNIKA

Tisak:
GRAFIČKI ZAVOD HRVATSKE
Zagreb, Frankopanska ul. 26

ING. DRAGUTIN KAISER

ELEKTROTEHNIKA

OSNOVI

(S PRIKAZOM ELEKTRIČNIH STROJEVA I ELEKTRIČNE RASVJETE)

ČETVRTO IZDANJE

TEHNIČKA KNJIGA
ZAGREB 1956

PREDGOVOR ČETVRTOM IZDANJU

Ova je knjiga namijenjena u prvom redu industrijskim školama i elektroprivrednim školama u rangu industrijskih škola, a onda i školama učenika u privredi te za tečajeve. Vjerujem međutim, da ona može dobro poslužiti i za potrebe električara (elektromontera, elektroinstalatera i elektromehaničara) u praksi.

Pri sastavljanju ove knjige trudio sam se, da ona bude napisana što laganije. Najveću pažnju posvetio sam tome, da tumačenja ne budu formalna, već da učenicima i drugim čitaocima pomognu u stvaranju fizikalne slike pojedinih električkih pojava, jer je fizikalni zor veoma važan kod svih ljudi tehnike.

Knjiga sadrži dosta računskih primjera i vrlo mnogo zadataka. Gotovo svaki od tih zadataka sadrži zapravo 3 zadatka: osim osnovnog još 2 zadatka, kojih su broježane vrijednosti navedene u zgradama. Za osnovne zadatke navedena su na kraju knjige rješenja, koja služe kao putokaz za rješavanje zadataka u zgradama.

Prvo izdanje ove knjige izašlo je 1946. godine pod naslovom »Uvod u elektrotehniku«, a već 1948. izašlo je drugo prerađeno i prošireno izdanje pod naslovom »Osnovi elektrotehnike«. U trećem izdanju naslov knjige je ponovo promijenjen u »Elektrotehnika, osnovi«, kako bi se razlikovao od naslova nekih drugih knjiga.

U trećem izdanju, koje je izašlo početkom prošle godine, opseg knjige je povećan, jer su znatno proširena poglavlja o električnoj rasvjeti, električnim strojevima, transformatorima, usmjerivačima i promjenjivačima. Ta sam poglavlja prvotno namjeravao ispustiti iz knjige (jer u užem smislu ne spadaju u osnove elektrotehnike), ali sam ih kasnije čak i proširio stoga, što za to gradivo nema udžbenika za industrijske i elektroprivredne škole, pa bi ova poglavlja trebala privremeno poslužiti i pri nastavi odnosnih predmeta, dajući barem najosnovnije iz tih predmeta. Neka se time bar donekle izbjegne potreba, da nastavnik diktira učenicima čitave tekstove, čime se tako često, a tako jalovo, gubi vrijeme. Osim navedenih neka sam poglavlja napisao sasvim nanovo, neka znatno preradio, a sav ostali tekst brižljivo sam pregledao, dotjerao i dopunio.

U ovom četvrtom izdanju nije mi se činilo potrebnim izvršiti neke značajnije izmjene ili nadopune u tekstu. Ipak sam cijeli tekst ponovo pomno pregledao te popravio neke nejasnoće i pogreške, koje su se potkrale u prethodnom izdanju, a na pojedinim sam mjestima podatke uskladio s posljednjim stanjem tehnike.

U pogledu rasporeda gradiva učinjene su neke promjene prema nastavnom programu, od kojih je jedina značajnija to, što knjiga ne počinje s elek-

trostatikom, već s električnom strujom i njezinim djelovanjem. Načelno smatram, da je takvo uvođenje u elektrotehniku zanimljivije, pa da se tako povećava interes za predmet, a time i za nastavu i za čitanje knjige.

Ideje za nekoliko zadataka i desetak slika uzeo sam iz nekih stranih knjiga.

Nadam se, da će i ovo četvrto izdanje biti jednako dobro primljeno kao i dosadašnja izdanja te da će mnogim našim ljudima omogućiti, da steknu ili prodube potrebna osnovna znanja iz elektrotehnike.

U Zagrebu, svibnja 1956.

D. Kaiser

1. ELEKTRIČNA STRUJA I NJEZINA DJELOVANJA

1.1. ŠTO JE TO — ELEKTRIKA?

Slično kao što strujom vode nazivamo gibanje čestica vode, tako ni električna struja nije drugo već usmjereno gibanje sitnih čestica elektrike. No što je to — »elektrika«, i kakve su to »sitne čestice elektrike«?

Što je elektrika u bitnosti, to danas još ne znamo. Znamo tek toliko, da je ona neka prirodna sila. No ako i ne znamo, što je ona u bitnosti, danas već o njoj ipak vrlo mnogo znamo. Znamo, koji su nosioci elektrike, koje su te »sitne čestice elektrike«, znamo, gdje se elektrika pojavljuje, poznajemo njezina djelovanja i njezine zakone. A što je najvažnije, naučili smo, da je iskorišćujemo na bezbroj različitih načina.

Najsitnije čestice elektrike, ti nosioci elektrike, sadržane su u svim tvarima u prirodi u ogromnim količinama. One su, štoviše, jedan od osnovnih sastavnih dijelova svih tvari bez razlike.

U prirodi ima bezbroj vrlo različitih tvari. Odavna su se ljudi, osobito oni, koji su se bavili naukom, pitali, od čega su te tvari, kako je uopće građena materija, no tek je suvremenoj nauci uspjelo, da duboko prodre u građu materije i da dalekosežno odgovori na ovo pitanje.

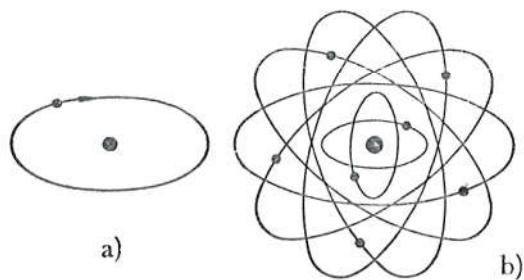
Danas znamo, da se sve tvari sastoje od nekih najsitnijih čestica, koje se ne daju dalje dijeliti, na pr. raspoloviti. Uzmimo na pr. zrnce posve suhe soli, naše obične kuhinjske soli. Mi bismo tu sol mogli razmrviti na izvanredno sitne djeliće, tako sitne, da ih prostim okom ne bismo mogli ni vidjeti. Pa kad bismo imali neke savršene sprave, mogli bismo i te izvanredno sitne djeliće dalje dijeliti na vrlo mnogo još sitnijih čestica. No takvu diobu na sve sitnije čestice ne bismo mogli vršiti do beskonačnosti. Na kraju bismo došli do takvih čestica, koje se više nikakvim mehaničkim sredstvom ne bi dale dalje raspoloviti. Takve čestice nazivamo *molekule*. Naša se kuhinjska sol sastoji od samih takvih molekula, takvih izvanredno sitnih čestica, koje se ne daju razmrviti na još sitnije čestice. Sve su molekule soli međusobno posve jednake i po veličini i po svojim svojstvima. No ne samo sol, nego i sve ostale tvari u prirodi, bile to krute tvari, tekućine ili plinovi, sastoje se od takvih najsitnijih, nedjeljivih čestica, molekula. Samo što molekule različitih tvari nisu međusobno jednake. Molekule krede na pr. znatno se razlikuju i po veličini i po svojim svojstvima od molekula soli. U prirodi ima vrlo mnogo različitih molekula, toliko — koliko ima različitih tvari.

No kakogod se molekule ne daju nikakvim mehaničkim sredstvom ni raspoloviti, a kamoli dalje razdijeliti, ipak se i one sastoje od još sitnijih čestica. Ima i načina, kako se one mogu i raščlaniti na te još sitnije čestice, koje

nazivamo *atomi*. Istina, molekule se nikakvim mehaničkim sredstvima ne daju dalje razdijeliti, ali se različitim kemijskim postupcima svaka molekula može razlučiti u svoje sastavne dijelove, atome. Molekula kuhinjske soli sastoji se od jednog atoma natrija i jednog atoma klora. Molekula vode sastoji se od dva atoma vodika i jednog atoma kisika. A ima i takvih molekula, koje se sastoje od nekoliko desetaka atoma.

Dok ima vrlo mnogo različitih molekula, ima u prirodi svega 92 različita atoma. Tvari, koje se sastoje samo od jedne vrste atoma, zovu se *kemijski elementi* ili *počela*, a to znači osnovne tvari, od kojih se sve druge tvari sastoje. Ti se elementi ne mogu rastvoriti na neke još osnovnije tvari. Kuhinjska sol, na primjer, nije element. Ona se ne sastoji samo od jedne vrste atoma, jer se njezine molekule sastoje od atoma natrija i atoma klora. Kuhinjska se sol daje prema tome kemijskim putem razlučiti u elemente natrij i klor. Elementi su na pr. natrij, klor, vodik, kisik, dušik, bakar, željezo, aluminij, cink, kositar, olovo, zlato, srebro, sumpor, fosfor i još mnogi drugi — ukupno u prirodi 92. U najnovije vrijeme uspjelo je umjetnim putem, u laboratoriju, proizvesti još nekoliko elemenata, kojih nema u prirodi.

Riječ »atom« dolazi od grčke riječi »atomos«, a znači nedjeljiv. I doista, atom se ne da dalje dijeliti ne samo mehanički, nego niti kemijski. Pa ipak je nauka pokazala, da ni ti atomi nisu »nedjeljivi«, da se i oni sastoje od još sitnijih, još osnovnijih čestica. Na koji način je to bilo moguće ustanoviti, u to se mi ne možemo upuštati u ovoj knjizi. No ipak ćemo, sasvim u grubom, prikazati, kako nauka sebi zamišlja građu atoma.



Sl. 1. Svaki se atom sastoji od atomske jezgre i izvjesnog broja elektrona, koji kruže oko jezgre ogromnim brzinama.

a) Vodikov atom s jednim elektronom (najjednostavniji atom), b) dušikov atom sa 7 elektrona.

jedan elektron, najveći atom, koji se pojavljuje u prirodi, onaj elementa urana, ima čak 92 elektrona.

Elektroni nisu drugo nego najsitnije čestice elektrike, a istovremeno i najsitnije čestice materije uopće. Oni su nosioci elektrike, uzročnici električnih pojava. Osim takvih elektrona, koji kruže oko svoje atomske jezgre, ima ih i takvih, koji se slobodno kreću po praznom prostoru između pojedinih atoma. Naročito mnogo takvih slobodnih elektrona ima u metalima. Rekli smo odmah u početku, da je električna struja usmjereno gibanje čestica elektrike. A sad možemo reći, da je električna struja u metalnim vodičima usmjereno gibanje slobodnih elektrona.

Slikovito možemo atom usporediti s našim suncem i njegovim planetima. U sredini atoma (slika 1.) nalazi se neka nepredstavljivo sićušna mrvica, a oko nje kruži fantastičnim brzinama izvjestan broj još sićušnijih mrvica. Ovu mrvicu u sredini nazivamo *atomskom jezgrom*, a mrvice, koje oko nje kruže, *elektronima*. Svi su atomi bez razlike sastavljeni od atomske jezgre i elektrona, koji kruže oko jezgre. A razlikuju se međusobno samo po veličini jezgre i po broju elektrona. Najjednostavniji atom, onaj elementa vodika, ima svega

Zašto treba naglasiti baš »usmjereno« gibanje? Zato, što ni slobodni elektroni nikad ne miruju, oni su u neprestanom gibanju po prostoru između atoma i onda, kad nema struje. No to je njihovo gibanje posve nepravilno, u svim mogućim smjerovima. Srednja brzina svih elektrona u vodiču obično je jednaka nuli: struja ne teče; upravo tako, kao što ne bi tekla ni struja vode, kad bi se čestice vode u nekoj cijevi gibale u svim smjerovima, a u prosjeku se ne bi pomakle iz nekog srednjeg položaja.

Tek kad se elektroni pokrenu u nekom smjeru pod utjecajem izvjesnog uzročnika, koji nazivamo elektromotorna sila, poteče električna struja. Brzina, kojom se oni gibaju po metalnim vodičima, začudo je vrlo malena. Dok se elektroni oko atomske jezgre gibaju brzinom od oko 2000 km u sekundi, dotle se oni u vodičima kao električna struja gibaju prosječnom brzinom, koja iznosi tek dio jednoga milimetra u sekundi. Ali ih zato u svakom kubičnom centimetru vodiča ima fantastično mnogo. Što se ti elektroni brže gibaju, bit će električna struja jača, slično, kao što će i u cijevima s vodom biti struja vode to jača, što se čestice vode brže gibaju kroz cijev.

No nisu elektroni jedini nosioci elektrike. I atomska jezgra je električna, samo je njezina elektrika različita od elektrike elektrona. Njihovi su učinci jednaki, ali protivni, oni se međusobno poništavaju. Stoga kažemo, da *elektrike ima dvije vrste, pozitivne i negativne*. Iz izvjesnih razloga, o kojima ćemo poslije govoriti, pozitivnom nazivamo elektriku atomske jezgre, a negativnom elektriku elektrona. Pozitivna elektrika se u metalnim vodičima praktički ne giba, ona je vezana za atom, pa zato možemo s velikom približnosti reći, da je električna struja u metalnim vodičima gibanje slobodnih elektrona.

1.2. VODIČI I IZOLATORI

Kroz neke tvari struja lako teče. Kažemo, da takve tvari struju dobro vode, pa ih nazivamo *vodičima*. Neke tvari, naprotiv, struju ne vode gotovo nikako; takve tvari zovemo *izolatorima*.

Budući da je struja gibanje slobodnih elektrona, možemo reći, da je neka tvar to bolji vodič, što u njoj ima više slobodnih elektrona. A izolatori su takve tvari, u kojima slobodnih elektrona praktički nema.

Svi su metali dobri vodiči električne struje. Doduše, svi metali ne vode električnu struju jednako dobro: srebro i bakar je vode gotovo 60 puta bolje nego kromnikalj. Ali je i kromnikalj provodi još uvijek izvanredno dobro prema drugim tvarima. Osim metala ima i drugih vodiča. To su na pr. grafit, ugljen, kiseline, lužine, rastopine soli, nečista voda.

Kao izolatori upotrebljavaju se u elektrotehnici, na primjer, staklo, porculan, mramor, kvarc, tinjac, mikanit, papir, tlačna ljepenka, razne druge umjetne stlačene tvari, guma, svila, pamuk, šelak, parafin, ulje i drugo. Kao što ima boljih i lošijih vodiča, tako ima i boljih i lošijih izolatora. Tinjac je na pr. daleko bolji izolator od mramora.

Vodiči i izolatori su u elektrotehnici jednako važni. Prvi nam služi za vođenje struje, a drugi zato, da struja ne bi pošla onuda, kuda ne želimo. Jedan od najvažnijih električnih izolatora je zrak. Kad zrak ne bi bio izolator, obični nadzemni vodovi ne bi bili mogući.

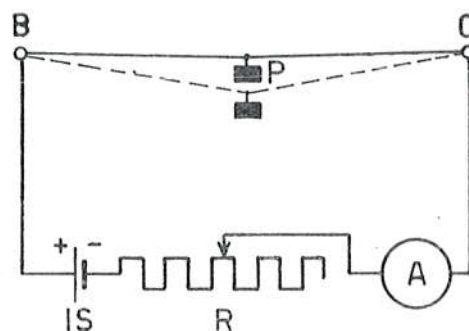
1.3. DJELOVANJA STRUJE

Električna se struja ne može nijednim od naših osjetila neposredno zamijetiti. Jedino kad prolazi kroz naše tijelo, ona proizvodi grčenje mišića, manje ili više neugodno — već prema jakosti struje. Iznad izvjesne granice električna struja postaje opasna, jer njezino djelovanje na pojedine sastavne

dijelove našega tijela postaje tako jako, da oni mogu biti oštećeni, pa na taj način može biti prouzrokovana i vrlo brza smrt. Normalno, međutim, mi ne želimo doći u neposredni dodir s dijelovima naših električnih naprava, kojima teče struja, već se služimo drugim sredstvima, da je ustanovimo. Električna struja proizvodi naime različite učinke, po kojima je možemo ustanoviti, a — što je još mnogo, mnogo važnije — zbog kojih je možemo iskoristiti. Svakome je danas poznato, da se električna struja iskorišćuje na gotovo nebrojeno mnogo načina, u gotovo neiscrpno različite svrhe: od električnih željeznica do električnih sijalica, od pogona ogromnih motora do pogona aparata za brijanje, od elektrokemijskih procesa do telefona, od električnih peći do radioaparata i t. d., i t. d. Prema raznolikosti tih primjena električne struje čini se, da su njezine osobine i njezini učinci izvanredno mnogobrojni, i da se napretkom elektrotehnike pronalaze uvijek nove osobine i novi njezini učinci. No, začudo, sve se te bezbrojne, prerasličite primjene električne struje osnivaju na četiri njezina osnovna djelovanja: na njezinom toplinskom, kemijskom, elektromagnetskom i svjetlosnom djelovanju. Gotovo sve primjene nisu drugo već vješto iskorišćivanje, kadšto spretna kombinacija pojedinih ovih djelovanja električne struje, pa i gotovo svaki novi izum, koji se osniva na djelovanju električne struje, iskorišćuje — na ovaj ili onaj način — jedno ili više od njezinih spomenutih djelovanja.

1.4. TOPLINSKO DJELOVANJE STRUJE

Kad električna struja teče kroz neki vodič, ona ga grije. To možemo vrlo lako primijetiti, ako struju dovoljne jakosti pustimo teći kroz komad žice, koji smo napeli između točaka B i C na sl. 2. Nakon nekog vremena primijetiti ćemo, da je provjes žice postao veći, jer se žica zbog ugrijanja rastegnula (kao što se svako tijelo rasteže, ako se grije). Pa i dodiranjem te žice lako bismo se uvjerali, da se ona doista ugrijala. Kao što ćemo kasnije još malo potanje razložiti, žica će se ugrijati to jače, što je jača struja, koja kroz nju teče, što je žica tanja i što materijal, od kojega je žica izgrađena, slabije provodi električnu struju.



Sl. 2. Zbog protjecanja struje vodič B—C grije se i rasteže.

IS—izvor struje*, R—otpornik za reguliranje jakosti struje**, A—ampermetar (instrument za mjerenje jakosti struje), P—uteg.

* Znakom (simbolom) kao na slici označuju se općenito izvori istosmjerne struje, a posebno galvanski članci i akumulatori (o kojima ćemo govoriti kasnije).

** Znakom (simbolom):



prikazuje se otpornik, a znakom:



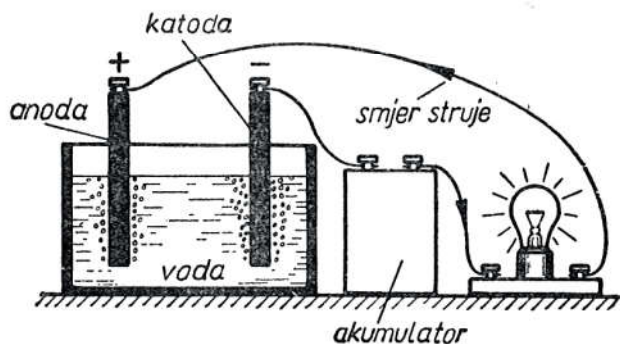
otpornik, pomoću kojega se jakost struje može mijenjati (regulirati).

Opće je poznato, da se ovo djelovanje električne struje iskorišćuje na vrlo različite načine. Na tome se osnivaju sve električne peći, kuhala, glačala, termofori, sva moguća različita električna grijala i još čitav niz različitih aparata i uređaja, koji svi zajedno idu u područje primjene *elektrotopline*. Svi oni na neki način izrabljuju činjenicu, da se tijelo, kojim prolazi struja, grije. Pa čak su i naše žarulje ustvari takvi elektrotoplinski aparati. U žarulji je smještena vrlo tanka metalna žica, tako tanka, da se ona zbog prolaza električne struje ugrije na vrlo visoku temperaturu. Dok se kod električnih peći žica ugrije samo do tamnocrvenog žara, dotle se kod žarulja ugrije tako jako, da jarko (intenzivno) svijetli.

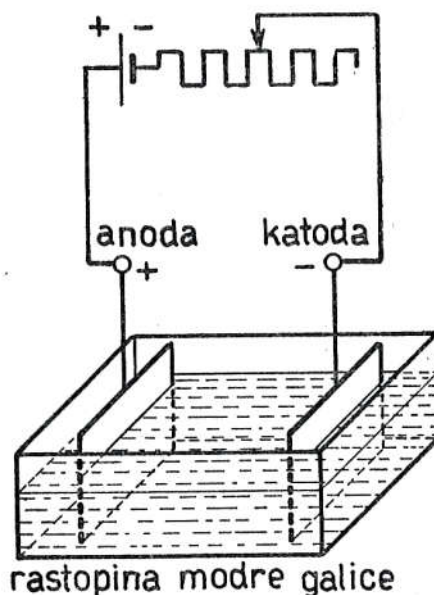
Ipak, makar nam ovo toplinsko djelovanje struje tako dobro dolazi kod vrlo mnogih primjena, ono nam je često i vrlo neprilično. Električna struja grije vodiče, kojima teče, i onda, kad mi to ne želimo. Na pr. kod naših kućnih instalacija električna struja grije izolirane vodiče, od kojih se te instalacije sastoje. Ako bismo upotrebili suviše tanke vodiče, oni bi se mogli tako jako ugrijati, da bi se mogla oštetiti izolacija ili da bi čak moglo doći do požara. Zbog toga moramo sve vodiče, kojima teče struja, dovoljno odmjeriti (dimenzionirati) tako, da najveća temperatura, na koju se oni u pogonu mogu ugrijati, ne prijeđe dozvoljene granice. Toplinsko djelovanje električne struje sili nas dakle, da povećamo presjeke kod naših instalacija, strojeva, transformatora i t. d. A to je, dakako, više ili manje skupo, te često znatno poskupljuje izvedbu tih naprava. Toplinsko djelovanje struje ima dakle osim svojih vrlo dobrih i svoje vrlo loše strane.

1.5. KEMIJSKO DJELOVANJE STRUJE

Električna struja ne može teći svim tekućinama. Na pr. uljem ili destiliranom vodom struja ne teče: ulje i destilirana voda jesu prema tome izolatori. Uspemo li u destiliranu vodu neku, makar malu, količinu kakve kiseline ili soli, voda postane vodljiva za električnu struju. Žarulja na slici 3. svijetlit će, jer struja može sada teći kroz vodu. Kod takvog se međutim pokusa odmah može opaziti, da se na mjestima, gdje struja ulazi i izlazi iz vode, stvaraju mjehurići plina, koji izlaze u zrak. Kemijska analiza toga plina pokazuje, da



Sl. 3. Elektroliza vode: Struja rastvara nečistu vodu na sastavne elemente: vodik i kisik.



Sl. 4. Iz metalnih soli struja izlučuje metale.

se na mjestu, gdje struja ulazi u vodu (na takozvanoj »anodi«), stvara kisik, dok se na mjestu, gdje struja izlazi iz vode (na »katodi«), stvara vodik. Kako se voda sastoji od vodika i kisika, vidi se, da se ona rastvara na svoje sastavne dijelove, kad kroz nju prolazi struja.

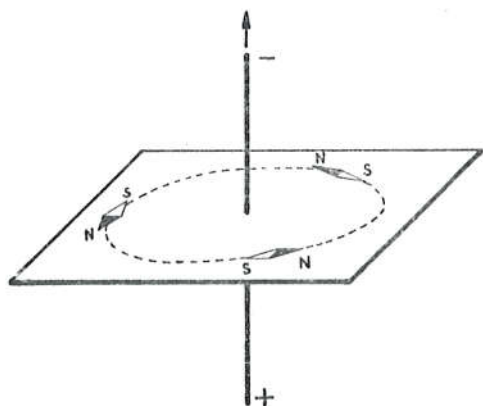
Tvari, koje provode električnu struju, a koje se pri njezinu prolazu rastvaraju, nazivaju se *elektroliti*, dok se sama ova pojava, ovo kemijsko djelovanje struje naziva *elektroliza*.

Izvanredno je važna elektroliza rastopina raznih metalnih soli. Ako pustimo struju da teče, na pr., kroz rastopinu modre galice ili, kako se to u kemiji naziva, bakrenog sulfata, i to tako, da uronimo u tu rastopinu dvije metalne ploče, na pr. od bijelog lima (slika 4.), vidjet ćemo nakon nekog vremena, da se katoda (t. j. ploča, na koju struja izlazi) pobakrila. To se bakar iz rastopine izlučio na katodi.

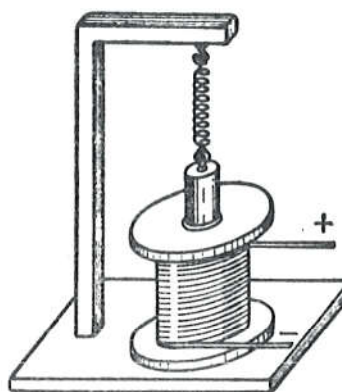
Elektroliza se iskorišćuje u tehnici na vrlo različite načine, pa čini osnovu za danas vrlo razgranatu elektrokemijsku industriju.

1.6. MAGNETSKO DJELOVANJE STRUJE

Ako u blizinu vodiča, kojim teče struja, dovedemo magnetsku iglu, vidjet ćemo, da će se ona pod djelovanjem struje zakrenuti te zauzeti sasvim određeni položaj prema vodiču (slika 5.). Ako pustimo, da struja teče kroz neki

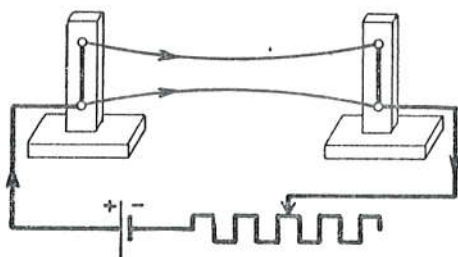


Sl. 5. Magnetska igla u blizini vodiča, kojim teče struja, zauzima točno određeni položaj.

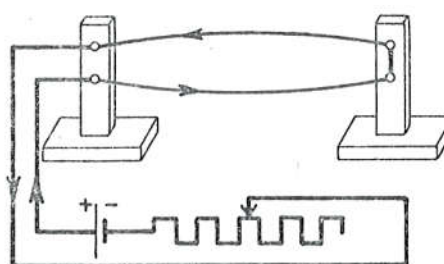


Sl. 6. Svitak, kojim teče struja, vlada se kao magnet. On uvlači meki čelik to jače, što je struja jača.

svitak, vidjet ćemo, da će se taj svitak ponašati kao magnet, da će upravo kao magnet privlačiti pojedine komadiće čelika ili željeza ili predmete od čelika, odnosno željeza (slika 6.). *Električna struja proizvodi dakle neko magnetsko djelovanje*. Ako približimo dva vodiča, kojima teče struja (slika 7. i 8.), vidjet

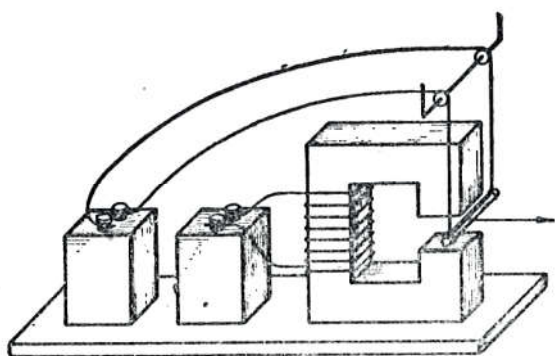


Sl. 7. Vodiči, u kojima struja teče u istom smjeru, privlače se.



Sl. 8. Dva vodiča, kod kojih je smjer struje protivan, odbijaju se.

ćemo, da će ta dva vodiča jedan na drugi djelovati nekom silom. Ako je smjer struje u oba vodiča jednak, oni će se privlačiti, ako je različit, oni će se odbijati.



Sl. 9. Magnet nastoji otkloniti vodič, kojim teče struja.

Dovedemo li vodič, kojim teče struja, između oba pola potkovičastog magneta (slika 9.), magnet će nastojati, da taj vodič otkloni.

I ova je pojava posljedica magnetskog djelovanja električne struje, a ono se očituje na još mnogo načina.

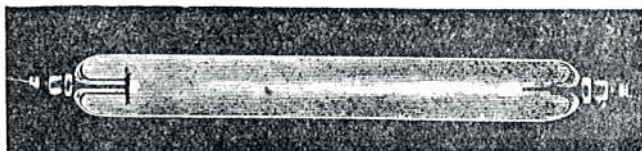
Uopće, međusobno djelovanje, povezanost između električnih i magnetskih pojava, o čemu ćemo još mnogo govoriti kasnije, spada među najbitnije i najvažnije

činjenice u čitavoj nauci o elektrici. A i za elektrotehničku praksu ove pojave su od nedogledne važnosti s obzirom na bezbroj primjena, koje se na tom osnivaju.

1.7. SVJETLOSNO DJELOVANJE STRUJE

Svima su poznate svjetlosne cijevi, koje daju svjetlost različitih boja, a koje se upotrebljavaju ponajviše u reklamne svrhe. One se pritom daleko manje griju nego sijalice. Svjetlost u njima očito ne nastaje stoga, što se usije neka žica ili plin u njima.

Ovakve svjetlosne cijevi rade u načelu kao ona na slici 10. Plin je u njima vrlo razrijeđen, pod malim tlakom. U oba kraja cijevi uvedene su metalne elektrode, ali tako, da u cijev ne može ući zrak. Pod utjecajem električne struje nastaje u njima svjetlost. Boja te svjetlosti ovisi o vrsti plina, kojim je cijev punjena.



Sl. 10. Svjetlosno djelovanje struje: svjetlosna cijev.

Ovo svjetlosno djelovanje električne struje iskorišćuje se sve više u svjetlosnoj tehnici: na njemu se osnivaju i fluorescentne sijalice*.

1.8. ISTOSMJERNA I IZMJENIČNA STRUJA

Ima različitih vrsta električne struje. Za upoznavanje osnovnih zakona električne struje najjednostavnija je *istosmjerna struja*. Ona je i najprije otkrivena. To je takva struja, koja teče uvijek u istom smjeru te ne mijenja naglo ni svoje jakosti. To je struja, kakvu nam daju, na pr., džepne baterije i akumulatori. Budući da je takva struja najjednostavnija, proučavat ćemo najprije nju te ćemo nastojati, da kod nje upoznamo osnovne pojmove i zakone.

No danas se u elektrotehničkoj praksi mnogo više od istosmjerne struje upotrebljava *izmjenična struja*. To je takva struja, koja neprestano mijenja svoju jakost, a mnogo puta u sekundi i svoj smjer. Ona u žicama teče čas amo, čas tamo.

Sve ostale vrste struje uglavnom su ili vrste izmjenične struje (koje se razlikuju prema tome, kako i kojom brzinom se mijenjaju jakost i smjer izmjenične struje) ili su kombinacija istosmjerne i izmjenične struje.

* U fluorescentnim sijalicama nastaje zapravo nevidljivo ultraljubičasto zračenje, koje se tek na staklu sijalice pretvara u vidljivu svjetlost. To se ultraljubičasto zračenje ne razlikuje međutim u suštini od vidljive svjetlosti.

1.9. JAKA I SLABA STRUJA

U doslovnom značenju riječi *jaka struja* je ona, koja izvodi velike električne učinke, a *slaba struja* je ona, koja izvodi male električne učinke. Kadšto se, međutim, čitavo područje elektrotehnike dijeli na područje *jake struje* i na područje *slabe struje*. Područje *jake struje* obuhvaća onu cjelokupnu primjenu elektrike, gdje se električna struja upotrebljava za pogon motora, za grijanje, rasvjetu i za elektrokemijske svrhe. U područje *slabe struje* idu sve one primjene, kod kojih se električna struja upotrebljava u signalne svrhe u širem smislu (na pr. telefonija, telegrafija, radiotehnika, televizija i t. d.).

Ovakva podjela elektrotehnike ima svoje historijsko značenje, a zadržali su je sve do danas. No valja upamtiti, da struja, s kojom imamo posla u tehnici »slabe« struje, nije uvijek slaba, a isto tako ni struja u tehnici »jake« struje nije uvijek jaka.

1.10. JEDINICE ZA MJERENJE STRUJE

Da možemo međusobno uspoređivati struje različite jakosti, mora postojati jedinica, pomoću koje te struje možemo mjeriti. Slično, ako dvije duljine hoćemo međusobno usporediti, moramo ih također mjeriti. Za mjerenje duljine danas se općenito kao jedinica upotrebljava metar. Jedinice se mogu proizvoljno odabrati, ali ne bi bilo praktično, kad bi svatko upotrebljavao drugu jedinicu. Stoga se jedinice odabiru tako, da budu što prikladnije, pa se onda internacionalno propisuju međunarodnim sporazumima. Na pr., kao jedinica za težinu već je dugo izabrana težina jedne litre vode, koja je prozvana kilogram i općenito internacionalno usvojena.* Kao jedinicu za duljinu nekad su odabrali četrdesetmilijunti dio opsega Zemljine kugle preko polova, pa je ta jedinica prozvana metar.* Jedinica za mjerenje temperature danas je općenito stupanj Celzija, a to je stoti dio razlike temperature vrelišta i ledišta vode, gdje je vrelište vode 100°C , a ledište 0°C .

Ako hoćemo odabrati jedinicu za struju, treba za to iskoristiti jedno od njezinih osnovnih djelovanja. Prije se za to iskorišćivalo kemijsko djelovanje struje. Kad struja teče kroz rastopinu neke metalne soli, ona (kao što ćemo i kasnije razložiti), izlučuje iz takve rastopine čisti metal. Izlučena količina metala bit će to veća, što je struja jača i što dulje teče. Prije se za jedinicu jakosti struje uzimala jakost one struje, koja iz rastopine srebrnog nitrata izluči u jednoj sekundi 1,118 miligrama srebra. Ta je jedinica po zaslužnom francuskom fizičaru Ampère-u (čitaj: Amper) prozvana *amper*, što se skraćeno piše velikim slovom A.

No god. 1946. odlučio je Međunarodni komitet za mjere i utege, da se s 1. januarom 1948. elektrotehničke jedinice drukčije odrede. Za to je bilo nekoliko razloga, a najvažniji je bio taj, da se elektrotehničke jedinice dovedu posve u sklad s već prije utvrđenim osnovnim jedinicama za duljinu, masu i vrijeme. Novi način određivanja jedinice za struju ne iskorišćuje više njezino kemijsko, već njezino *elektromagnetsko* djelovanje. Dva vodiča na slikama 7. i 8. djelovat će jedan na drugi to jačom silom, što su bliže, što su dulji, te što je struja kroz njih jača. Jedinica za jakost struje ostala je i nadalje amper. No ona je danas određena ovako:

1 amper je jakost one struje, koja teče kroz dva ravna vrlo duga i vrlo tanka vodiča međusobno udaljena 2 metra, kad oni jedan na drugi djeluju silom 0,0102 miligrama po metru svoje duljine.

* Jedinica kilogram određena je danas međunarodnim utegom od platin-iridija, a jedinica metar međunarodnim mjerilom također od platin-iridija. I taj uteg i mjerilo čuvaju se u Francuskoj.

1 amper određen na ovaj način razlikuje se sasvim neznatno, oko $\frac{1}{30}\%$, od ampera određenog na prijašnji način. Prema tome ta promjena utječe samo na sasvim precizna laboratorijska mjerenja.

Iz razloga, u koje se ne ćemo upuštati, nazivaju ovaj amper »apsolutni amper«, dok se onaj stari naziva »internacionalni amper«.

Kolika je to struja 1 A, da li je to osobito jaka ili sasvim slaba struja? Niti naročito jaka, a niti sasvim slaba. Za usporedbu evo nekoliko primjera (navedene vrijednosti su približne):

struja pri udaru munje do	300 000 A
talionička električna peč do	100 000 A
struja u sabirnicima velikih elektrana	10 000 A
struja kod svarivanja	1 000 A
tramvaj	100 A
sobna električna peč od 2 kilovata	9 A
glačalo	2 A
sijalica 40 vata	0,18 A
radio-cijevi	0,0005 A
najmanja struja, koja se još daje mjeriti	0,000 000 001 A
(jedna bilijuntinka ampera).	

Metar nije uvijek najprikladnija jedinica za mjerenje duljine, kadšto je prevelik, a kadšto premalen. Stoga se često upotrebljavaju i njegovi dijelovi decimetar, centimetar i milimetar te njegov višekratnik kilometar. Dodatak »deci« znači deseti dio, pa je prema tome decimetar deseti dio metra. Dodatak »centi« znači stoti dio, a dodatak »mili« hiljaditi dio, pa su prema tome centimetar, odnosno milimetar stoti, odnosno hiljaditi dio metra. Dodatak »kilo« znači 1000 puta više, pa prema tome 1 kilometar (1 km) ima 1000 metara.

Slično je i kod struje. Osim 1 A upotrebljava se

1 kA (kiloamper) = 1000 A;

1 mA (miliamper) = 0,001 A, t. j. hiljaditi dio jednoga ampera;

1 μ A* (mikroamper) = 0,000 001 A, t. j. milijunti dio jednoga ampera, jer dodatak »mikro« znači milijunti dio.

Zadatak 1.** 0,07 (0,45; 0,0002) A — koliko je to mA?

Zadatak 2. 3,5 (420; 15) mA — koliko je to A?

1.11. KOLIČINA ELEKTRIKE

Ako kroz neku cijev proteče u sekundi 3 l vode, a voda je tekla istom brzinom 10 sekunda, količina vode, koja je protekla kroz tu cijev, iznosi 30 litara. Ako kroz neki vodič teče električna struja 3 A, pa ta struja teče kroz vodič 10 sekunda, količina elektrike, koja je protekla kroz vodič, iznosi $3 \times 10 = 30$ ampersekunda ili, oznakom, 30 As***. Jedinica za količinu elektrike je dakle As, a to je ona količina elektrike, koja proteče kroz neki vodič za

* μ je grčko slovo, a zove se »mi«.

** Svaki zadatak sadrži zapravo 3 zadatka, kod čega su brojčane vrijednosti drugih dvaju sadržane u zagradi. Ta su 3 zadatka ova:

a) 0,07 A — koliko je to mA? (Rješenje vidi na strani 258.)

b) 0,45 A — koliko je to mA? Za domaće zadatke.

c) 0,0002 A — koliko je to mA? Za domaće zadatke.

Na isti su način zadani i skoro svi ostali zadaci.

*** Za sekundu je internacionalno usvojena oznaka s. Za sat je internacionalna oznaka h.

vrijeme 1 s, ako u tom vodiču teče struja 1 A. Jedinica As naziva se kadšto i kulon*, za koji se upotrebljava oznaka C:

$$1 \text{ As} = 1 \text{ C.}$$

Kao što se neka količina vode, na pr. 1 litra vode, sastoji od izvjesnog broja najsitnijih čestica vode, tako se i neka količina elektrike sastoji od izvjesnog broja najsitnijih čestica elektrike, elektrona. No ti su elektroni tako jako sitni, da se već 1 As sastoji od fantastično velikog broja od 6,3 trilijuna elektrona, a to je broj koji se piše ovako:

$$1 \text{ As} = 6\,300\,000\,000\,000\,000\,000 \text{ elektrona}^{**}$$

Zadatak 3. Kroz žicu je tekla struja od 20 (37; 5,6) A za vrijeme od 15 (42; 3,5) minuta. Kolika je količina elektrike protekla kroz tu žicu?

Zadatak 4. Količina elektrike mjeri se i u ampersatima (Ah). Koliko 1 Ah ima As?

1.12. GUSTOĆA STRUJE

Uzmimo bakrenu žicu 10 mm² presjeka. Neka kroz nju jedamput teče struja 20 A, a drugi put struja 50 A. U prvom slučaju imamo 20 : 10 = 2 ampera po kvadratnom milimetru presjeka, a u drugom slučaju 50 : 10 = 5 ampera po kvadratnom milimetru presjeka. Ovaj broj ampera po kvadratnom milimetru presjeka nekog vodiča nazivamo gustoćom struje. Rekli bismo dakle, da je u prvom slučaju gustoća struje 2 A/mm², a u drugom slučaju 5 A/mm².

Kroz vodič ne smije teći bilo kako jaka struja. Ako bi struja bila prejak, on bi se previše ugrijao. Naravno, vodič podnosi to jaču struju, što je deblji. No posve bi bilo krivo misliti, da svaki vodič od jednakog materijala pod jednakim prilikama podnosi po kvadratnom milimetru presjeka jednako jaku struju, t. j. da najveća dozvoljena gustoća struje u vodičima različite debljine, ali od jednakog materijala i pod jednakim prilikama, može biti jednaka. *Vodič se to slabije hladi, što je deblji.* Prema tome, *što je vodič deblji, podnosi manju gustoću struje.*

Na pr. za bakrene, gumom izolirane vodove za kućne instalacije dopuštena je za presjek 1 mm² najveća trajna struja 12 A, t. j. gustoća struje 12 A/mm². Za presjek 10 mm² najveća trajna struja smije iznositi 48 A, t. j. 4,8 A/mm², za presjek 120 mm² svega 255 A, t. j. 2,13 A/mm², a za presjek 500 mm² dozvoljeno je 660 A, t. j. samo 1,32 A/mm².

Dozvoljena gustoća struje ovisi osim toga i o materijalu vodiča. Kod bakra je ona veća nego kod aluminija, jer je bakar bolji vodič električne struje.

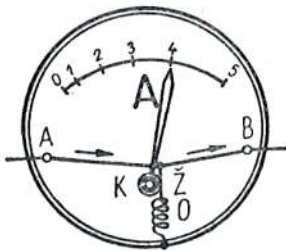
Zadatak 5. Kroz izolirani bakreni vodič 16 (1,5; 35) mm² dozvoljeno je, da teče struja od najviše 65 (16; 110) A. Kolika je kod toga gustoća struje?

* Prema francuskom fizičaru Coulombu (Čitaj: Kulon).

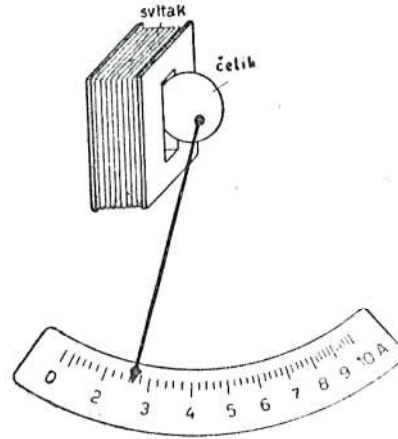
** Nitko dakako nije te elektrone izbrojio. Prvo zato, jer su daleko presitni, da bismo ih mogli neposredno vidjeti, a drugo, sve kad bismo raspolagali i nekim strojem, koji bi ih brojio 1 milijun u minuti, trebalo bi tom stroju 12 milijuna godina, da ih izbroji. Pa ipak je moderna nauka našla metode, pomoću kojih je bilo moguće odrediti električni naboj elektrona, t. j. onu izvanredno sitnu količinu elektrike, koju elektron tvori. Čim je to bilo moguće, nije više teško izračunati, koliko elektrona čini bilo koju količinu elektrike, pa i jednu ampersekundu.

1.13. MJERENJE STRUJE

Instrumenti za mjerenje struje nazivaju se *ampermetri*. Oni se međusobno razlikuju po principu, na kojem se osnivaju, i po svojoj tehničkoj, praktičnoj izvedbi. Za mjerenje struje može se upotrebiti njezino kemijsko, ili njezino toplinsko ili magnetsko djelovanje. Najmanje su praktični takvi instrumenti, koji izrabljuju kemijsko djelovanje struje. Oni se upotrebljavaju samo



Sl. 11. Termički ampermetar: Zbog ugrijavanja i rastezanja žice kazaljka se zakreće.



Sl. 12. Ampermetar s pomičnim željezom: Svitak uvlači komad mekog čelika to jače, što svitkom teče jača struja.

za posebna laboratorijska mjerenja, a zapravo i ne mjere struju, već količinu elektrike, koja je prošla kroz instrument za neko vrijeme, pa se onda iz te količine elektrike i iz proteklog vremena izračuna jakost struje. Budući da se ti instrumenti rijetko upotrebljavaju u elektrotehničkoj pogonskoj praksi, ne ćemo se na njima zadržavati.

Termički* ampermetri osnivaju se na poznatoj pojavi, da se metali kao i gotovo sva druga tjelesa kod porasta temperature rastežu. Princip jednog ovakvog instrumenta pokazan je na slici 11. Žicom A—B teče struja. Ta je žica napeta pomoću druge žice Ž, koja je obavijena oko kotačića K i koju na drugom kraju napinje cpruga (pero). Što jača struja teče kroz žicu A—B, to se ona jače grije, pa se i više rasteže; to je više žica Ž vuče prema dolje, a time se ujedno sve više zakreće kotačić K, a s njime i kazaljka.

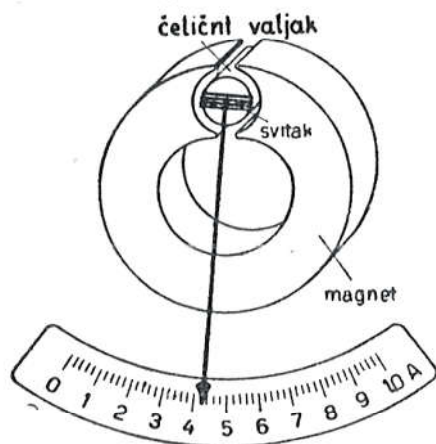
Ampermetar, koji iskorišćuje magnetsko djelovanje struje, prikazuje slika 12. Takav se ampermetar naziva ampermetar s pomičnim željezom. Kad svitkom protječe struja, on se vlada kao magnet, pa nastoji uvući komad mekog čelika, i to tim jače, što je struja jača. Pri uvlačenju tog čeličnog komada zakreće se kazaljka, koja na brojčaniku pokazuje jakost struje.

Jedan drugi ampermetar, koji također iskorišćuje magnetsko djelovanje struje samo na sasvim drugi način, prikazuje slika 13. Ovakav se ampermetar naziva ampermetar s pomičnim svitkom. Kod njega je svitak namotan na čelični valjak, koji je smješten u otvor jakog permanentnog** magneta. Kad struja teče kroz svitak, magnetsko polje permanentnog magneta

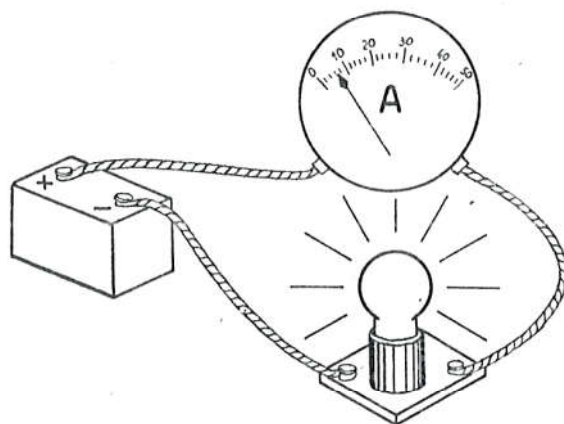
* Termički = toplinski.

** Permanentni magnet = trajni (stalni) magnet, kojega se magnetičnost s vremenom praktički ne mijenja.

nastoji svitak zakrenuti. Tomu se zakretanju odupire opruga, koja nastoji svitak vratiti u početni položaj (opruga nije narisana na slici). Magnet će moći svitak zakrenuti to jače, što je jača struja, koja teče svitkom. Zajedno sa svitkom zakreće se i kazaljka, koja na brojčaniku pokazuje jakost struje.



Sl. 13. Ampermetar s pomičnim svitkom: Svitak se između polova trajnog magnet-a zakreće to jače, što njime teče jača struja.



Sl. 14. Ampermetar treba uključiti u strujni krug. Da izmjerimo struju kroz žarulju, treba da struja teče i kroz ampermetar.

Kako se pomoću takvih instrumenata, ampermetara, mjeri struja? Na-prosto tako, da se ampermetar uključi u strujni krug, da kroza nj protječe struja, kako je pokazano na slici 14. Kazaljka ampermetra otklonit će se međutim samo, ako je smjer struje kroz ampermetar ispravan. Ako smjer struje koz ampermetar ne bi bio ispravan, pa bi se kazaljka htjela otkloniti na obratnu stranu, na koju ne može, tome je lako doskočiti. Ne treba drugo, nego izmijeniti priključak na stezaljke ampermetra, t. j. onaj vodič, koji je bio spojen na lijevu stezaljku, treba spojiti na desnu i obratno.

2. STRUJNI KRUG, NAPON, OTPOR

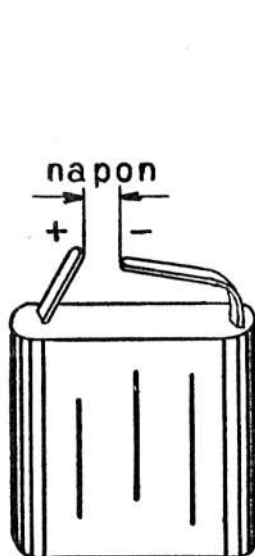
2.1. ELEKTRIČNI STRUJNI KRUG, ELEKTROMOTORNA SILA

Ako otvorimo pipac našeg vodovoda, iz vodovodne će cijevi istjecati voda. Zašto? Zato, što je voda u vodovodnim cijevima pod tlakom. Taj tlak obično nastaje na taj način, što su cijevi spojene s poviše smještenim spremnikom, pa voda u tom spremniku tlači zbog svog višeg položaja, a pod utjecajem sile teže, na vodu u vodovodnim cijevima. U sam pak spremnik vodu dobavljaju pumpe, koje je crpu iz jednog ili više bunara te je tlače tako, da voda kroz posebne cijevi struji do spremnika. A što se događa s onom vodom, koja izlazi iz naše slavine? Ta voda, ako je pustimo, otječe odvodnim kanalom, dolazi eventualno u neku rijeku, pa čak i do mora, ako se putem ne ispari, — sve pod utjecajem sile teže.

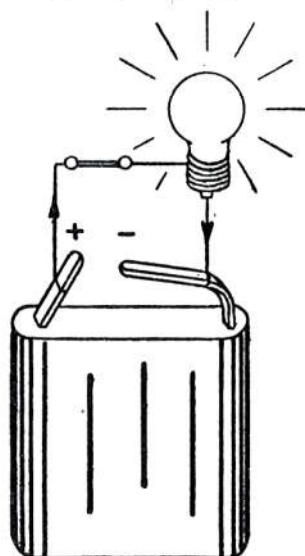
Uopće nikakvo gibanje u prirodi ne nastaje bez nekog uzroka, pa tako i svako strujanje ima svoj uzrok. U gornjem primjeru uzrok strujanju vode bila je s jedne strane pumpa, koja je vodu tlačila do spremnika, a s druge strane sila teža, zbog koje se voda gibala sve na niže i niže, pa možda čak i do mora. I električna struja je jedna vrst strujanja: ona je gibanje, strujanje

vrlo sitnih čestica elektrike, koje se nazivaju elektroni. Kao što je za gibanje čestica vode potrebna sila, tako je i za gibanje elektrona potreban neki uzročnik; ni oni se ne gibaju sami od sebe. Taj uzročnik, koji je potreban, da se oni pokrenu i održe u gibanju, zovemo *elektromotornom silom*. Takve tehničke naprave, koje stvaraju elektromotornu silu, nazivaju se općim imenom *izvori struje*. Kao što pumpa pokreće čestice vode u izvjesnom smjeru, tako i izvor struje nastoji pokrenuti elektrone u određenom smjeru, on nastoji proizvesti gibanje, strujanje elektrona.

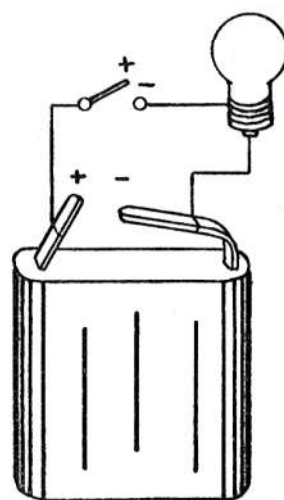
Jedan takav izvor struje je, na primjer, naša obična džepna baterija (slika 15.). U njoj nastaje elektromotorna sila kao posljedica kemijskih procesa, koji se u njoj zbivaju. Ovakva džepna baterija ima dva izdanka, *plus (+)* i *minus (-)* pol. No sama elektromotorna sila, koja nastaje u toj džepnoj bateriji, još nije dovoljna za stvaranje struje. Ona, doduše, nastoji proizvesti struju, ali može to učiniti tek onda, kad je ispunjen još jedan uvjet, a taj je, da je »struj-



Sl. 15. Na minus - polu izvora struje nagomilavaju se elektroni, na plus - polu je manjak elektrona: težnja za izjednačenjem je električni napon.



Sl. 16. Strujni krug je zatvoren: struja teče, žarulja svijetli.



Sl. 17. Strujni krug je otvoren: struja ne teče.

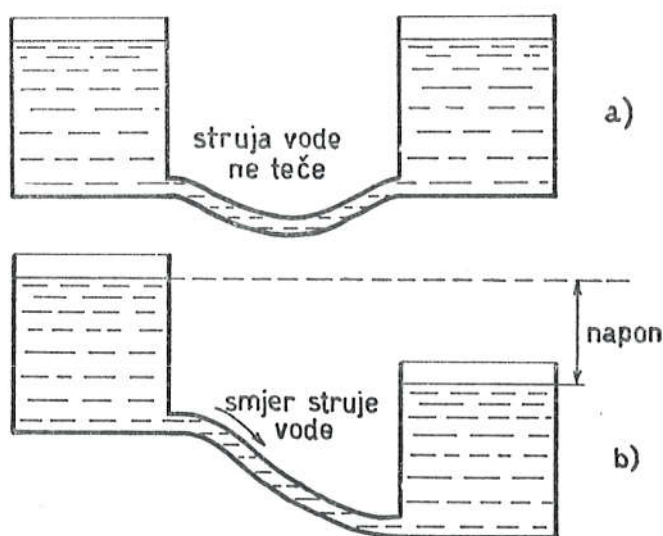
ni krug» zatvoren (slika 16.). *Električni strujni krug istosmjerne struje* je takvo međusobno povezivanje vodiča, koje omogućuje, da se elektroni pošavši s jednog mjesta tog strujnog kruga i obiđavši cijeli strujni krug vrata na polaznu točku. Elektron, koji bi na pr. pošao s minus-pola džepne baterije na sl. 16., došao bi preko žarulje, sklopke, plus-pola baterije i same džepne baterije natrag na minus-pol, dakle na polaznu točku. No taj će elektron to moći učiniti samo onda, ako strujni krug nije nigdje prekinut, t. j. ako je sklopka uključena, ako žarulja nije pregorela, te ako ni dovodna ni odvodna žica nisu nigdje prekinute. Strujni krug ne mora dakako biti ni sličan geometrijskom krugu, a to gotovo nikad ni nije. On može biti vrlo kratak, poput onoga na slici 16., a može biti dugačak i nekoliko stotina kilometara, na pr. kod prijenosa električne energije na velike daljine.

Elektroni ne će izaći iz metalnih vodiča u okolni zrak kao voda iz cijevi. Zrak je za električnu struju izolator: on vodi električnu struju samo pod naročitim okolnostima, i to kod izvanredno visokih napona (na pr. munja). Osim

toga, elektroni se ne će skupljati na jednom mjestu u bilo kojim količinama, kao voda. Ne postoji »more« elektrona kao kod vode, a nije ni moguće elektrone skupiti u nekoj posudi. Oni se slobodno kreću samo u vodičima, i to po prirodnim zakonima sasvim različitim od onih, koji vrijede za kretanje čestica vode. Na elektrone nimalo ne utječe sila teže, oni su za nju neosjetljivi oni su podložni drugim silama, koje ih stavljaju u gibanje. Bitna je dakle razlika između gibanja elektrona i gibanja čestica vode. Ipak ćemo se često poslužiti usporedbom između električne struje i vode, jer usprkos razlikama ima i sličnosti između strujanja vode i strujanja elektrona. Koristeći sličnosti možemo kadšto neke električne pojave učiniti zornijima uspoređujući ih s pojavama kod vode, na koje smo iz svakodnevnog života više navikli.

2.2. ELEKTRIČNI NAPON

Što će biti, ako strujni krug nekog izvora struje nije zatvoren, ako na pr. na izdanke naše džepne baterije sa slike 15. nije ništa priključeno. Baterija



Sl. 18. Napon između dvije posude jednak je razlici razine vode u njima. Struja vode u spojnoj cijevi jača je, što je napon veći.

rije. A čim to bude, nastaje mirovanje, jer dvije jednake, ali protivne sile drže ravnotežu: nikakva struja više ne teče.

Kao posljedica elektromotorne sile ostaje međutim to, da elektroni nisu jednoliko raspodijeljeni, već je na jednom polu njihov pretičak, a na drugom polu njihov manjak. Manjak elektrona upravo je toliki, koliki je pretičak. Manjak elektrona znači manjak negativnog električnog naboja, a to opet nije drugo nego pretičak pozitivnog naboja. Na negativnom, minus-polu postojat će dakle negativni, a na pozitivnom, plus-polu pozitivni električni naboj. Kako se ovi različiti naboji privlače, postoji između oba pola neka težnja za izjednačenjem, neko napeto stanje, ili — kako se to u elektrotehnici kaže — vlada *električni napon*.

Napon je posljedica elektromotorne sile. On, kao i elektromotorna sila, postoji i onda, kad je strujni krug otvoren, t. j. kad struja ne teče. Ako se pak nekim vodičem međusobno spoje dvije točke, između kojih postoji napon, poteći će između te dvije točke električna struja. Ako međusobno spojimo dvije

će nastojati, da potjera elektrone u izvjesnom smjeru. To će ona i učiniti, ali samo kroz kratko, vrlo kratko vrijeme, jer će se ubrzo na njezinom negativnom (minus) polu skupiti elektroni tako, da oni ne će više biti po cijeloj bateriji podjednako porazdijeljeni, već će na negativnom polu nastati višak elektrona, a na pozitivnom polu manjak. No ta razlika u količini elektrona ne će moći prijeći izvjesnu granicu, jer se elektroni međusobno odbijaju, pa će se daljnjem okupljanju odupirati nekom silom, koja će ubrzo (za neznatni djelić sekunde) biti upravo tolika, kolika je i sama elektromotorna sila baterije.

točke, između kojih ne vlada nikakav napon (ili, kako se još kaže, između kojih je napon jednak nuli), ne će kroz spojni vodič teći nikakva struja. Struja će dakle teći samo onda, kad postoji električni napon, i bit će uz inače jednake okolnosti to jača, što je napon veći.

Pa i kod vode ima nešto slično ovome. Uzmimo dvije međusobno spojene posude. Dok su obje posude na istoj visini i jednako napunjene vodom (kao na slici 18.a), ne će kroz spojnu cijev teći nikakva voda. Između jedne i druge posude nema nikakvog »napona«. Ako pak jednu posudu podignemo (slika 18.b), voda će kroz spojnu cijev teći iz više posude u nižu. Struja vode kroz spojnu cijev bit će to jača, što je veća razlika visina, na kojima se posude nalaze, jer će u tom slučaju i »napon« biti veći. Ako je u spojnoj cijevi neki pipac, pa taj pipac zatvorimo, voda ne će teći. »Napon« će međutim postojati i dalje, iako »struja« vode ne teče — jednako kao i kod elektrike.

I toplina »struji«. Toplina, kao što je poznato, nastoji prijeći od toplijeg tijela na hladnije, od mjesta više temperature prema mjestu niže temperature. Ako je temperatura svagdje jednaka, nema nikakvog prijelaza topline; prijelaz topline, »struja« topline postojat će samo onda, ako postoji razlika temperature. Naponu kod elektrike odgovara ovdje razlika temperature, koja predstavlja neki »toplinski napon«.

Rekli smo, da se električna struja širi po vodičima brzinom, koja obično ne doseže ni 1 mm u sekundi. No mi iz iskustva znamo, da se električna žarulja upali praktički u istom trenutku, kad uklopimo sklopku, ma kako daleko bila sklopka od žarulje. Kako je to u skladu?

Evo u čemu je stvar. Uklapanjem sklopke narinemo na vod napon, a taj se napon širi u vodu fantastičnom brzinom od gotovo 300 000 kilometara u sekundi i on uzrokuje, da se elektroni duž cijelog voda počnu gibati praktički istovremeno. I kod 300 km dugačkog voda svi se elektroni pokrenu za 1/1000 sekunde! U cijelom vodu poteče struja gotovo u isti čas, ali je gibanje elektrona ipak vrlo sporo.

Slično je i kod vode. Uzmimo vrlo dugačku cijev, na pr. od Zagreba do Karlovca i natrag zatvorenu samu u sebe, a punu vode. To je, da se tako izrazimo, zatvoreni krug vode. Ako pokrenemo pumpu, koja se nalazi u tom krugu vode, čestice vode će se (zbog nestlačivosti vode) pokrenuti gotovo u istom trenutku u cijelom strujnom krugu, premda će se gibati možda vrlo sporo po cijevi. Tlak (»napon«), koji daje pumpa, proširit će se gotovo trenutačno, ali struja vode je spora.

2.3. JEDINICE ZA MJERENJE NAPONA

Prvi bar donekle trajni izvor struje izumio je Talijan Volta. To je on učinio tako, da je (vidi sliku 73.) u razrijeđenu sumpornu kiselinu stavio ploču od bakra i ploču od cinka. Između takve dvije ploče postoji električni napon, pa će poteći struja, ako ih spojimo nekom žicom tako, da strujni krug bude zatvoren. Ovakva se naprava zove Voltin element, a ide u red galvanskih elemenata, o kojima ćemo govoriti kasnije. Napon ovog elementa, kad je strujni krug otvoren, uzet je svojedobno za jedinicu za napon i nazvan volt (oznaka jedinice: V).

Napon Voltina elementa nije međutim stalan, već se ubrzo smanji, čim element daje struju. Stoga on uopće nije prikladan za praktičnu upotrebu, a još manje za mjerenja. Jedinica za napon je danas određena (definirana) na sasvim drugi način, premda je svojom veličinom ostala približno jednaka. Za usporedbu pri preciznim mjerenjima uzima se napon takozvanog normalnog Westonova elementa, koji iznosi 1,0183 pri 20° C.

Da se bar donekle dobije slika o tome, koliki je to napon 1 V, navest ćemo nekoliko primjera:

napon pri udaru munje do	1 000 000 000 V
najviši napon u laboratoriju	10 000 000 V
najviši napon za prijenos električne energije	380 000 V
visoki napon u razdionim mrežama	3 000—35 000 V
tramvajska mreža	500—750 V
upotrebni napon u kućama	220 V
džepna baterija	4,5 V
ulazni napon radioaparata	0,000 005 V

U tehničkoj se praksi mnogo upotrebljavaju i veće i manje jedinice od volta, i to (slično kao kod mjerenja struje):

1 kV (kilovolt) = 1000 V;

1 mV (milivolt) = 0,001 t. j. hiljaditi dio volta;

1 μ V (mikrovolt) = 0,000 001 V, t. j. milijunti dio volta.

Zadatak 6. 30 (0,38; 110) kV — koliko je to volta?

Zadatak 7. 220 000 (15 000; 6 000) V — koliko je to kV?

Zadatak 8. 1 kV (1 mV; 23 mV) — koliko je to milivolta (mikrovolta; volta)?

Zadatak 9. 34,2 (116; 8,5) mV — koliko je to V?

2.4. ELEKTRIČNI POTENCIJAL

Kad se označuje visina neke gore, brda, mjesta i slično, ne označuje se njihova visina prema okolini, već njihova visina nad morem. U zemljopisnoj (geografskoj) karti možemo naći, da je na pr. nadmorska visina mjesta Fužine u Gorskom Kotaru 715 m, a mjesta Tribalj nedaleko Crikvenice u Hrvatskom Primorju 55 m. Visina Fužina nad Tribljem dobije se iz razlike njihovih nadmorskih visina te iznosi $715 - 55 = 660$ m. U Fužinama je načinjeno jezero, u kojem se skuplja voda iz tamošnjih potoka. To je jezero spojeno cijevnim vodom s Tribljem, pa je voda na kraju te cijevi u Triblju pod velikim tlakom. Taj tlak, taj »napon« vode jednak je, prema slici 18., visini mjesta Fužine nad mjestom Tribalj. On je prema tome jednak razlici njihovih nadmorskih visina. Ovaj tlak vode iskorišćuje velika hidroelektrana »Nikola Tesla« (Vinodol).

I u elektrotehnici ima nešto slično nadmorskoj visini. Ono značenje, koje za vodu ima nadmorska visina, ima kod električnih postrojenja napon prema zemlji. Taj napon prema zemlji nazivamo potencijal*. Pa kao što voda teče samo od mjesta veće nadmorske visine prema mjestu manje nadmorske visine, tako i električna struja teče samo od dijela postrojenja višeg potencijala prema dijelu postrojenja nižeg potencijala. Kao što je tlak, napon vode, jednak razlici nadmorskih visina, električni je napon jednak razlici potencijala.

To možemo najbolje objasniti na primjeru voda istosmjerne struje. Napon između oba vodiča neka iznosi 220 V. Vod može biti spojen tako, da jedan vodič nema nikakav napon prema zemlji. Potencijal, t. j. napon prema zemlji, drugog vodiča iznosi onda 220 V. Napon između oba vodiča jednak je razlici potencijala, t. j. $220 - 0 = 220$ V. Vod bi mogao biti i takav (kao što se to nekad kadšto i radilo), da jedan vodič ima potencijal, t. j. napon prema zemlji, 440 V, a drugi 220 V. Napon između oba vodiča i tada bi bio 220 V. Vod može napokon biti takav, da jedan vodič ima potencijal +110 V (pozitivan vodič), a drugi vodič potencijal -110 V (negativan vodič). Napon između vodiča i sada je jednak razlici potencijala, t. j. $110 - (-110) = 110 + 110 = 220$ V.

* To nije osnovno značenje potencijala. On ima i druga značenja, no ona su suviše složena, da bismo ih mogli objasniti u ovoj knjizi.

Negativni potencijal odgovara negativnoj nadmorskoj visini. Galerije mnogih rudnika su ispod razine mora. Kad bi u Triblju bio neki rudnik dubok 100 m, njegovo bi dno, t. j. njegova najniža točka imala nadmorsku visinu -45 m (minus četrdeset pet metara). Nadmorska visina Triblja je 55 m, pa bi okno bilo 55 m iznad razine mora, a dno $100 - 55 = 45$ m ispod njegove razine. Kad bi cijev iz fužinskog jezera (s visine od 715 m) nad morem sezala do dna tog rudnika, onda bi tlak na dnu cijevi bio jednak razlici nadmorskih visina t. j. $715 - (-45) = 715 + 45 = 760$ m.

Zadatak 10. Potencijal klizne žice na početku tramvajskog voda iznosi 550 (630; 580) V, a na kraju 480 (570; 500) V. Koliki je napon između početka i kraja klizne žice?

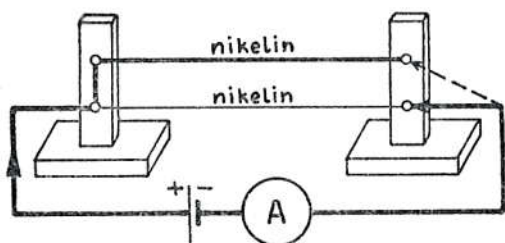
Zadatak 11. Na pruzi Rijeka—Trst voze električne lokomotive. Na stanici Postojna iznosi potencijal klizne žice 3300 (3150; 3080) V, a potencijal tračnice 30 (15; 20) V. Koliki je napon između klizne žice i tračnice?

Zadatak 12. U transformatorskoj stanici Dujmovača u Splitu ima velika akumulatorska baterija, koja se sastoji od velikog broja akumulatora. Odaberimo bilo koje dvije stezaljke tih akumulatora pa izmjerimo njihov napon prema zemlji. Napon prve prema zemlji neka iznosi 52 (44; 38) V, a napon druge 6 (28; 14) V. Koliki je napon između tih stezaljki?

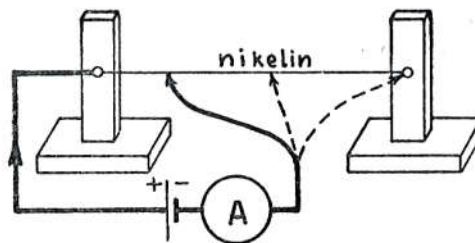
2.5. OTPOR

Struja vode kroz spojnu cijev na slici 18.b bit će jača, što je veća razlika visine između gornje i donje posude. No još o nečemu ovisi struja vode između tih posuda, i to očito o osobinama same spojne cijevi. Kroz deblju cijev moći će teći više vode nego kroz tanku, a ako bi cijev bila vrlo dugačka, voda bi se teže kroz nju probijala nego kroz kratku cijev: struja vode bila bi kroz dugačku cijev slabija. Možemo to izreći i tako, da kažemo, da debela i kratka cijev pružaju struji vode manji otpor nego tanka i dugačka.

Slično je i s električnom strujom. Da spoznamo, kakvi ovdje vladaju odnosi, načinimo ove pokuse:



Sl. 19. Što je veći presjek, to je manji otpor.



Sl. 20. Što je vod dulji, otpor je veći.

a) Uzmimo dvije jednako dugačke žice od nikelina, ali različitog presjeka, pa ih spojimo prema slici 19. tako, da možemo po volji jednu ili drugu uključiti u strujni krug. Mjerenje struje u jednom i drugom slučaju pokazuje da je struja kroz deblju žicu jača nego kroz tanku. Deblja žica pruža prema tome protjecanju struje manji otpor nego tanka.

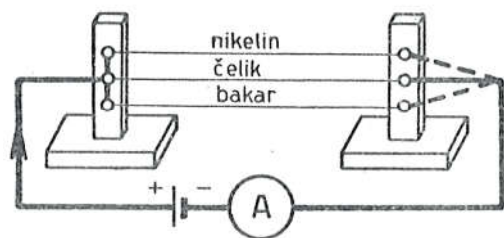
Upamtimo: *Što je veći presjek, to je manji otpor.*

b) Napnimo sad samo jednu žicu od nikelina između dva stalka, kao na slici 20.

Strujni krug zatvaramo na taj način, da s jednim krajem neke bakrene žice klizimo po žici od nikelina. Ampermetar pritom pokazuje, da će struja biti to manja, što je veći dio žice od nikelina uključen u strujni krug.

Zaključak: *Što je vod dulji, otpor je veći.*

c) Uzmimo tri žice jednake duljine i jednakog presjeka, ali od različitog materijala: jednu od nikelina, drugu od čelika, treću od bakra,



Sl. 21. Otpor ovisi i o materijalu vodiča.

pa ih spojimo prema slici 21. Preklapanje izvršimo tako, da jedamput bude u strujnom krugu žica od nikelina, drugi put čelična žica, a treći put bakrena žica. Mjerenje pokazuje, da je struja najmanja kod žice od nikelina, veća kod čelične žice, a najveća kod bakrene žice. Žica od nikelina pruža dakle struji najveći otpor, čelična žica manji, a bakrena najmanji.

Treba upamtiti: *Otpor ovisi i o materijalu vodiča.*

d) Napnimo opet samo jednu žicu (na pr. od bakra) između dva stalka, pa tu žicu grijmo. Vidjet ćemo, da je struja to manja, što smo jače žicu ugrijali.

Važno je znati i to, da otpor metalnih vodiča raste s porastom njihove temperature.

Otpor dakle ovisi o duljini vodiča, njegovu presjeku, materijalu, od kojega je načinjen, i o temperaturi, na koju je ugrijan.

Jedinica otpora je *om*, a oznaka te jedinice je Ω^* . Jedinica *om* dobila je naziv po njemačkom fizičaru Ohmu.

1 *om* je otpor između dvije točke vodiča, između kojih napon 1 volt tjera struju 1 amper.

Osim toga se upotrebljava i znatno veća jedinica $M\Omega$ (megom) = 1 000 000 Ω .

2.6. SPECIFIČNI OTPOR

Otpor ovisi, kako smo vidjeli, između ostaloga i o materijalu, od kojega je vodič načinjen. Da možemo otpor različitih materijala međusobno uspoređivati, najjednostavnije je, da se odredi za različite materijale, koliki je otpor žice načinjene od tog materijal, a dugačke 1 m i presjeka 1 mm². Tako određeni otpor je karakterističan, specifičan za dotičnu tvar, pa se zbog toga naziva *specifični otpor* ili *otpornost*.

Specifični otpor nekog materijala je otpor žice načinjene od tog materijala dugačke 1 m, presjeka 1 mm².

Specifični otpor bakra iznosi oko 0,0175 pri 20° C. Meki, izareni bakar ima manji specifični otpor, a specifični otpor tvrdog bakra je za 2 do 4% veći. Jednostavnosti radi računat ćemo u ovoj knjizi sa specifičnim otporom bakrenih vodiča 0,018. Za većinu praktičnih računa to je dovoljno točno

* Ω je veliko grčko slovo, koje se naziva »omega«.

Specifični otpori pojedinih metala (u Ω/m za 1 mm^2 presjeka):

srebro	0,016	željezo (čisto)	0,12 (granice 0,1 — 0,14)
bakar	0,018	čelik	0,15 („ 0,1 — 0,2)
aluminij	0,029	nikelin	0,40 („ 0,36—0,43)
aldrej	0,033	manganin	0,45 („ 0,43—0,48)
bronca	oko 0,028	konstantan	0,50 („ 0,40—0,51)
volfram	0,055	cekas	1,08
cink	0,061	kromnikalj	1,10 („ 1,0 — 1,15)
nikalj	0,09	kanthal	1,35 („ 1,35—1,45)
		željezo lijevano	0,5 — 2

Gornje vrijednosti su približne, a vrijede pri temperaturi 20°C .

Specifični otpor ugljena iznosi oko $50 \Omega/\text{m}$ za 1 mm^2 presjeka i pri 20°C .

Srebro je, kako se vidi iz ove tablice, najbolji vodič električne struje. No ono se zbog svoje skupoće upotrebljava u elektrotehnici samo u manjoj mjeri. Najviše se kao dobar vodič električne struje upotrebljava **b a k a r**, koji je znatno jeftiniji od srebra, a koji je od njega samo neznatno lošiji vodič. **A l u m i n i j** je također dobar vodič, pa se on mnogo upotrebljava, osobito za električne nadzemne vodove. Čelik je oko 8 puta lošiji vodič od bakra pa se kao vodič upotrebljava samo izuzetno. Nikelin, manganin, konstantan, cekas i kromnikalj su materijali za različite električne otpornike.

2.7. PROVOD I VODLJIVOST

Umjesto da za neki vodič kažemo da ima mali otpor za električnu struju, možemo reći, da on struju dobro vodi, da ima veliki **p r o v o d**. Tako možemo sposobnost neke tvari za vođenje električne struje, osim specifičnim otporom, izraziti i specifičnim provodom. Taj specifični provod nazivamo **v o d l j i v o s t**. Jedinica provoda je simens (prema njemačkom inženjeru i izumitelju Siemensu), a označuje se sa **S**. Provod 1 S ima ona žica, koja ima otpor 1Ω . Otpor i provod međusobno su obrnute, recipročne veličine, pa su to i njihove jedinice om i simens. U matematičkim formulama otpor se obilježuje slovom **R**, a provod slovom **G**. Između **R** i **G** postoji odnos:

$$R = \frac{1}{G}; \quad G = \frac{1}{R}.$$

$$\text{Na pr. a) } R = 2 \Omega; \quad G = \frac{1}{2} = 0,5 \text{ S.}$$

$$\text{b) } G = 0,04 \text{ S}; \quad R = \frac{1}{0,04} = 25 \Omega.$$

Važno je upamtiti:

specifični otpor bakra = 0,018;

vodljivost bakra = 56;

specifični otpor aluminija = 0,029;

vodljivost aluminija = 35.

2.8. IZRAČUNAVANJE OTPORA

Za izračunavanje otpora vodiča vrijedi ova formula:

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

R = otpor u omima,
 ρ^* = specifični otpor,
 l = duljina u metrima,
 S = presjek u kvadratnim milimetrima.

Ova formula izražava matematički ono, što je prije bilo rečeno. Otpor je to veći, što je veći specifični otpor materijala, od kojega je vodič izrađen, što je duljina vodiča veća, te što mu je presjek manji.

Izračunajmo pomoću ove formule nekoliko primjera.

1. *primjer.* Treba izračunati otpor bakrene žice dugačke 2,5 km, presjeka 10 mm².

Rješenje. Za bakrenu žicu $\rho = 0,018$, $l = 2500$ m, $S = 10$ mm²

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,018 \cdot 2500}{10} = 4,5 \Omega.$$

2. *primjer.* Treba izračunati otpor žice od nikelina specifičnog otpora 0,4, promjera 0,8 mm, duljine 100 m.

Rješenje.

$$S = \frac{d^2 \pi}{4} = \frac{0,8^2 \pi}{4} = 0,5 \text{ mm}^2,$$

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,4 \cdot 100}{0,5} = 80 \Omega.$$

3. *primjer.* Na nekom je svitku namotano mnogo zavoja izolirane bakrene žice. Mikrometrom je izmjeren promjer samoga bakra te žice $d = 0,22$ mm, a mjerenjem otpora izmjeren je njezin otpor $R = 1120 \Omega$. Kolika je duljina te žice, ako je specifični otpor bakra 0,0175?

Rješenje.

$$S = \frac{d^2 \pi}{4} = \frac{0,22^2 \cdot 3,14}{4} = 0,038 \text{ mm}^2,$$

$$R = \frac{\rho l}{S}, \text{ odavle } l = \frac{R S}{\rho} = \frac{1120 \cdot 0,038}{0,0175} = 2430 \text{ m}.$$

Ova je duljina žice samo približna, jer promjer žice nije nikad sasvim točan zbog netočnosti kod proizvodnje.

4. *primjer.* Koliki presjek mora imati žica od aluminijsa, ako otpor od izvora struje do trošila ne smije biti veći od 0,5 Ω , a trošilo je 50 m daleko?

Rješenje. $\rho = 0,029$, $R = 0,5 \Omega$, $l = 2 \cdot 50 = 100$ m (tamo i natrag)

$$R = \frac{\rho l}{S}, \text{ odavle } R S = \rho l, \text{ te odavle}$$

$$S = \frac{\rho l}{R} = \frac{0,029 \cdot 100}{0,5} = 5,8 \text{ mm}^2.$$

* ρ = grčko slovo »ro«.

Zadatak 13. Koliki je otpor žice od nikelina specifičnog otpora 0,4 dugačke 100 (350; 55) m, promjera 0,4 (1,0; 2,5) mm?

Zadatak 14. Koliki je otpor bakrenih vodiča po kilometru duljine, ako je njihov presjek 6, 10, 16, 25, 35, 50, 70, 95 mm²?

Zadatak 15. Ako za neki vod hoćemo umjesto bakrenih vodiča upotrebiti aluminjske (čelične; cinkove) vodiče, za koliko moraju ti aluminjski (čelični; cinkovi) vodiči biti deblji od bakrenih, da otpor bude jednak?

Zadatak 16. Kod električnih željeznica služe tračnice kao povratni vodiči. Koliko iznosi otpor 1 km tračnica, ako je presjek tračnice 60,0 (52,5; 48,9) cm², a specifični otpor čelika tračnice $\rho = 0,13$?

Zadatak 17. Koliki je promjer žice od kanthala dugačke 92 (150; 45) m, koje otpor iznosi 39,6 (300; 18) Ω ?

Zadatak 18. Otpor dovodnih vodiča do nekog trošila ne smije biti veći od 2,5 (5,0; 0,3) Ω . Koliki mora biti presjek vodiča, ako su oni od bakra, a trošilo je udaljeno 200 (350; 40) m?

Zadatak 19. Koliko metara nikelina specifičnog otpora 0,4, promjera 1,2 (1,5; 0,6) mm, treba za neku elektrotoplinsku spravu, ako njezin otpor treba da bude 48 (35; 150) Ω ?

Zadatak 20. Kolika je vodljivost čelika, kojemu je specifični otpor 0,15 Ω ?

Zadatak 21. Vodljivost volframa iznosi 18,2 S. Koliki je njegov specifični otpor?

Zadatak 22. Koliki je provod vodiča od aluminija, presjeka 10 (2,5; 35) mm², dugačkog 300 (25; 100) m?

Zadatak 23. Koliki je provod 1 km tračnice iz zadatka 16.?

2.9. OVISNOST OTPORA O TEMPERATURI

Otpor se mijenja s temperaturom. Kako smo vidjeli, otpor metala je to veći, što je viša temperatura. Koliko je otpor kojega metala promjenljiv u ovisnosti o temperaturi, pokazuje *temperaturni koeficijent*. Temperaturni koeficijent je broj, koji pokazuje, koliko puta poraste otpor nekog otpornika, kad njegova temperatura poraste za 1° C. Evo temperaturnih koeficijenata najvažnijih metala.

bakar	0,0038
aluminij	0,0040
željezo i čelik oko	0,005
volfram	0,0045
cekas	0,00026
nikelin	0,0002
kromnikalj	0,00015
kanthal	0,00005
manganin	0,00001
konstantan	≈ 0 (temperatura praktički ne utječe na njegov otpor).

Temperaturni koeficijent bakra 0,0038 znači dakle, da otpor bakrenog vodiča poraste 0,0038 puta, odnosno 0,38‰ za svaki stupanj Celzija, što poraste temperatura tog bakrenog vodiča.

Povišenje otpora može se izračunati po formuli:

$$R_t = R_h (1 + \alpha t)$$

gdje je R_t = otpor pri višoj temperaturi (*»topli«* otpor), R_h = otpor pri nižoj temperaturi (*»hladni«* otpor), α^* = temperaturni koeficijent, t = temperaturna razlika.

* α = grčko slovo »alfa«.

5. *primjer.* Koliko iznosi specifični otpor bakra pri 100° C?

Rješenje. Specifični otpor bakra pri 20° C iznosi 0,018. Pri 100° C porast temperature prema 20° C iznosi 100 — 20 = 80° C. Prema tome je

$$R_h = \rho = 0,018; \quad \alpha = 0,0038; \quad t = 80^\circ \text{C},$$

$$\rho_{100} = \rho (1 + \alpha t) = 0,018 (1 + 0,0038 \cdot 80) = 0,018 (1 + 0,304) = 0,018 \cdot 1,304 = 0,0234 \, \Omega.$$

6. *primjer.* Otpor neke žarulje iznosi 484 Ω , kad ona svijetli. Pritom je volframova nit žarulje usijana na temperaturu 2500° C. Koliki je otpor žarulje u hladnom stanju, recimo pri 20° C, t. j. kad ona ne svijetli?

Rješenje. $R_t = 484 \, \Omega$; $\alpha = 0,0045$ (volfram); $t = 2500 - 20 = 2480^\circ \text{C}$,

$$R_t = R_h (1 + \alpha t) = R_h (1 + 0,0045 \cdot 2480) = R_h (1 + 11,2),$$

$$R_t = 12,2 R_h \text{ odnosno}$$

$$R_h = \frac{R_t}{12,2} = \frac{484}{12,2} = 39,7 \, \Omega.$$

Otpor takve žarulje je dakle oko 12 puta manji, kad ona ne svijetli!

Stoga što žarulje u hladnom stanju imaju znatno manji otpor nego u toplom, kad svijetle, nastaje pri uklapanju žarulja jaki udarac struje, t. j. struja je pri uklapanju mnogo jača, 10 do 12 puta jača, nego kad žarulje svijetle. Stoga, ako se mnogo žarulja uklapa odjedamput, može pregorjeti osigurač u dotičnom strujnom krugu.

Dok otpor svih metala raste pri porastu temperature, dotle otpor ugljena, naprotiv, pada. Otpor žarulja s ugljenom niti, koje se kadšto u specijalne svrhe upotrebljavaju, veći je, kad je žarulja hladna, nego kad svijetli.

Zadatak 24. Koliki je otpor bakrenog voda dugačkog 1,5 km, presjeka 16 mm²

a) pri temperaturi + 70 (+ 60; + 80) °C,

b) pri temperaturi — 20 (— 15; 0) °C?

Zadatak 25. Namot nekog elektromagneta, načinjen od bakrene žice, ima pri 20° C otpor 35 (8,2; 20) Ω . Koliki će otpor imati u pogonu pri 85 (95; 105) °C?

Zadatak 26. Pokretač motora za pogon mlina u Bjelovaru načinjen je od čelične žice specifičnog otpora $\rho = 0,13 \, \Omega$ (pri 20° C). Koliki je specifični otpor te žice u pogonu pri temperaturi 120 (150, 100) °C?

Zadatak 27. Dobili smo zadatak, da napravimo kuhalo, koje treba da ima otpor 71 (40; 55) Ω pri 600° C. Koliko dugačka mora biti žica, ako u tu svrhu upotrebimo žicu od kromniklja promjera 0,5 (0,7; 0,6) mm?

Zadatak 28. Za koliko se poveća otpor motora, ako njegov otpor pri 15 (10; 25) °C iznosi 0,9 (1,5; 0,35) Ω , a motor se u pogonu ugrije na 105° C?

Zadatak 29. Iz povećanja otpora računa se ugrijavanje strojeva i transformatora u pogonu. Na nekom motoru u tvornici Đuro Đaković izmjerimo otpor namota prije stavljanja u pogon pri 15 (22; 31) °C te ustanovimo da iznosi $R_{15} = 0,282 \, \Omega$ ($R_{22} = 0,654 \, \Omega$; $R_{31} = 1,78 \, \Omega$). Nakon nekoliko sati pogona izmjerimo otpor ponovo te ustanovimo, da sada iznosi $R_x = 0,388$ (0,860; 2,16) Ω . Za koliko se je povisila temperatura namota motora, ako je namot od bakra?

Zadatak 30. Na transformatoru s bakrenim namotima u školskoj radionici izmjerili smo otpor prije stavljanja u pogon pri temperaturi zraka 25 (38; 17) °C te ustanovili da iznosi $R_{25} = 36,7 \, \Omega$ ($R_{38} = 82,4 \, \Omega$; $R_{17} = 10,2 \, \Omega$). Koliko se transformator ugrijao, ako nakon 5 sati pogona izmjerimo otpor ponovo te ustanovimo, da iznosi $R_x = 47,1$ (93,9; 13,8) Ω ?

3. ZAKONI ZA IZRAČUNAVANJE STRUJE I NAPONA

3.1. OHMOV ZAKON

Iz onoga, što smo već dosada rekli, razabire se, da je struja u nekom strujnom krugu to jača, što je jača elektromotorna sila, koja tu struju pokreće, i što je manji otpor, koji se protivi protjecanju te struje. Dakle:

Što veći napon, to jača struja.

Što veći otpor, to slabija struja.

Pokusi pokazuju, da u onim granicama, u kojima možemo zanemariti promjenljivost otpora u zavisnosti od temperature, vrijedi: Dvaput veći napon uzrokuje dvaput jaču struju, triput veći napon triput jaču struju i t. d., te da dvaput veći otpor propušta dvaput slabiju struju, triput veći otpor triput slabiju struju i t. d. Ova i ovakva zavisnost struje od napona i otpora naziva se *Ohmov zakon*, po fizičaru Ohmu, koji je tu zavisnost, taj prirodni zakon, otkrio godine 1826. Ako obilježimo struju slovom I , napon sa U , a otpor sa R , onda se to može matematički izraziti ovako:

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{ili} \quad \boxed{U = IR} \quad \text{ili} \quad R = \frac{U}{I}.$$

Ove tri jednadžbe, koje proizlaze jedna iz druge, jesu matematički izraz za Ohmov zakon. Za lakše pamćenje može se to napisati i upamtiti i ovako:

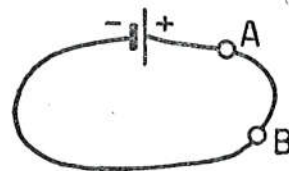


kod čega iz položaja ovih triju slova možemo lako napisati gornje tri jednadžbe. Ono, što hoćemo izračunati, izvadimo izvan trokuta, pa dobijemo:



Ohmov zakon nam omogućuje, da iz poznate dvije od gornjih triju veličina možemo izračunati treću. Uzmimo, na pr., strujni krug prema slici 22.

Od tri veličine toga strujnog kruga (napona U , struje I i otpora R) možemo izračunati bilo koju, ako su nam druge dvije poznate. Ako na pr. izmjerimo napon izvora struje U i odredimo otpor R , možemo pomoću formule $I = U/R$ odrediti struju. Ako pak izmjerimo struju I u strujnom krugu i izračunamo njegov otpor R , možemo pomoću formule $U = IR$ izračunati napon izvora struje. Napokon, iz izmjerenih veličina U i I možemo pomoću formule $R = U/I$ lako izračunati otpor R .



Sl. 22. Ohmov zakon vrijedi za čitav strujni krug i za svaki njegov dio, na pr. i za dio između A i B.

No Ohmov zakon vrijedi za čitav strujni krug i za svaki njegov dio. Uvjet je pritom, da se pojedine vrijednosti za napon, struju i otpor odnose uvijek na isti dio strujnoga kruga. Na pr. u strujnom krugu na slici 22. mo-

žemo odabrati bilo koje dvije točke A i B. I za dio strujnog kruga između točaka A i B vrijedi Ohmov zakon isto tako, kao što vrijedi i za čitav strujni krug. Vrijede dakle jednadžbe:

$$I_{AB} = \frac{U_{AB}}{R_{AB}}, \quad U_{AB} = I_{AB} R_{AB}, \quad R_{AB} = \frac{U_{AB}}{I_{AB}}.$$

Iz dvije poznate, odnosno izmjerene veličine možemo i ovdje uvijek izračunati treću.

Sve ćemo to najbolje razabrati iz primjera.

7. *primjer.* Otpornik od $100 \, \Omega$ priključen je na izvor struje napona 12 V. Kolika struja teče kroz taj otpornik?

Rješenje: $U = 12 \, \text{V}$, $R = 100 \, \Omega$,

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12}{100} = 0,12 \, \text{A}.$$

8. *primjer.* Kroz električnu peć, koja je priključena na napon 220 V, teče struja 9 A. Koliki je otpor te peći?

Rješenje: $U = 220 \, \text{V}$, $I = 9 \, \text{A}$,

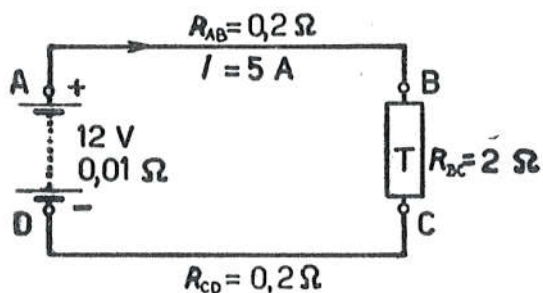
$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{9} = 24,5 \, \Omega.$$

9. *primjer.* Kroz neki otpornik teče struja 1 A. Na stezaljkama otpornika vlada napon 1 V. Koliki je otpor toga otpornika?

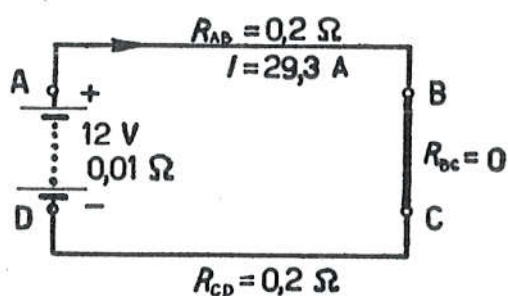
Rješenje: $I = 1 \, \text{A}$, $U = 1 \, \text{V}$,

$$R = \frac{U}{I} = \frac{1}{1} = 1 \, \Omega.$$

Na taj je način određena jedinica otpora om. Kao što smo već rekli na strani 24., 1 om je onaj otpor, kroz koji napon 1 V može progurati struju 1 A.



Sl. 23. Primjer za primjenu Ohmova zakona.



Sl. 24. Kratki spoj trošila: struja se mnogo povećava.

10. *primjer.* Promotrimo detaljno strujni krug na slici 23. Taj strujni krug sastoji se od akumulatorske baterije* od 12 V, koja služi kao izvor struje, od trošila T, koje ima otpor $2 \, \Omega$, te dovodne i odvodne žice, od kojih

* Akumulatorsku bateriju tvori nekoliko akumulatora spojenih tako, da se njihovi naponi (a i njihovi unutarnji otpori) zbrajaju.

svaka ima otpor $0,2 \Omega$. Unutarnji otpor akumulatorske baterije iznosi $0,01 \Omega$. Pita se:

- Kolika je struja u tom strujnom krugu?
- Koliki je napon između točaka A—B, B—C i C—D?
- Kolika bi bila struja, ako bismo točke B i C kratko spojili?
- Kolika bi bila struja, ako bismo točke A i D kratko spojili?

Rješenje:

a) $U = 12 \text{ V}$, $R = 2 + 2 \cdot 0,2 + 0,01 = 2,41 \Omega$.

(Ukupni otpor R strujnog kruga sastoji se od otpora trošila $R_{BC} = 2 \Omega$, od otpora dovodnog i odvodnog vodiča $R_{AB} = R_{CD} = 0,2 \Omega$ i unutarnjeg otpora akumulatorske baterije, koji iznosi $0,01 \Omega$.)

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12}{2,41} \approx 5 \text{ A}.$$

b) $I = 5 \text{ A}$, $R_{AB} = 0,2 \Omega$, $U_{AB} = IR_{AB} = 5 \cdot 0,2 = 1 \text{ V}$, $U_{CD} = U_{AB} = 1 \text{ V}$,
 $R_{BC} = 2 \Omega$, $U_{BC} = IR_{BC} = 5 \cdot 2 = 10 \text{ V}$.

c) Strujni krug izgleda sada kao na slici 24.:

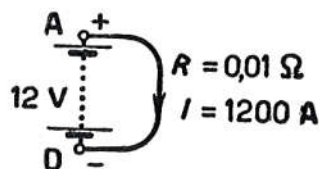
$$U = 12 \text{ V}, R = 2 \cdot 0,2 + 0,01 = 0,41 \Omega,$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12}{0,41} = 29,3 \text{ A}.$$

d) Strujni krug izgleda kao na slici 25. Potpuni kratki spoj akumulatorske baterije.

$$U = 12 \text{ V}, R = 0,01 \Omega,$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12}{0,01} = 1200 \text{ A}!!$$



Ovako golema struja lako bi upropastila akumulatorsku bateriju. Kratki spoj je za akumulatorsku bateriju izvanredno opasan.

Sl. 25. Kratki spoj na akumulatorskoj bateriji: golema struja oštećuje bateriju.

11. primjer. Kako bi se promijenile prilike u prethodnom primjeru, ako bismo umjesto akumulatorske baterije uzeli bateriju od 8 galvanskih članaka, koja također daje 12 V, ali kojoj je unutarnji otpor $3,2 \Omega$?

Rješenje:

a) $U = 12 \text{ V}$, $R = 2 + 2 \cdot 0,2 + 3,2 = 5,6 \Omega$,

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12}{5,6} = 2,14 \text{ A}.$$

b) $I = 2,14 \text{ A}$, $R_{AB} = R_{CD} = 0,2 \Omega$,

$$U_{AB} = U_{CD} = 2,14 \cdot 0,2 = 0,428 \text{ V}.$$

$$R_{BC} = 2 \Omega, U_{BC} = 2,14 \cdot 2 = 4,28 \text{ V}.$$

$$c) U = 12 \text{ V}, R = 2 \cdot 0,2 + 3,2 = 3,6 \Omega,$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12}{3,6} = 3,33 \text{ A}.$$

$$d) U = 12 \text{ V}, R = 3,2 \Omega,$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12}{3,2} = 3,75 \text{ A}.$$

Kod kratkog spoja baterije galvanskih članaka struja iznosi samo 3,75 A prema 1200 A kod kratkog spoja akumulatorske baterije. Galvanski elementi nisu dakle ni približno tako osjetljivi na kratki spoj kao akumulatori. Pa ipak akumulatorska baterija ima prema galvanskoj bateriji u električnom pogledu jednu bitnu prednost. Koju, začas ćemo vidjeti.

Zadatak 31. Koliko A teče kod napona 220 (110; 24) V kroz otpor 20 (8; 120) Ω ?

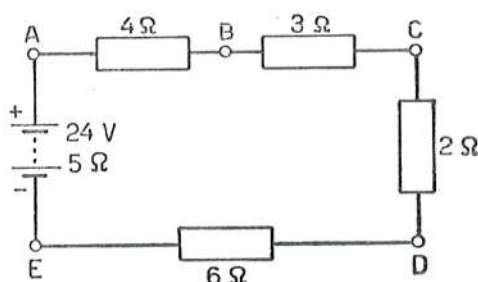
Zadatak 32. Koliko A teče kod napona 110 (12; 200) V kroz otpor 10 (135; 2,5) Ω ?

Zadatak 33. Da ustanovimo, koliki je otpor nekog otpornika u školskom laboratoriju, izmjerili smo napon na njegovim stezaljkama $U = 1,2$ (35,8; 7,5) V i struju, koja kroza nj teče, $I = 12$ mA (2,2 A; 0,3 A). Koliki je otpor tog otpornika?

Zadatak 34. Koliki je napon potreban, da kroz otpor 34 (3,8; 63) Ω poteče struja 7,2 A (2,6 A; 10,5 mA)?

Zadatak 35. Koliki je otpor glačala za napon 220 (110; 220) V, koje uz taj napon uzima struju 2,3 (4,6; 2,7) A?

Zadatak 36. Kolika će struja teći kroz glačalo iz prethodnog zadatka, ako napon, na koji je priključeno, ne iznosi 220 (110; 220) V, nego samo 190 (95; 203) V?



Sl. 26. Uz zadatak 37.

Zadatak 37. Koliko iznosi struja u strujnom krugu prema sl. 26? Koliko iznose naponi U_{AB} , U_{BC} , U_{CD} , U_{DE} , U_{AE} , U_{CE} ?

Zadatak 38. Na akumulatorsku bateriju, koja ima napon 110 (12; 24) V, priključen je otpor 5 (2; 0,5) Ω . Kolika je struja, ako unutarnji otpor baterije iznosi 0,05 (0,018; 0,02) Ω ?

Zadatak 39. Koliko bi iznosila struja kratkog spoja akumulatorske baterije iz prethodnog zadatka?

3.2. PAD ILI GUBITAK NAPONA

U 10. i 11. primjeru priključili smo preko dva spojna vodiča trošilo otpora 2 Ω na izvor struje od 12 V: prvi put na akumulatorsku bateriju, a drugi put na bateriju galvanskih elemenata. No da li je to trošilo doista dobilo napon 12 V? Kako nam pokazuje račun proveden u prethodnim primjerima,

u prvom je slučaju na stezaljkama trošila B—C vladao napon od samo 10 V, a u drugom slučaju čak samo od 4,28 V. Pa što se dogodilo s ostatkom napona, koji daju baterije? Kamo sa taj napon izgubio? U 10. primjeru smo vidjeli, da i između točaka A—B i C—D vlada napon, i to 1 V. Taj je napon potreban, da se struja 5 A progura kroz otpor dovodnih vodiča $0,2 \Omega$. Od elektromotorne sile 12 V, koju daje akumulatorska baterija, 2 V je »potrošeno« u dovodnim vodičima za svladavanje njihova otpora, pa je samo ostatak od $12 - 2 = 10$ V ostao za trošilo. U dovodnim vodičima se dakle jedan dio napona »izgubio«. Ovaj se gubitak napona pri protjecanju struje naziva u elektrotehnici i *pad napona*.*

U 11. primjeru je pad napona u vodičima A—B i C—D iznosio samo 0,428 V, dakle ukupno 0,856 V, pa ipak je napon na trošilu iznosio samo 4,28 V, dakle znatno manje nego u 10. primjeru. Da to objasnimo, izračunajmo, koliki je bio napon na stezaljkama baterije. Taj će napon biti očito jednak zbroju napona između točaka A—B, B—C i C—D, dakle

$$U_{AD} = U_{AB} + U_{BC} + U_{CD} = 0,428 + 4,28 + 0,428 = 5,14 \text{ V.}$$

Pa kako je to moguće, kad je elektromotorna sila baterije 12 V, pa bi prema tome na stezaljkama baterije morao vladati napon 12 V? Ipak, to je sasvim u skladu s Ohmovim zakonom. Evo kako: Elektromotorna sila troši se na svladavanje ukupnog otpora strujnog kruga. A taj se ukupni otpor strujnog kruga ne sastoji samo od otpora trošila i otpora dovodnih vodiča, već i od unutarnjeg otpora izvora struje. Onaj dio elektromotorne sile, koji otpada na svladavanje otpora trošila, jednak je naponu na stezaljkama toga trošila. Onaj dio, koji otpada na svladavanje otpora dovodnih vodiča, jednak je naponu na krajevima tih vodiča ili — kako se obično kaže — padu napona u tim vodičima. A onaj pak dio elektromotorne sile, koji otpada na svladavanje unutarnjeg otpora baterije, jednak je padu napona, koji uzrokuje struja u unutarnjem otporu baterije. Napon na stezaljkama baterije bit će prema tome jednak elektromotornoj sili umanjenoj za pad napona u unutarnjem otporu baterije ili za *unutarnji pad napona* (kako se također kaže).

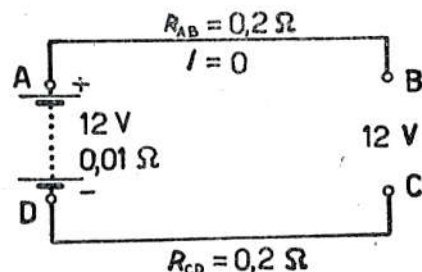
$$U_{AD} = U - I R_{AD} = 12 - 2,14 \cdot 3,2 = 12 - 6,85 = 5,15 \text{ V,}$$

dakle onoliko, koliko smo i prije izračunali: mala razlika potječe odatle, što račun nije proveden sasvim točno, već sa stanovitim zaokružanjima, što se kod ovakvih računa redovito radi.

I u akumulatorskoj bateriji dolazi do unutarnjeg pada napona (10. primjer), samo što je tamo zbog neznatnog unutarnjeg otpora neznatan, pa je napon na stezaljkama akumulatorske baterije bio skoro 12 V:

$$\begin{aligned} U_{AD} &= U - I R_{AD} = \\ &= 12 - 5 \cdot 0,01 = 12 - 0,05 = 11,95 \text{ V.} \end{aligned}$$

Kakve će međutim biti prilike u pogledu napona, ako isključimo trošilo T (slika 27.)? Budući da u tom slučaju ne teče nika-



Sl. 27. Napon na kraju neopterećenog voda jednak je naponu na stezaljkama izvora struje: $U_{BC} = U_{AD}$

* Pad napona ili gubitak napona je kod istosmjerne struje jedno te isto. Kod izmjenične struje to su dva različita pojma.

kva struja, nema nigdje nikakvog pada napona: ni u dovodnim vodičima, ni u bateriji samoj. U tom će slučaju biti:

$$U_{BC} = U_{AD} = U.$$

Napon na stezaljkama baterije, kao i napon između bilo koje 2 točke pozitivnog i negativnog vodiča, jednak je elektromotornoj sili. To vrijedi za svaki izvor struje, pa se elektromotorna sila nekog izvora struje može ustanoviti tako, da se izmjeri napon na njegovim stezaljkama, kad taj izvor nije opterećen.

Dakle da ponovimo:

1. Napon na stezaljkama neopterećenog izvora struje jednak je elektromotornoj sili, koja se u njemu stvara.

2. Napon na stezaljkama izvora struje smanjuje se kod opterećenja za pad (gubitak) napona u njegovu unutarnjem otporu. Ovo je smanjenje to veće, što je taj unutarnji otpor veći i što je opterećenje veće.

3. Pad napona je općenito to veći, što je otpor veći i što je opterećenje veće. Pad napona ćemo obilježiti slovom u , a možemo ga izračunati na temelju Ohmova zakona:

$$u = IR,$$

gdje je R otpor onog dijela strujnog kruga, u kojem računamo pad napona.

4. Kratki je spoj za izvor struje to opasniji, što je unutarnji otpor izvora struje manji.

Mali unutarnji otpor je međutim vrlo poželjan iz razloga, što se kod takvog izvora struje napon, kao što smo vidjeli, vrlo malo mijenja s opterećenjem. A za većinu električnih trošila izvanredno je važno, da se napon, na koji su ona priključena, ne mijenja previše.

12. primjer. Priključimo na električnu mrežu od 110 V električnu peć, koja uzima iz mreže struju 18 A. Pita se, koliki će biti pad napona do te peći, ako je dovodni vod $2 \times 2,5 \text{ mm}^2 \text{ Cu}^*$, a dugačak je 30 m. Koliki će biti napon na stezaljkama peći?

Rješenje:

$$I = 18 \text{ A}, \quad R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,018 \cdot 2 \cdot 30}{2,5} = 0,43 \, \Omega$$

$$u = IR = 18 \cdot 0,43 = 7,74 \text{ V},$$

ili u postocima:

$$u\% = \frac{7,74 \cdot 100}{110} = 7,0\%$$

Napon na stezaljkama peći:

$$U = 110 - 7,74 = 102,3 \text{ V}.$$

Električna su trošila osjetljiva na promjene napona, neka više, neka manje. Među vrlo osjetljiva trošila ubrajaju se električne žarulje, kod kojih promjene napona ne bi smjele biti veće od $\pm 5\%$, t. j. napon, na koji

* Cu (čitaj »ku«) — bakar, Al — aluminiј — kemijske oznake.

su priključene, ne bi smio biti za više od 5% viši ili niži od onog napona, za koji su građene i koji je na njima označen. Ako je napon viši, žarulja traje mnogo kraće vrijeme*, a ako je napon niži, žarulja svijetli znatno slabije. Zbog toga ne smije pad napona prijeći neku granicu. Kao *najveći dozvoljeni pad, gubitak napona* može se uzeti u mrežama** niskog napona od početka vodova niskog napona do zadnje žarulje 6—7%. Motori podnose nešto veće promjene napona, pa se kod industrijskih i drugih instalacija često izvode posebni strujni krugovi za motore, a posebni za rasvjetu. U strujnim krugovima za motore dozvoljava se onda veći pad napona.

U postocima treba pad napona računati s obzirom na napon na početku voda. Neka je na pr. napon na početku voda 230 V, a napon na kraju voda 220 V. Pad napona iznosi dakle $230 - 220 = 10$ V, odnosno

$$u\% = \frac{10}{230} \cdot 100 = 4,3\%.$$

Kadšto nam međutim nije poznat napon na početku voda, već napon na kraju voda. U tom slučaju radi jednostavnosti često računamo pad napona u postocima s obzirom na napon na kraju voda. Za mnoge praktične račune to je dovoljno točno.

13. *primjer.* Trošilo, koje uzima 10 A struje kod napona 220 V, priključeno je preko bakrenog voda od 2,5 mm² i 25 m duljine. Koliki je pad napona?

Rješenje: Pad napona u voltima $u = IR$; $I = 10$ A;

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,018 \cdot 2 \cdot 25}{2,5} = 0,36 \Omega; \quad u = 10 \cdot 0,36 = 3,6 \text{ V.}$$

$$u\% = \frac{3,6}{220} \cdot 100 = 1,64\%.$$

Ako bismo točno računali, morali bismo izračunati najprije napon na početku voda:

$$U = 220 + 3,6 = 223,6 \text{ V.}$$

Sada bismo tek izračunali

$$u\% = \frac{u}{U} \cdot 100 = \frac{3,6}{223,6} \cdot 100 = 1,61\%.$$

Kako se vidi, razlika prema približnom računu nije velika.

14. *primjer.* Struja u nekom vodu ukupnog otpora 1 Ω iznosi 10 A. Napon na početku voda iznosi a) 200 V, b) 400 V. Koliki je procentualni pad napona?

* Prosječna trajnost žarulja iznosi oko 1000 sati svijetljenja.

** Mreža je skup vodova, koji služe za razdiobu električne struje.

Rješenje: Pad napona u voltima iznosi $10 \cdot 1 = 10$ V. Procentualni pad napona iznosi:

$$a) \frac{10}{200} \cdot 100 = 5 \%$$

$$b) \frac{10}{400} \cdot 100 = 2,5 \%$$

Uz jednaku struju procentualni je pad napona to manji, što je napon viši.

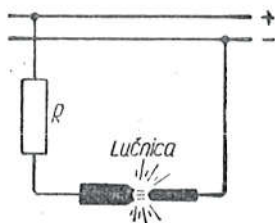
Zadatak 40. Na početku voda kroz selo Studenci izmjeren je napon 230 (220; 115) V, a na kraju 214 (198; 106) V. Koliko iznosi gubitak napona u voltima i postocima?

Zadatak 41. Na kraju 500 (250; 750) m dugog bakrenog voda priključen je motor, koji uzima struju 30 (20; 15) A. Napon kod motora iznosi 440 (110; 220) V, a presjek vodiča 16 (35; 25) mm². Koliki je napon na početku voda? Koliki je pad napona?

Zadatak 42. Sindikalna prostorija u tvornici »1. maj« rasvijetljena je pomoću svijećnjaka, na kojem se nalazi veći broj žarulja, koje sve zajedno uzimaju 5 (3,5; 8) A struje kod 220 (220; 110) V napona. Do tog svijećnjaka vodi 31 (40; 24) m dugački bakreni vod presjeka 1,5 (1,5; 2,5) mm². Koliki je pad napona u tom vodu?

Zadatak 43. Koliko iznosi pad napona u glavnom vodu zgrade, u kojoj stanujemo, ako je presjek vodiča 16 (10; 25) mm² Al, duljina voda 12 (18; 22) m, a u njemu teče struja 22 (17; 31) A? Napon na početku voda iznosi 220 V.

Zadatak 44. Koliko iznosi pad napona u čeličnoj tračnici iz zadatka 16., ako je duljina tračnice 2,5 km, a kroz nju teče struja 350 A?



Sl. 28. Uz zadatak 45.

Zadatak 45. Lučnicu (lučnu svjetiljku) za 40 V, 12 (20; 10) A treba priključiti na mrežu istosmjerne struje od 110 (110; 220) V. To se može učiniti prema slici 28. tako, da se u seriju* s njom priključi prikladan otpornik. Treba izračunati, koliki mora biti otpor tog otpornika.

Zadatak 46. Koliko ampera smije najviše teći vodom, koji vodi do male stolarske radionice, ako je napon na početku voda 230 (220; 115) V, a pad napona smije iznositi najviše 5 (3,5; 7) %? Vod je dugačak 1,2 km, a presjek je 25 mm² Cu.

3.3. ODREĐIVANJE PRESJEKA VODIČA

Presjeke vodiča električnih vodova treba odrediti s obzirom na ove zahtjeve:

1. Vodiči moraju biti dovoljno mehanički čvrsti, da se lako ne prekidaju.

2. Oni se ne smiju previše grijati, da se ne ošteti izolacija, pa da ne dođe do kvara ili čak do požara.

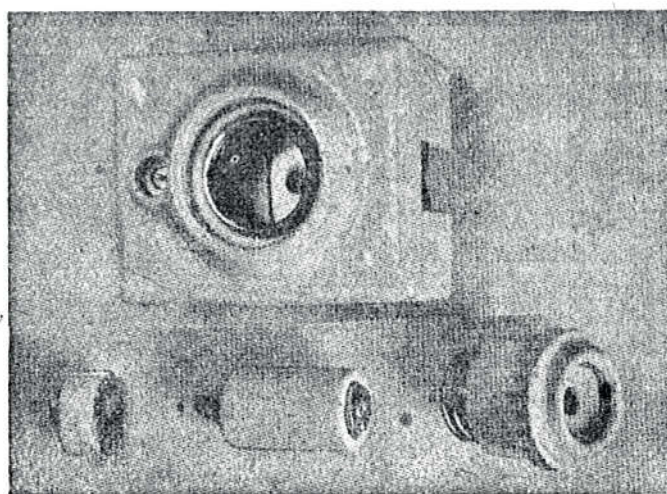
3. Pad napona ne smije prijeći dozvoljenu granicu, da trošila mogu ispravno djelovati.

* Priključiti u seriju znači spojiti tako, da ista struja teče kroz oba trošila. U strujnom krugu prikazanom na slici 28. otpornik R je priključen pred lučnicu. Bilo bi sasvim svejedno, kad bi otpornik bio priključen iza lučnice.

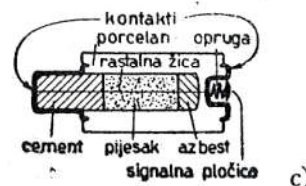
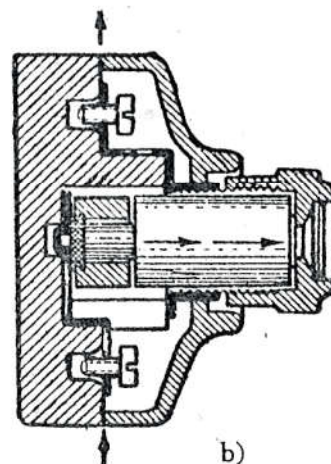
S obzirom na mehaničku čvrstoću elektrotehnički propisi određuju one najmanje presjeke, koji su kod pojedinih vrsta vodova još dozvoljeni. Ti najmanji dozvoljeni presjeci jesu ovi:

	bakar mm ²	aluminij mm ²
za vodove u svjetiljkama i za obične sobne gajtane	0,75	—
za ostale izolirane vodove, koji nisu stalno položeni	1	—
za izolirane, stalno položene vodove	1,5	2,5
za kućne priključke do 20 m raspona	4	10 uže
za nadzemne vodove do 35 m raspona	6	16 „
za nadzemne vodove i raspone veće od 35 m	10	25 „
za nadzemne vodove iznad 1000 V napona	10 uže	25 „

Ako bismo na neki vod priključili trošilo, koje uzima prejaku struju, ili ako bi u vodu nastao kratki spoj, vodiči bi se zbog prevelike struje previše ugrijali. Da se to spriječi, ugrađuju se na početak vodova posebne naprave, koje imaju zadatak, da prekinu strujni krug, čim struja u vodiču prijeđe dozvoljenu jakost. Takve naprave su rastalni osigurači i automatske sklopke. U rastalnom osiguraču (slika 29.) nalazi se tanka žica, koja se uključi u strujni krug dotičnog voda. Kad struja previše ponaraste, ova se



a)



Sl. 29. Rastalni osigurač: a) fotografija sastavnih dijelova, b) presjek osigurača, c) presjek rastalnog uložka.

tanka žica rastali i time prekine strujni krug prije, nego što se vodič opasno ugrijao. Automatska sklopka prekida strujni krug pri prejakoj struji pomoću mehanizma, koji iskorišćuje elektromagnetsko ili toplinsko djelovanje struje.

S obzirom na ugrijavanje propisi dopuštaju za svaki presjek vodiča izvjesno najveće opterećenje, koje u trajnom pogonu ne smije biti prekoračeno, jer bi se inače vodič previše ugrijao, oštetila bi se njegova izo-

lacija, a postojala bi i opasnost od požara. To najveće dozvoljeno opterećenje naziva se opteretivost vodiča. Podaci, koje propisuju propisi za stalno položene izolirane vodiče u cijevima, navedeni su u ovoj tablici:

Tablica opteretivosti izoliranih vodiča*

Presjek vodiča mm ²	Najveća dozvoljena trajna struja opterećenja A		Najveća nazivna struja rastalnog osigurača A	
	Cu	Al	Cu	Al
1	12	—	6	—
1,5	16	—	10	—
2,5	21	16	15	10
4	27	21	20	15
6	35	27	25	20
10	48	38	35	25
16	65	51	50	35
25	88	69	60	50
35	110	86	80	60
50	140	110	100	80

Iz ove se tablice razabire, da se na pr. bakreni izolirani vodič od 4 mm², stalno položen u cijevi (na pr. u obične šavne izolirane cijevi pod žbukom), smije opteretiti najviše sa 27 A. Ako se međutim osigurava rastalnim osiguračem, mora zbog veće sigurnosti nazivna struja** osigurača biti nešto manja od najveće dozvoljene struje opterećenja. S obzirom na rastalni osigurač ne smije se dakle bakreni vodič od 4 mm² opteretiti sa 27 A, nego samo sa 20 A.

S obzirom na dozvoljeni pad napona treba vodiče dimenzionirati prema rezultatu proračuna, koji se izvodi, kako je to navedeno u prethodnom poglavlju.

Da se pojednostavni proizvodnja vodiča, izrađuju se vodiči samo nekih presjeka, koji su standardizirani, i to: 0,75, 1, 1,5, 2,5, 4, 6, 10, 16, 25, 35, 50, 70, 95, 120, 150, 185, 210 i t. d. mm².

15. *Primjer.* Motor istosmjerne struje za 220 V, koji uzima iz mreže struju 55,5 A, treba da bude priključen na razdjelnicu. Koliki mora biti presjek vodiča, ako je motor udaljen od razdjelnice 30 m, a pad napona ne smije biti veći od 4%? Vod do motora treba da bude zaštićen rastalnim osiguračem za 60 A***.

Rješenje: Osiguraču za 60 A odgovara prema tablici presjek bakrenih vodiča 25 mm². Izračunajmo pad napona. Otpor iznosi:

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,018 \cdot 2 \cdot 30}{25} = 0,0432 \Omega,$$

* Ova tablica vrijedi samo za cijevne vodove, na pr. GM (stara oznaka MGO) i vodove položene u cijevima, na pr. G (stara oznaka NG). Za vodove slične kabele oklopljene vodove, kabele, vodove za priključak pokretnih trošila, te za vodove montirane slobodno u zraku dozvoljeno opterećenje je veće. Podatke o tome vidi na pr. u knjizi: D. Kaiser, Elektrotehnički priručnik.

** Nazivna struja je ona, za koju je neka naprava konstruirana i građena.

*** Motor nazivne struje 55,5 A može se osigurati rastalnim osiguračem za 60 A, ali samo ako je taj osigurač trom i ako se motor pokreće pokretačem. Motori se ne osiguravaju samo prema nazivnoj struji, već i prema struji pri pokretanju, koja je znatno veća. U određivanje osigurača za motore ne možemo se međutim upustiti u ovoj knjizi. (Vidi na pr. D. Kaiser, Elektrotehnički priručnik.)

a pad napona:

$$u = IR = 55,5 \cdot 0,0432 = 2,40 \text{ V},$$

ili u postocima:

$$u\% = \frac{2,40}{220} \cdot 100 = 1,09\%.$$

Kako se vidi, stvarni pad napona je znatno manji od dozvoljenog. S obzirom na pad napona mogli bismo dakle uzeti i manji presjek, ali to ne smijemo učiniti s obzirom na ugrijavanje i zaštitu vodiča rastalnim osiguračem.

16. primjer. Koliki bismo presjek morali uzeti, ako bi motor u prethodnom primjeru bio udaljen ne 30, nego 150 m?

Rješenje je: Možemo računati na isti način kao i u prethodnom primjeru. No budući da je udaljenost sada 5 puta veća nego prije, a ništa se drugo nije promijenilo, bit će pad napona u postocima također 5 puta veći:

$$u\% = 5 \cdot 1,09 = 5,45\%.$$

Sada bi pad napona (5,45%) bio veći od dozvoljenog (4%), i to:

$$\frac{5,45}{4} = 1,36 \text{ puta veći.}$$

Da pad napona bude samo 4%, treba uzeti 1,36 puta veći presjek, t. j.

$$S = 1,36 \cdot 25 = 34 \text{ mm}^2.$$

Uzet ćemo naredni veći standardizirani presjek, t. j. 35 mm². Možemo provesti kontrolu:

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,018 \cdot 2 \cdot 150}{35} = 0,154 \Omega,$$

$$u = IR = 55,5 \cdot 0,154 = 8,55 \text{ V},$$

$$u\% = \frac{u}{U} \cdot 100 = \frac{8,55}{220} \cdot 100 \approx 3,9\%.$$

Zadatak 47. Vodom dugačkim 20 (15; 35) m treba dovesti struju do električnog trošila, koje kod napona 110 (220; 110) V uzima struju 4,5 (38; 10) A. Koliki mora biti presjek bakrenog voda, ako pad napona ne smije prijeći 1,5 (4; 2) %?

Zadatak 48. Koliki mora biti presjek aluminijskog nadzemnog voda, dugačkog 200 (150; 700) m, kojim se uz napon 440 (220; 440) V dovodi istosmjerna struja do motora, koji uzima 10 (20; 15) A? Pad napona smije iznositi najviše 6 (8; 7) %.

Zadatak 49. Koliki mora biti presjek bakrenog voda, položenog u cijev pod žbukom, kojim se struja dovodi do kinematografske projekcije svjetiljke, ako je taj vod dugačak 70 (50; 100) m, svjetiljka treba 30 (25; 35) A, a pad napona ne smije iznositi više od 2,5 (3; 3,5) V?

Zadatak 50. Aluminijskim vodom dugim 30 (80; 55) m treba dovesti struju do skupine od 5 lučnih svjetiljaka za 22 V, koje trebaju ukupno 100 (85; 60) A. Koliki je presjek za to potreban, ako pad napona ne smije iznositi više od 1,5 (1,2; 1,8) %?

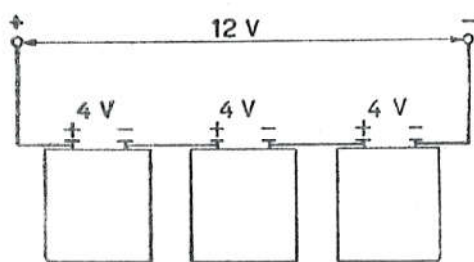
Zadatak 51. Od generatora istosmjerne struje, koji kod 230 V proizvodi struju 200 (60; 130) A, treba tu struju dovesti olovnim kabelom do 20 (15; 23,5) m dalekih sabirnica. Koliki je presjek za to potreban?*

Zadatak 52. Do velike električne peći za 220 V, 50 (35; 60) A treba dovesti struju izoliranim bakrenim vodom dugim 20 (15; 75) m tako, da pad napona u tom vodu ne prijeđe 2 (3; 2,5) %. Koliki mora biti presjek?

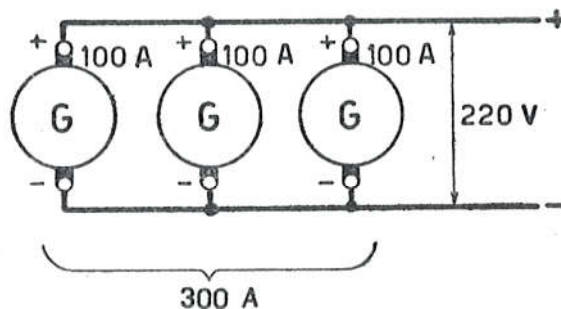
* Otporivost dvožilnih olovni kabela sa bakrenim vodičima položenih u kanal iznosi: 16 mm² — 84 A, 25 mm² — 108 A, 35 mm² — 130 A, 50 mm² — 165 A, 70 mm² — 195 A, 95 mm² — 235 A.

3.4. SERIJSKO I PARALELNO SPAJANJE

Izvori struje (baterije, generatori i dr.) mogu se spajati međusobno prema slici 30. ili prema slici 31. Spoj prema slici 30. naziva se serijski spoj, jer su galvanski članci spojeni jedan za drugim u seriji. Na ovakav način možemo dobiti mnogo više napone, nego što je napon izvora struje. Serijski se spoj stoga upotrebljava uglavnom samo kod galvanskih elemenata i akumulatora, jer je napon jednog galvanskog elementa ili akumulatorskog članka razmjerno vrlo malen. Napon akumulatorskog članka na pr. iznosi 2 V, pa ako hoćemo dobiti akumulatorsku bateriju od 110 V, moramo spojiti u seriju 55 akumulatorskih članaka.

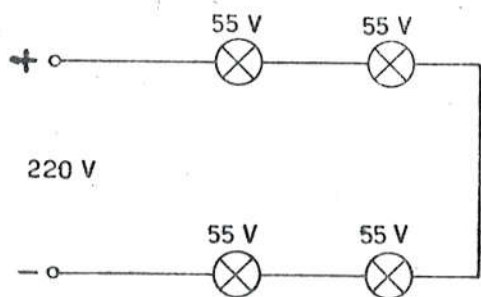


Sl. 30. Serijski spoj galvanskih članaka: ukupni napon jednak je zbroju pojedinih napona.

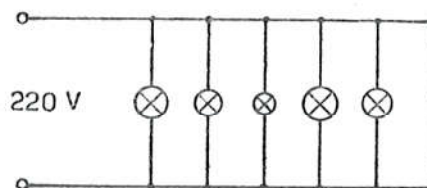


Sl. 31. Paralelni spoj generatora: ukupna struja jednaka je zbroju pojedinih struja.

Spoj prema slici 31. zove se paralelni spoj, jer su generatori spojeni jedan kraj drugoga. Izvori struje spajaju se paralelno, jer mogu na taj način davati jaču struju. Ako jedan generator može davati maksimalno 100 A, tri paralelno spojena ista takva generatora mogu davati 300 A. Kod paralelnog spoja je važno, da svi izvori struje, koji su paralelno spojeni, daju jednaki napon. Danas se veliki izvori struje, veliki električni generatori, spajaju samo paralelno. Kod paralelnog spoja možemo bilo koji generator staviti



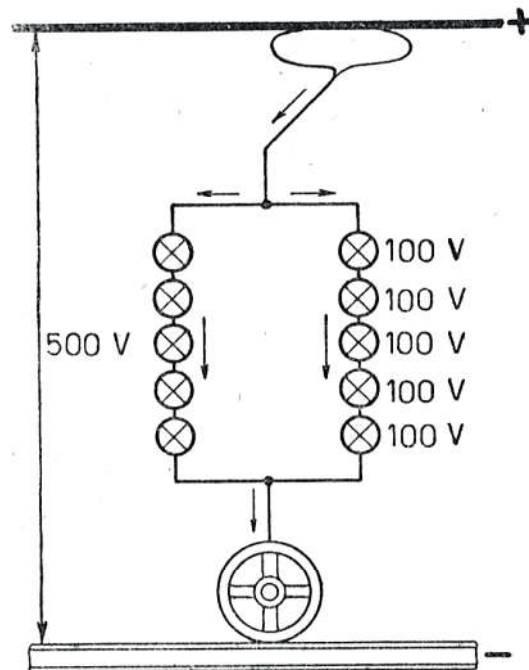
Sl. 32. Serijski spoj žarulja: svaka žarulja dobiva samo dio narinutog napona. Sve žarulje moraju biti jednake. Jedna pregori — sve ostale utru.



Sl. 33. Paralelni spoj žarulja: svaka žarulja dobiva puni narinuti napon. Žarulje mogu biti makar kako različite veličine, samo da su za jednaki napon. Jedna pregori — sve ostale svijetle.

u pogon i izvaditi iz pogona, a da se napon pritom ne promijeni. To je vrlo važno iz dva razloga. Prvi je razlog taj, što napon kod opskrbe električnom energijom mora biti približno stalan, jer su sva trošila građena za neki određeni, približno stalni napon. Drugi je razlog taj, što — već prema opterećenju — možemo imati u pogonu više ili manje generatora.

I trošila se mogu spajati i serijski i paralelno, kako se vidi iz slika 32. i 33. Serijski spoj trošila upotrebljava se tek u izuzetnim slučajevima. Kod takvog spoja svako trošilo dobiva tek dio napona, kroz sva trošila teče jednaka struja, a glavna mana je u tome, što prekid struje u jednom trošilu prekida struju u cijelom strujnom krugu. Ako bi na pr. samo jedna žarulja od njih četiri na slici 32. pregorjela, sve bi ostale žarulje ostale bez struje. Ovakav se spoj žarulja upotrebljava samo izuzetno, na pr. kod rasvjete tramvajskih kola, gdje napon između vozne žice (plus-vodič) i tračnica (minus-vodič) iznosi 500 do 700 V, što je previše za žarulje (slika 34.). Redovito se trošila spajaju u paralelni spoj. Kod takvog spoja svako trošilo dobiva cijeli napon i jedno je nezavisno od drugoga. Najveća žarulja može biti priključena kraj najmanje. Ako jedna žarulja pregori, druge žarulje to ne osjećaju.

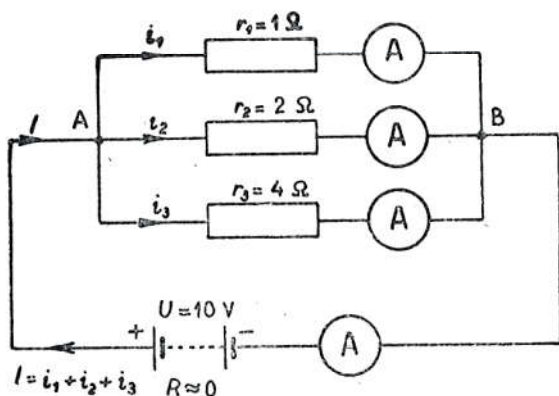


Sl. 34. Rasvjeta tramvajskih kola. Dvije paralelne serije po 5 žarulja. Ako jedna serija utrne, druga svijetli.

3.5. SERIJSKI SPOJ OTPORA

Svaki strujni krug je zapravo serijski spoj otpora. Na primjer kod strujnog kruga prikazanog na slici 23. spojeni su u seriju unutarnji otpor baterije, otpor dovodnog vodiča, otpor trošila i otpor odvodnog vodiča. Kako se pritom izračunava ukupni otpor, znamo već otprije. Kod serijskog spoja ukupni je otpor jednak zbroju pojedinih otpora.

3.6. KIRCHHOFFOV* ZAKON ZA STRUJE (GRANANJE STRUJE, PARALELNI SPOJ OTPORA)



Sl. 35. Grananje struje: Ukupna struja jednaka je zbroju struja u pojedinim granama.

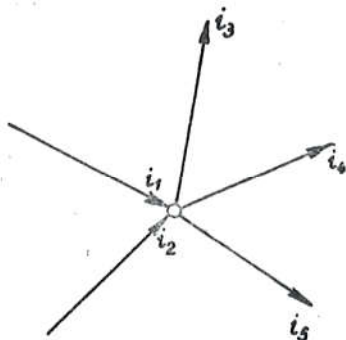
Uzmimo strujni krug kao na slici 35. U tom strujnom krugu spojena su između točaka A i B tri otpora r_1 , r_2 i r_3 ; jedan uz drugi ili, kako se to obično u elektrotehnici kaže, paralelno. U točki A grana se struja I na struje i_1 , i_2 , i_3 . Pita se samo: kako?

U prvom se redu može mjerenjem pokazati, da vrijedi:

$$I = i_1 + i_2 + i_3.$$

Ukupna struja jednaka je zbroju struja u pojedinim granama. To vrijedi sasvim općenito za svako čvorište, u kojem se struja grana (slika 36.).

* Prema fizičaru Kirchhoffu (čitaj: Kirhof).



Sl. 36. Struje u čvorištu: Ukupna struja, koja čvorištu pritječe, jednaka je ukupnoj struji, koja od čvorišta otječe.

i treći put na otpor r_3 , dobit ćemo (uzimajući u obzir, da je $U_{AB} = U$, jer je otpor dovodnih vodiča ≈ 0):

$$i_1 = \frac{U_{AB}}{r_1} = \frac{10}{1} = 10 \text{ A},$$

$$i_2 = \frac{U_{AB}}{r_2} = \frac{10}{2} = 5 \text{ A},$$

$$i_3 = \frac{U_{AB}}{r_3} = \frac{10}{4} = 2,5 \text{ A}.$$

Ove nam tri jednadžbe pokazuju, da najjača struja teče kroz najmanji otpor, a najslabija struja kroz najveći otpor. *Struja se dakle (kao i neki ljudi!) kreće linijom manjeg otpora.* Ukupna struja jest:

$$I = 10 + 5 + 2,5 = 17,5 \text{ A}.$$

Jednaka struja tekla bi u strujnom krugu i onda, ako bi umjesto gornja tri otpora bio samo jedan otpor, koji bi prema Ohmovu zakonu trebalo da iznosi:

$$R = \frac{U_{AB}}{I} = \frac{10}{17,5} = 0,57 \Omega.$$

Otpor R možemo prema tome smatrati *ukupnim otporom* paralelnih otpora r_1 , r_2 i r_3 . Kod serijskog spoja otpora ukupni je otpor jednak njihovoj zbroju, a kod paralelnog spoja otpora ukupni je otpor manji od bilo kojeg otpora iz tog paralelnog spoja. Kod paralelnog spoja otpora može se ukupni otpor izračunati po formuli:

$$\boxed{\frac{1}{R} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3}} \quad (\text{i t. d. ako ima više paralelnih otpora})$$

ili

$$G = g_1 + g_2 + g_3 \text{ (i t. d.),}$$

gdje su G , g_1 , g_2 , g_3 pripadni provodi, budući da znamo iz strane 25., da je provod $G = 1/R$. Kod paralelnog spoja je ukupni provod jednak zbroju provoda pojedinih grana.

Ukupna struja, koja nekom čvorištu pritječe, jednaka je ukupnoj struji, što od čvorišta otječe. Ova se činjenica naziva Kirchhoffov zakon za struje. Na pr. za čvorište na slici 36. vrijedi:

$$i_1 + i_2 = i_3 + i_4 + i_5.$$

To je jasno i zbog toga, što ne može u nekoj točki nastati nagomilavanje struje, niti može iz neke točke više struje otjecati, nego što joj pritječe.

Vratimo se sada na sliku 35. Primijemo li Ohmov zakon između točaka A i B jedamput na otpor r_1 , drugi put na otpor r_2

U promatranom primjeru je po toj formuli:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{1} + \frac{1}{2} + \frac{1}{4} = \frac{4+2+1}{4} = \frac{7}{4}, \quad R = \frac{4}{7} = 0,57 \, \Omega,$$

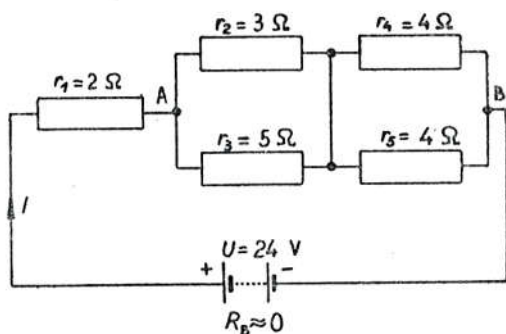
dakle upravo toliko, koliko smo i prije izračunali.

Kod nekoliko jednakih paralelnih otpora ukupni se otpor dobije najjednostavnije tako, da se otpor jednoga podijeli njihovim brojem. Ako imamo 5 paralelnih otpora po $20 \, \Omega$ svaki, onda je njihov ukupni otpor:

$$R = \frac{20}{5} = 4 \, \Omega.$$

Kod mješovitog, kombiniranog serijskog i paralelnog spoja otpora računa se slično, kao što se vidi iz narednoga primjera.

17. primjer. Treba izračunati ukupnu struju kod kombinacije otpora prema slici 37.



Sl. 37. Mješoviti spoj otpora: serijski i paralelno

Rješenje: Najprije treba izračunati paralelne otpore $r_{2,3}$, r_3 i $r_{4,5}$,

$$\frac{1}{r_{2,3}} = \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} = \frac{1}{3} + \frac{1}{5} = \frac{5+3}{15} = \frac{8}{15},$$

$$r_{2,3} = 15 : 8 = 1,875 \, \Omega.$$

$$r_{4,5} = \frac{4}{2} = 2 \, \Omega \text{ (jer su 2 jednaka paralelna otpora).}$$

Ukupni otpor cijele kombinacije otpora jest:

$$R = r_1 + r_{2,3} + r_{4,5} = 2 + 1,875 + 2 = 5,875 \, \Omega.$$

Prema tome bit će struja u tom strujnom krugu:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{24}{5,875} = 4,08 \, \text{A}.$$

Zadatak 53. Na napon 220 V spojimo u seriju 2 žarulje za 110 V. Ove žarulje nisu međutim jednake, već jedna kod 110 V uzima struju $I_1 = 0,36$ (0,55; 1,82) A, a druga uzima struju $I_2 = 0,91$ (1,36; 0,68) A. Da li će ove žarulje dobro svijetliti, spojene ovako u seriju na 220 V?

Zadatak 54. Uzmimo 5 žarulja pa ih kao na slici 33. spojimo paralelno na napon 220 V. Neka su sve žarulje različite, i to redom za ove struje: 0,63 A; 0,27 A; 0,18 A; 0,91 A; 0,34 A. Kolika je jakost struje, koja teče u dovodnom i odvodnom vodu?

Zadatak 55. 3 otpornika $R_1 = 2$ (1; 3) Ω ; $R_2 = 4$ (2; 1) Ω i $R_3 = 5$ (3; 4) Ω spojena su paralelno. Kolika struja teče kroz svaki od ovih otpornika, ako je ukupna struja 7,4 (3,2; 13,5) A?

Zadatak 56. 3 otpornika $R_1 = 5$ (30; 4) Ω ; $R_2 = 10$ (15; 12) Ω ; $R_3 = 20$ (10; 18) Ω spojena su paralelno i priključena na napon 100 V. Kolika je struja u pojedinim granama i ukupna struja?

Zadatak 57. Spojimo 5 otpornika $r_1 = 7$ (3,2; 13) Ω ; $r_2 = 4$ (25; 10) Ω ; $r_3 = 5$ (4,3; 5) Ω ; $r_4 = 8$ (7,1; 12) Ω i $r_5 = 4$ (6,6; 6) Ω prema slici 37. na napon 100 (24; 42) V. Kolika je ukupna struja? Kolika je struja kroz pojedine otpornike?

Zadatak 58. Spojimo 4 otpornika $R_1 = 34,8$ (9; 5) Ω ; $R_2 = 67,2$ (9; 5) Ω ; $R_3 = 49,8$ (6; 2) Ω i $R_4 = 49,8$ (7; 3) Ω prema slici 84. na napon 220 (100; 110) V. Kolika je ukupna struja? Koliki je napon između točaka A i B?

Zadatak 59. Koliki je ukupni otpor skupine od 6 jednakih žarulja 220 V i 0,63 A?

3.7. KIRCHHOFFOV ZAKON ZA NAPONE

Kad smo promatrali strujni krug prema slici 23., vidjeli smo, da je elektromotorna sila izvora struje jednaka zbroju svih padova napona u pojedinim dijelovima toga strujnog kruga:

$$E = I R_{AB} + I R_{BC} + I R_{CD} + I R_{DA}.$$

Što bi bilo, ako bismo u strujnom krugu imali ne jedan, već nekoliko izvora struje, kao na slikama 38. i 39. U tome bismo slučaju umjesto jedne imali

nekoliko elektromotornih sila. Ukupna elektromotorna sila bila bi jednaka zbroju pojedinih elektromotornih sila. A struja u strujnom krugu bila bi takva, da bi zbroj padova napona u pojedinim dijelovima strujnoga kruga bio jednak toj ukupnoj elektromotornoj sili.

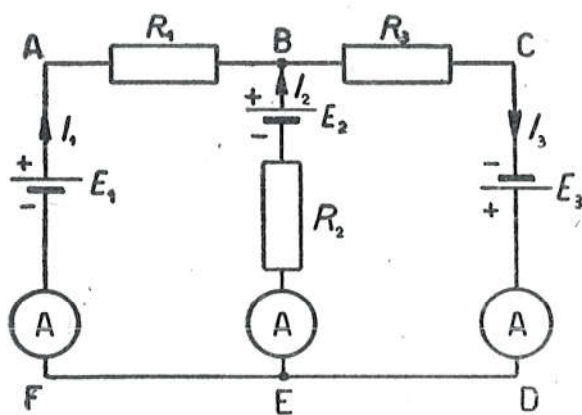
Ne samo za strujne krugove prema slikama 38. i 39., već sasvim općenito vrijedi pravilo: *Zbroj svih elektromotornih sila, koje djeluju u nekom strujnom krugu, jednak je zbroju svih padova napona u tom strujnom krugu.* Ovo se pravilo naziva *Kirchhoffov zakon za napone*.

Ovo pravilo vrijedi i za takve strujne krugove, kod kojih struja nije ista u svim dijelovima strujnoga kruga.

Uzmimo na pr. spoj izvora struje i otpora prema slici 38. Kod ovakvog spoja imamo 3 strujna kruga.

1. strujni krug: A — B — E — F — A,
2. strujni krug: B — C — D — E — B,
3. strujni krug: A — B — C — D — E — F — A.

Pomoću ampermetara možemo izmjeriti struje, koje teku u pojedinim dijelovima ovih strujnih krugova: I_1 , I_2 , I_3 . Vidimo, da ovdje struja nije jednaka u svim dijelovima strujnih krugova. Primijenimo Kirchhoffov zakon za napone na 1. strujni krug. U tom strujnom krugu djeluju dvije elektromotorne sile: E_1 i E_2 . No ako obilazimo strujni krug, na pr. u smjeru A — B — E — F, vidimo, da te dvije elektromotorne sile djeluju jedna nasuprot drugoj. Onu elektromotornu silu, koja djeluje u smjeru obilaženja, smatramo pozitivnom, a onu, koja djeluje u protivnom smjeru, smatramo negativnom. Prema tome je elektromotorna sila E_1 pozitivna, a E_2 negativna (predznak minus). Njihov zbroj je dakle jednak: $E_1 - E_2$. U dijelu strujnoga kruga E — F — A — B teče struja I_1 , koja u otporu R_1 izaziva pad napona $I_1 R_1$. U dijelu strujnoga kruga B — E teče struja I_2 , koja u otporu R_2 izaziva pad napona $I_2 R_2$. No



Sl. 38. Primjer za primjenu Kirchhoffova zakona za napone.

dok struja I_1 teče u smjeru obilaženja, dotle struja I_2 teče u protivnom smjeru. Struju I_1 smatramo prema tome pozitivnom, a isto tako i pad napona $I_1 R_1$. Struju I_2 smatramo naprotiv negativnom (predznak minus), a isto tako i pripadni pad napona $I_2 R_2$. Zbroj padova napona bit će prema tome: $I_1 R_1 - I_2 R_2$. Taj zbroj padova napona mora prema navedenom Kirchhoffovu zakonu biti jednak zbroju elektromotornih sila:

$$E_1 - E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2.$$

Na sličan način možemo dobiti za 2. strujni krug B—C—D—E—B:

$$E_2 + E_3 = I_2 R_2 + I_3 R_3,$$

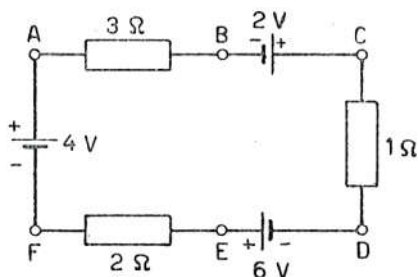
te za treći strujni krug A—B—C—D—E—F—A:

$$E_1 + E_3 = I_1 R_1 + I_3 R_3.$$

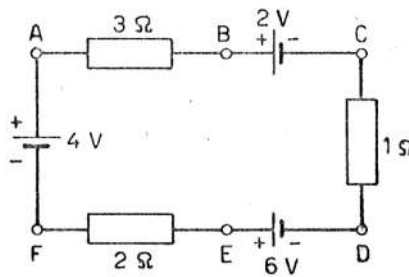
Ispravnost ovih triju jednadžbi možemo lako provjeriti za bilo koje izvore struje i otpornike, ako mjerimo struje, kao na slici 38. Tko je nešto vještiji u računanju, može i bez mjerenja pomoću navedenih triju jednadžbi izračunati struje I_1 , I_2 , I_3 , ako su poznati otpori i elektromotorne sile.

Prema tome nam Kirchhoffov zakon za napone služi za izračunavanje struje u složenim strujnim krugovima.

Zadatak 60. Strujni krug na slici 39. sastoji se od 3 akumulatorske baterije i 3 otpornika. Kolika je struja u strujnom krugu? Koliki je napon U_{AD} između točaka A i D? Unutarnji otpor baterija može se zanemariti.

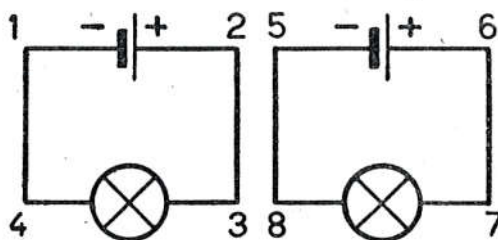


Sl. 39. Uz zadatak 60.



Sl. 40. Uz zadatak 61.

Zadatak 61. Kolika je struja u strujnom krugu iz prethodnog zadatka, ako akumulator od 2 V obratno priključimo (slika 40.)? Koliki je napon U_{AD} ?



Sl. 41. Uz zadatak 62.

Zadatak 62. Dva jednaka akumulatora napajaju dvije jednake žarulje prema slici 41. Kako će se promijeniti svjetlost žarulja, ako spojimo

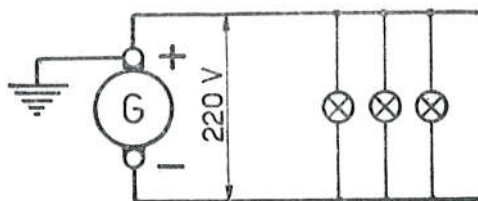
- točku 2 s točkom 5;
- točku 2 s točkom 5, a točku 3 s točkom 8;
- točku 5 s točkom 1, a točku 6 s točkom 2;
- točku 1 s točkom 6, a točku 2 s točkom 5?

Zadatak 63. Kako to, da električna struja ne čini ništa pticama, kad sjedru na vodiče električnih vodova?

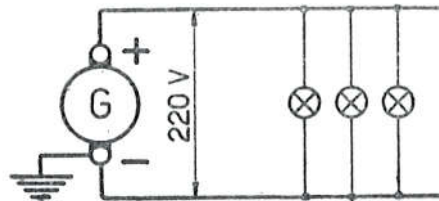
3.8. UZEMLJENJE

Uzemljiti znači metalnom vezom dobro spojiti neku električnu napravu sa zemljom. Uzemljenje se danas u elektrotehnici izvanredno mnogo upotrebljava. No što se njime postizava?

Uzmimo neki izvor istosmjernje struje, na pr. generator od 220 V. Uzemljiti možemo ili njegovu plus-stezaljku prema slici 42., ili njegovu minus-stezaljku prema slici 43. I u jednom i u drugom slučaju trošila će dobiti po-sve jednaki napon. Ako bismo uzemljenje prekinuli, trošila to uopće ne bi osjetila. No u prvom će slučaju plus-vodič imati napon 0 prema zemlji, t. j. njegov potencijal bit će jednak nuli, a minus-vodič imat će napon prema zemlji odnosno potencijal -220 V. U drugom će slučaju minus-vodič imati



Sl. 42. Plus-pol uzemljen: negativni vodič ima negativni potencijal.



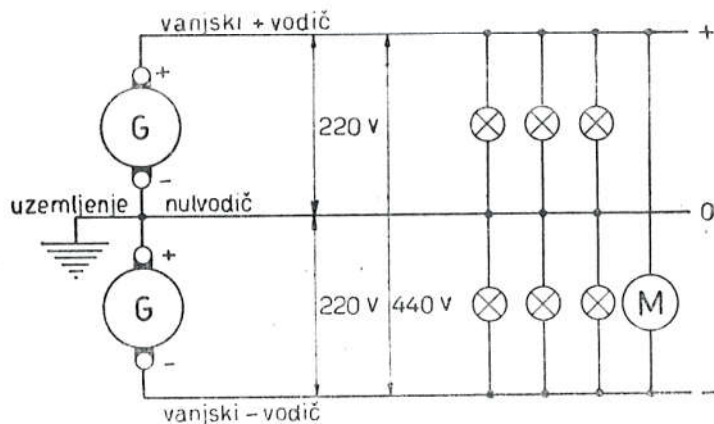
Sl. 43. Minus-pol uzemljen: pozitivni vodič ima pozitivni potencijal.

potencijal 0, a plus-vodič će imati napon prema zemlji t. j. potencijal $+220$ V. Uzemljenje se sprovodi stoga, da ne bi pod utjecajem atmosferske elektrike ili zbog drugih uzroka vodiči poprimili visoki napon prema zemlji. To bi bilo moguće, ako nijedan od njih ne bi bio uzemljen. Visoki napon prema zemlji opasan je za izolaciju električnih naprava, ali je naročito opasan za ljude, koji s električnim napravama dolaze u dodir. Stoga napon kućnih instalacija ne smije biti viši od 250 V prema zemlji.

Uzemljenje je osobito važno i kao zaštitna mjera, da na primjer kućišta pojedinih električnih strojeva, aparata i drugih električnih naprava ne dođu pod previsoki napon prema zemlji zbog pogreške u izolaciji. U tu se svrhu ovakva kućišta, koja želimo uzemljiti, spoje pomoću posebnog do z e m n o g v o d a s u z e m l j i v a č e m. Uzemljivač je obično u zemlju zabijena čelična cijev ili u zemlju ukopana bakrena ploča. Kao uzemljivač može se upotrebiti i vodovodna mreža, koja je dakako u vrlo dobrom spoju sa zemljom.

3.9. TROVODIČNI SISTEM RAZDIOBE

Uzmimo dva jednaka generatora od 220 V pa ih spojimo u seriju prema slici 44. Njihove međusobno spojene stezaljke uzemljimo. Na takva dva generatora spojimo tri vodiča: dva takozvana *vanjska vodiča*, koji su spojeni na vanjske stezaljke generatora, i jedan središnji vodič, *nulvodič*, koji je spojen na njihove uzemljene stezaljke. Jedan od vanjskih vodiča, na našoj slici gornji, ima pozitivni napon prema zemlji i nulvodiču ($+220$ V), a drugi ima jednaki negativni napon (-220 V) prema zemlji i nulvodiču.



Sl. 44. Trovodični sistem razdiobe: obična se trošila priključuju između jednog vodiča i nulvodiča, a motori između oba vanjska vodiča.

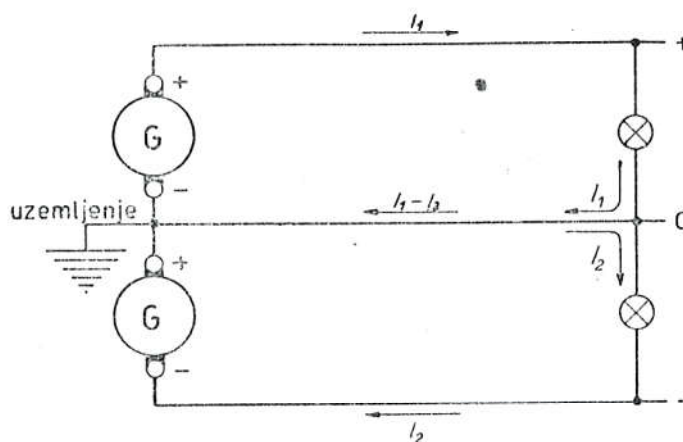
Pomoću ovakva tri vodiča možemo vršiti razdiobu električne struje do pojedinih trošila. Pritom se sijalice* i kućni aparati spajaju između jednog od vanjskih vodiča i nulvodiča, a motori se spajaju između oba vanjska vodiča. Obična dakle trošila dobivaju napon 220 V, a motori dobivaju dvaput viši napon 440 V. Ovakav se sistem naziva *trovodični sistem razdiobe*.

Prednost je ovakva sistema razdiobe dvojaka:

1. Motori dobivaju napon 440 V, premda je napon prema zemlji svega 220 V. Stoga je procentualni pad napona uz jednaku struju manji.

2. I pad napona do sijalica je manji nego kod običnog dvovodičnog sistema. U nulvodiču naime nastaje manji pad napona. To možemo razabrati, ako promotrimo prilike prema slici 45. Neka kroz sijalice spojene na gornji vanjski vodič teče struja I_1 , a kroz sijalice spojene na donji vanjski vodič neka teče struja I_2 . Kroz nulvodič teče (po Kirchhoffovu zakonu za struje) razlika struja $I_1 - I_2$. Ako je opterećenje u jednoj i u drugoj polovici sistema posve jednako, ne teče nulvodičem uopće nikakva struja. U nulvodiču nastaje dakle ili mnogo manji ili uopće nikakav pad napona.

Ovaj se sistem prije mnogo upotrebljavao za razdiobu istosmjerne struje. No, otkako se za razdiobu struje upotrebljava gotovo samo trofazna struja, izgubio je on mnogo na važnosti, pa ga danas nalazimo još samo kod starih uređaja.



Sl. 45. Struja u nulvodiču jednaka je razlici struja u oba vanjska vodiča.

Zadatak 64. Imamo trovodični sistem prema slici 45. Generatori daju napon na stezaljkama od 2×230 V. Na kraju 500 (300; 420) m dugačkog bakrenog voda s tri vodiča, od kojih svaki ima presjek 25 (16; 35) mm², priključeno je nekoliko trošila, koja su spojena tako, da je opterećenje svakog generatora 30 (25; 56) A. Koliki je napon između vanjskih vodiča i nulvodiča na kraju voda?

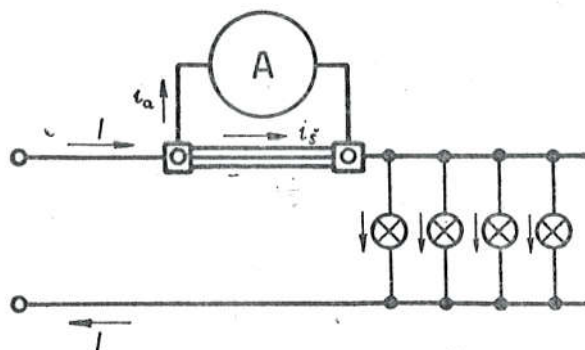
Zadatak 65. Koliki je napon između vanjskih vodiča i nulvodiča na kraju voda iz prethodnog zadatka, ako je samo jedna polovica sistema (jedan generator) opterećena sa 30 (25; 56) A, a druga polovica sistema uopće nije opterećena, jer su trošila isključena?

3.10. POVEĆAVANJE MJERNOG OPSEGA AMPERMETARA

Na slici 14. pokazano je, kako se priključuje ampermetar. Uključenje ampermetra u strujni krug znači uključenje novog otpora u taj strujni krug, jer i ampermetar ima svoj unutarnji otpor. Na taj se dakle način povećava ukupni otpor strujnog kruga, a to po Ohmovu zakonu ima za posljedicu smanjenje struje. Kod priključka ampermetra ne mjerimo dakle onu struju, koja u tom strujnom krugu teče, kad ampermetar nije priključen, već nešto manju struju. Priključak ampermetra izaziva prema tome neku promjenu u strujnom krugu, koja nam većinom nije poželjna. Da ta promjena bude što manja imaju ampermetri neznatni unutarnji otpor, koji se prema otporu drugih dijelova strujnog kruga redovito može zanemariti.

* Sijalica je u ovoj knjizi općeniti naziv za makar kakav električni izvor svjetlosti. Žarulja je sijalica s usijanom niti.

Ampermetrom možemo neposredno mjeriti samo struje da one jakosti, koja je još zabilježena na njegovoj skali. Na pr. ampermetrom sa skalom 0—5 A možemo mjeriti samo struju do 5 A. Ako bismo taj ampermetar uključili u strujni krug, kojim teče struja jača od 5 A, ne bismo je mogli izmjeriti. No osim toga izvrgli bismo ampermetar opasnosti, da bude oštećen, jer je ampermetar tako građen, da bez prevelikog ugrijavanja podnosi samo one struje, koje može mjeriti.



Sl. 46. Šentom (paralelnim otpornikom) povećava se mjerni opseg ampermetra.

Pa ipak posredno možemo ampermetrom mjeriti i jače struje, nego što pokazuje njegova skala. Treba samo da raspoložimo prikladnim otpornikom, pa da se poslužimo pravilom, koje smo naučili pri grananju struje. U tu svrhu treba spojiti otpornik paralelno s ampermetrom, kako je pokazano na slici 46. Takav se otpornik naziva *paralelni otpornik* ili *šent*. Jedan dio struje teče u tome slučaju kroz šent, a samo jedan dio kroz ampermetar. Kako

je, međutim, otpor šenta i ampermetra poznat, možemo lako iz struje, koju mjeri ampermetar, izračunati ukupnu struju. A možemo i obratno izračunati onaj šent, koji je potreban, ako hoćemo nekim ampermetrom izmjeriti jače struje, koje on inače ne može mjeriti. Najbolje ćemo to razabrati na primjeru:

18. primjer. Ampermetar ima skalu od 0 do 0,15 A i otpor $r_a = 1 \Omega$. Koliki mora biti otpor šenta, ako tim ampermetrom hoćemo mjeriti struje do 1,5 A?

Rješenje. Od ukupne struje $I = 1,5$ A smije teći kroz ampermetar samo $i_a = 0,15$ A, a kroz šent mora teći ostatak od

$$i_s = I - i_a = 1,5 - 0,15 = 1,35 \text{ A.}$$

Napon na stezaljkama ampermetra i šenta možemo lako izračunati. On je jednak padu napona, koji struja kroz ampermetar i_a izaziva u njegovu otporu r_a :

$$U = i_a r_a = 0,15 \cdot 1 = 0,15 \text{ V.}$$

Da uz napon 0,15 V na stezaljkama šenta struja kroza nj bude 1,35 A, mora njegov otpor zo Ohmovu zakonu iznositi:

$$r_s = \frac{0,15}{1,35} = 0,111 \Omega.$$

Zadatak 66. Kakav je šent potreban za mjerenje struje do 1 A (0,1 A; 50 mA) ampermetrom sa skalom do 5 (10; 2) mA, koji ima unutarnji otpor 100 (50; 500) Ω ?

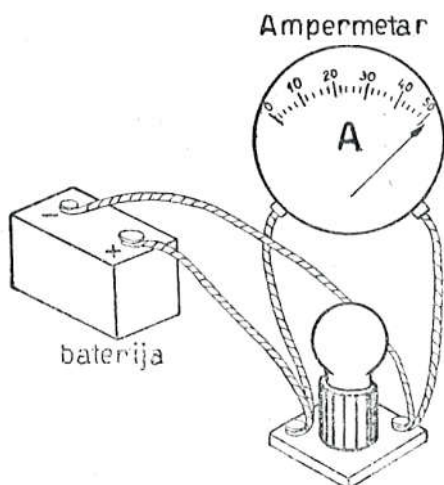
Zadatak 67. Potrebno je mjeriti struje do 30 (15; 100) A, a imamo na raspolaganju ampermetar sa skalom do 150 mA; (50 mA; 5 A). Unutarnji otpor ampermetra iznosi 1 (2; 0,01) Ω . Koliki je šent potreban za proširenje skale?

Zadatak 68. Telefonska centrala u Karlovcu ima ampermetar, koji ima skalu do 10 (100; 10) mA i unutarnji otpor od 10 (1; 100) Ω . Do koje se struje može mjeriti tim ampermetrom, ako šent iznosi $\frac{10}{99}$ ($\frac{1}{999}$; $\frac{100}{9999}$) Ω ?

Zadatak 69. Kako ćemo izmjeriti struju, ako smatramo, da ona iznosi približno 15 A, a imamo dva jednaka ampermetra, koji mogu mjeriti struje do 10 A?

3.11. MJERENJE NAPONA

Što bi se dogodilo, ako bismo ampermetar iz 18. primjera spojili ne prema slici 14. već prema slici 47. na napon 100 V?



Sl. 47. Ovakav spoj ne valja: Priključak ampermetra na malo viši napon značio bi za nj katastrofu; velika struja bi ga upropastila.

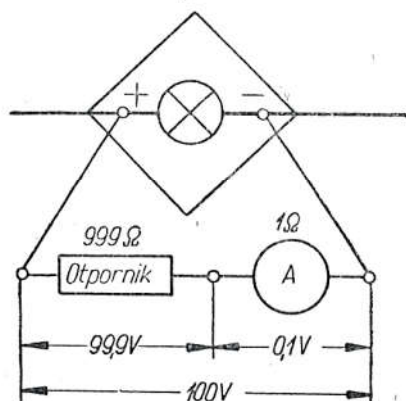
Budući da je unutarnji otpor ampermetra 1Ω , kroza nj bi potekla struja

$$\frac{100 \text{ V}}{1 \Omega} = 100 \text{ A.}$$

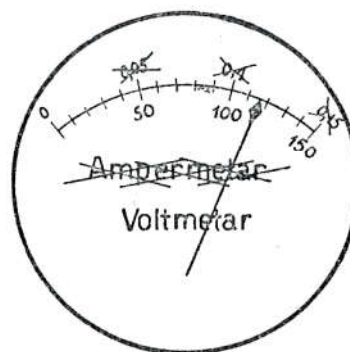
A kako je najveća struja, koju on mjeri, 0,15 A, tako velika struja bi ga začas upropastila. No tome možemo doskočiti tako, da u seriju s ampermetrom spojimo prema slici 48. otpornik od 999Ω . Ukupni otpor otpornika i ampermetra iznosi sada 1000Ω , pa bi prema tome kroz ampermetar tekla struja

$$\frac{100 \text{ V}}{1000 \Omega} = 0,1 \text{ A.}$$

Tu struju ampermetar može mjeriti. Kad bismo takvu kombinaciju otpornika i ampermetra priključili na napon 50 V, ampermetar bi pokazivao 0,05 A, a



Sl. 48. I ampermetrom se može mjeriti napon. Treba samo s njim u seriju spojiti dovoljno veliki otpornik.



Sl. 49. Tako iz ampermetra nastaje voltmetar: Serijski otpornik ugradi se u kućište instrumenta, pa se instrument baždari odmah u voltima.

kad bismo je priključili na 150 V, on bi pokazivao 0,15 A. Svakom naponu odgovara točno određena struja. Stoga možemo prema slici 49. skalu amper-

metra baždarići odmah u voltima. Naš se ampermetar pretvorio u voltmetar, u instrument za mjerenje napona. I doista *voltmetar nije drugo nego ampermetar s vrlo velikim otporom*. Kod voltmetra je otpornik ugrađen u sam instrument, a ne nalazi se izvan instrumenta kao na slici 48.

No ipak se i otpornici izvan instrumenta upotrebljavaju pri mjerenju napona. Pomoću njih možemo proširiti skalu voltmetra, t. j. voltmetar za niži napon može se upotrebiti i za više napone. Najbolje će nam to pokazati primjer:

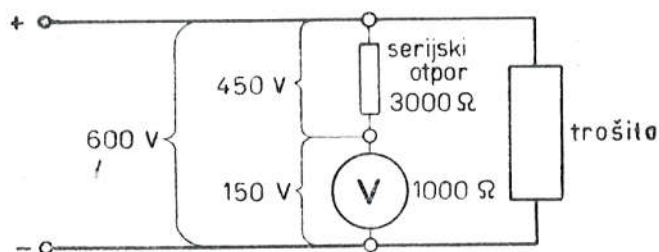
19. primjer. Neki voltmetar sa skalom do 150 V ima otpor 1000 Ω . Koliki je otpornik potrebno spojiti u seriju s voltmetrom, da se njegovo mjereno područje proširi do 600 V?

Rješenje: Spoj prema slici 50. Voltmetar će pokazati 150 V, kad kroza nj teče struja $I = 150 : 1000 = 0,15$ A. Voltmetar ne smije dobiti napon viši od 150 V. Preostalih 600 — 150 = 450 V mora biti jednako padu napona u serijskom otporniku. Taj serijski otpornik, koji nazivamo i predotpornik, mora dakle imati otpor:

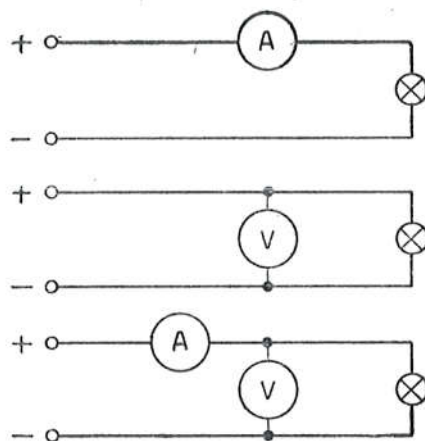
$$R_s = \frac{U_s}{I} = \frac{450}{0,15} = 3000 \Omega.$$

Kod mjerenja s tim serijskim otpornikom svaki volt na skali voltmetra znači 4 volta, jer smo opseg mjerenja 4 puta povećali (600 : 150 = 4).

A možemo i ovako razmišljati. Voltmetar bi kod 600 V trebao da mjeri 600 : 150 = 4 puta viši napon nego kod 150 V. Serijski otpornik mora dakle imati toliki otpor, da



Sl. 50. Serijskim otporom proširuje se opseg mjerenja voltmetra.



Sl. 51. Priključak ampermetra i voltmetra: Ampermetar treba uključiti u strujni krug, a voltmetar treba priključiti na točke, između kojih želimo izmjeriti napon.

struja kod 600 V bude jednaka kao kod 150 V bez serijskog otpornika. Budući da je napon 4 puta viši, mora i ukupni otpor biti 4 puta veći, da struja ostane ista, t. j. ukupni otpor mora iznositi $4 \cdot 1000 = 4000 \Omega$. A kako je 1000 Ω već ugrađeno u voltmetar, mora serijski otpornik imati otpor $4000 - 1000 = 3000 \Omega$.

Kako se priključuju voltmetar i ampermetar, pokazano je još jedamput pregledno na slici 51.

Zadatak 70. Ampermetrom iz zadatka 68. trebalo bi mjeriti napone do 30 (15; 150) V. Kako se to može učiniti?

Zadatak 71. Imamo voltmetar sa skalom do 30 (250; 1,5) V i unutarnjim otporom 500 (3000; 100) Ω , a htjeli bismo ga upotrebiti za mjerenje napona do 240 (600; 150) V. Kako ćemo to polučiti?

Zadatak 72. Do koliko se volta napona može mjeriti voltmetrom, koji ima skalu do 1,5 (60; 0,045) V i unutarnji otpor od 100 (6000; 10) Ω , ako imamo na raspolaganju otpornik od 900 (9000; 9990) Ω ?

Zadatak 73. Kako možemo izmjeriti napon, ako smatramo, da iznosi približno 400 V, a raspoložemo s dva jednaka voltmetra sa skalom do 250 V?

4. STATIČKA ELEKTRIKA

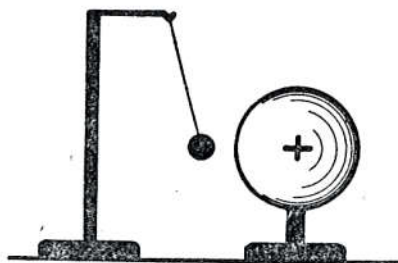
4.1. ELEKTRIČNI NABOJ

Istom 1800. godine, kad je Volta otkrio prvi galvanski element, otkrivena je električna struja. No neke električne pojave bile su poznate već davno prije, pa čak već i starim Grcima negdje oko godine 600. prije naše ere. Stari su Grci opazili naime, da jantarov štap, kad su ga natrljali, privlači sitne komadiće tvari, na pr. sitno perje, dlake, vlasi. Kasnije se pokazalo, da i predmeti od nekih drugih tvari pokazuju isto svojstvo, kad ih natrljamo. Stari fizičari* nazvali su takve predmete elektriziranim, a uzrok tih pojava nazvali su elektrikom**. No umjesto da kažemo, da je neko tijelo elektrizirano, možemo reći, da je ono nabijeno elektrikom, da je ono sjedište električnog naboja. Što su jači učinci elektriziranog tijela, kažemo, da je na tijelu veći električni naboj.

Električni se naboj može prenijeti od jednog tijela na drugo. Uzmimo na pr. stakleni štap, pa ga natarimo komadom kože ili vune***. Štap je time naelektriziran, na njemu se nalazi električni naboj. O tome se možemo lako uvjeriti, jer štap privlači sitne stvari, na pr. sitne papiriće. Ako načinimo



Sl. 52. Štap elektriziran trenjem privlači kuglicu.



Sl. 53. Kugla, na koju je elektrika prenesena, također privlači kuglicu.

laku kuglicu, na pr. od bazgine srčike, pa je objesimo o tanku svilenu nit, elektrizirani štap je privlači (slika 52.). Ako tako elektriziranim štapom prijedemo nekoliko puta po metalnoj kugli, kugla je nakon toga također elektrizirana; ona također privlači kuglicu od bazgine srčike (slika 53.).

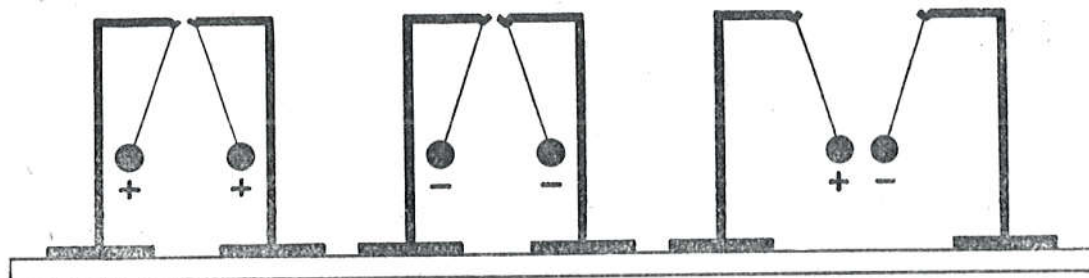
* Prvi je to učinio engleski fizičar Gilbert (Dilbert) godine 1600.

** Jantar se grčki kaže elektron, pa odatle potječe naziv elektrika.

*** Radi boljeg elektriziranja dobro je na kožu ili vunu nasuti nešto cinkova amalgama.

4.2. POZITIVNI I NEGATIVNI ELEKTRIČNI NABOJI

Već se odavno pokazalo, da elektriziranje, koje dobijemo trljanjem štapa od različitih materijala, nije uvijek istovrsno. Ima razlike između elektriziranih predmeta od stakla i elektriziranih predmeta od jantara ili smole. To se vrlo jednostavno može ustanoviti pokusom prema slici 54. U tu svrhu uzmimo dvije lagane kuglice, na pr. od bazgine srčike, pa ih objesimo o stalke



Sl. 54. Istovrsni se električni naboji međusobno odbijaju, a raznovrsni se privlače.

pomoću tanke niti. Naelektrizirajmo sada stakleni štap tako, da ga natrljamo komadom kože, te jantarov štap* tako, da ga natrljamo komadom krzna. Ako obje kuglice naelektriziramo istim štapom, bilo staklenim bilo jantarovim, one će se odbijati. Ako, naprotiv, jednu kuglicu naelektriziramo staklenim štapom, a drugu jantarovim, one će se privlačiti.

Elektrizirane su kuglice dobile električni naboj. No, kako se iz ovog pokusa vidi, postoje *dvije različite vrste električnih naboj*a. Ako su kuglice elektrizirane istim štapom, naboji na njima bit će očito istovrsni. Vrijedi dakle pravilo: *Istovrsni električni naboji međusobno se odbijaju*. Kad se kuglice međusobno privlače, naboji su na njima različite vrste.

Francuski fizičar Coulumb (čitaj: Kulon) ustanovio je pokusima, da dva električna naboja djeluju jedan na drugi silom, koja je razmjerna s tim nabojima, a obrnuto razmjerna s njihovim međusobnim razmakom, t. j. da je ta sila to veća, što su naboji veći i što su oni jedan bliže drugome. Po njemu je ta činjenica nazvana *Coulombov zakon*.

Sad možemo razumjeti i ovu pojavu. Kako smo rekli, elektrizirani predmet privlači sitne stvari, na pr. sitne papiriće. No kad ih je privukao, on ih odmah zatim i odbija. O tome se lako možemo uvjeriti pokusom. Uzrok tome jest, što na te papiriće prelazi dio naboja s predmeta: oni dobiju istovrsni električni naboj, a istovrsni se naboji međusobno odbijaju.

Elektrika dobivena trljanjem staklenog štapa različita je dakle od one nastale trljanjem štapa od jantara. Djelovanje tih dviju vrsta elektrike posve je jednako, samo što je smjer djelovanja različit. Stoga je jedna vrsta elektrike nazvana *pozitivnom* te se označuje sa +, a druga *negativnom* pa se označuje sa —. Pozitivna je elektrika ona, koja nastaje trljanjem staklenog štapa.

Kako nastaje električni naboj na nekom tijelu? Na početku ove knjige smo rekli, da postoje dvije vrste nosilaca elektrike: elektroni i atomske jezgre. Elektroni su najsitnije čestice. Oni imaju izvanredno sićušan električni

* Umjesto jantarova štapa može se uzeti i komad pečatnog voska i natrljati ga svilom.

naboj. No kako ih je već i u malom tijelu gotovo neizmjereno mnogo, ukupni naboj svih elektrona u svakom takvom tijelu vrlo je velik. Pa ipak, *normalno je svako električno tijelo neutralno*: ono nije ni pozitivno ni negativno. Ono u sebi sadrži isto toliku količinu pozitivne električke, kolika je negativna električka elektrona. Ono postaje samo onda električno, ako je na njemu višak jedne vrste električke. Dakle, *električni naboj nekoga tijela je pretičak pozitivne ili negativne električke*.

Pri trljanju kožom stakleni štap postaje pozitivno električan. To on postaje stoga, što jedan dio njegovih elektrona prelazi pri trljanju na kožu. Zbog toga postaje koža negativno električna, jer je na njoj višak elektrona. Jantarov štap postaje negativno električan, kad ga taremo krznom. To on postaje stoga, što na nj prelazi dio elektrona s krzna. Krzno ima stoga manjak elektrona pa ono postaje pozitivno električno. Prema tome, pri trljanju se ne stvara električka, već se samo drukčije raspodjeljuje između predmeta, koji taremo, i tarila.

Neko tijelo možemo električki nabiti ne samo trenjem, već i na drugi način, i to mnogo jednostavnije. Već smo u uvodu ustanovili (vidi sliku 15.), da se na minus-polu izvora istosmjerne struje nagomilavaju elektroni, dok na plus-polu nastaje manjak elektrona. Ako na pr. kuglu sa slike 53. priključimo na plus-pol ili minus-pol izvora istosmjerne struje od 110 V, pa onda taj priključak prekinemo, kugla će ostati pozitivno, odnosno negativno električna. To lako možemo ustanoviti pomoću kuglice od bazgine srčike.

Električni naboj je električka u mirovanju. Takva se električka naziva *statička* električka*. Ona nema onih učinaka, koje ima električka u gibanju, električna struja. Statička električka ne proizvodi nikakvih magnetskih učinaka, nikakvih kemijskih ni nikakvih toplinskih učinaka. Da međusobno djelovanje dviju kuglica kod pokusa prema slici 54. nije isto što i magnetizam, vidi se i po tome, što je sasvim svejedno od kakvog su materijala te kuglice: da li od drva, gume ili od kakvog metala. Zgodno je samo, da su one što lakše. Sila, kojom se one privlače ili odbijaju, vrlo je slaba, pa teške kuglice otklanja jedva zamjetljivo.

4.3. ELEKTRIČNO POLJE

U prostoru oko tijela, na kojem postoji električni naboj, t. j. višak pozitivne ili negativne električke, zamjećujemo električne pojave. Taj je prostor ispunjen silama naročite vrste, koje djeluju na druge električne naboje. Na pr. u prostoru oko pozitivno nabijene metalne kugle postoje sile, koje djeluju na električne naboje tako, da pozitivne naboje odbijaju od kugle, a negativne privlače prema kugli. U prostoru oko negativno nabijene metalne kugle djeluju sile, koje pozitivne električne naboje privlače prema kugli, a negativne odbijaju od kugle. *Prostor, u kojem sile djeluju na mirne električne naboje, nazivamo električno polje. Električki nabijena tijela okružena su električnim poljem.*

U elektrotehničkoj praksi razumijeva se obično pod poljem ne samo prostor, u kojem djeluju sile, već i samo stanje tog prostora karakterizirano postojanjem tih sila.

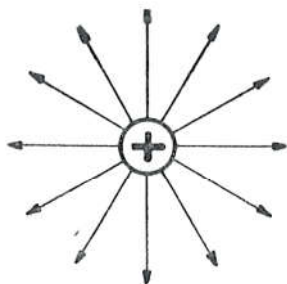
Polje je očito to jače, što je jače njegovo djelovanje na električne naboje. Kako nam pokusi pokazuju, jakost polja je najveća u neposrednoj blizini električki nabijenog tijela, na pr. metalne kugle. Ako pozitivno nabijenu

* »Statički« znači: onaj koji se ne giba, koji miruje.

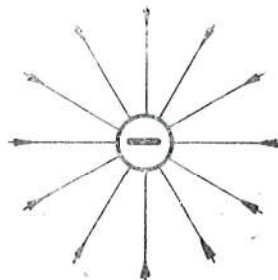
sitnu kuglicu od bazgine srčike približimo pozitivno nabijenoj metalnoj kugli (kao na slici 53.), električno polje metalne kugle odbijati će kuglicu to jače, što je više približimo. U nekoj udaljenosti od metalne kugle ne ćemo moći primijetiti nikakvo djelovanje na bazginu kuglicu. *Jakost električnog polja naglo opada, kad se udaljujemo od njegova uzročnika.*

Za smjer električnog polja u nekoj točki prostora uzimamo onaj smjer, u kojem ono u toj točki djeluje na pozitivni električni naboj.

Da polje učinimo zornim, predložimo ga linijama, koje nazivamo linijama električnog polja ili *električnim silnicama*. Pozitivno nabijena metalna kugla odbija pozitivne naboje ravno od sebe, t. j. okomito na svoju površinu.



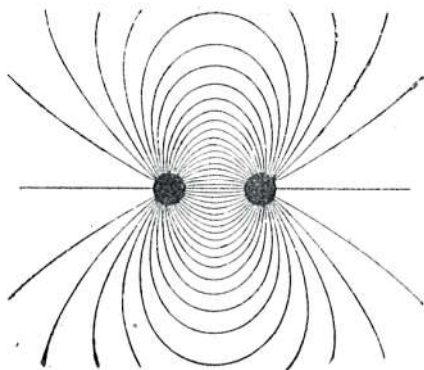
Sl. 55. Električne silnice izlaze iz pozitivno nabijenih tijela.



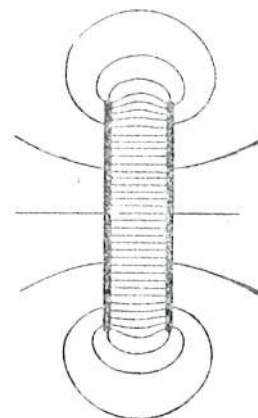
Sl. 56. Električne silnice ulaze u negativno nabijena tijela.

Linije električnog polja metalne kugle okomite su dakle na njezinu površinu. Pomoću silnica predložimo to tako, kako je pokazano na slikama 55. i 56. Ako je kugla pozitivno nabijena, kao na slici 55., silnice imaju smjer od kugle, jer pozitivne naboje odbijaju od kugle. Ako je kugla negativno nabijena, kao na slici 56., silnice imaju smjer prema kugli, jer pozitivne naboje privlače prema kugli. *Silnice izlaze iz pozitivno nabijenih tijela, a ulaze u negativno nabijena.*

Ako približimo dvije kugle, koje su nabijene jednakim, ali protivnim nabojima, u prostoru oko njih postojati će također električno polje. No silnice, koje predložuju smjer polja, ne će više biti pravci kao na slikama 55. i 56. Sil-



Sl. 57. Električno polje između dvije kugle. Polje je najjače, gdje su silnice najgušće.



Sl. 58. Između ravnih metalnih ploča električno je polje jednako jako svugdje, osim na rubovima.

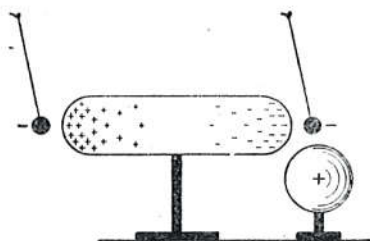
nice, koje izlaze iz pozitivne kugle, ulaze u negativnu. Silnice su sada kao na slici 57. Na toj slici nije nacrtan njihov smjer. Ako je lijeva kugla pozitivna, njihov je smjer od lijeve kugle prema desnoj. Ako je pozitivna desna kugla, njihov je smjer, obratno, od desne kugle prema lijevoj.

Ako umjesto kugala imamo dvije ploče nabijene jednakim, ali protivnim nabojima, silnice će izgledati kao na slici 58. I ovdje, kao i uvijek, njihov je smjer od pozitivne ploče prema negativnoj.

Električne silnice ne pokazuju nam samo smjer električnog polja. Njihova nam slika daje podatke i o njegovoj jakosti. Što su silnice na nekom mjestu gušće, to je polje na tom mjestu jače. Kod kugle na slikama 55. i 56. silnice su najgušće tik uz kuglu, a sve su rjeđe, što se od kugle više udaljujemo. To se slaže s onim, što smo rekli, da je električno polje najjače uz nabijeno tijelo, te postaje sve slabije, što se više udaljujemo od nabijenog tijela. Na slici 57. silnice su najgušće između kugala. Na tom je mjestu polje najjače. Na slici 58. silnice su između ploča svagdje jednako guste (osim na rubovima). Prema tome je polje između metalnih ploča svagdje jednako jako, samo što je na rubovima nešto slabije. Izvan takvih ploča polje je vrlo slabo.

4.4. INFLUENCIJA

Približimo li elektrizirano tijelo, na pr. kuglu prema slici 59., neelektriziranom metalnom tijelu na izoliranom stalku, primijetit ćemo čudnu



Sl. 59. Influenција: Pod njezinim utjecajem pojavljuje se na električki posve neutralnom tijelu s jedne strane pozitivni, a s druge strane negativni električni naboj.

pojavu. Ovo električki dotle posve neutralno tijelo postalo je s jedne strane pozitivno, a s druge negativno električno. (To možemo lako ustanoviti na pr. pomoću njihalceta s kuglicom od bazgine srčike.)

Rezultate ovog pokusa možemo ovako protumačiti. Dok je neko tijelo električki neutralno, ne znači, da u njemu nema električnih naboja. No ono ima jednaku količinu pozitivne i negativne elektrike, pa se njihovi učinci poništavaju. Nosioci negativne elektrike su elektroni, od kojih je jedan dio u metalima slobodan, pa se može slobodno kretati po njima. Kad našem dugoljastom tijelu približimo pozitivno nabijenu kuglu, ona privuče jedan dio slobodnih elektrona, jer se pozitivni i negativni naboji međusobno privlače. Na strani prema pozitivno nabijenoj kugli postoji višak elektrona, pa je ta strana negativno nabijena. Na protivnoj strani postoji manjak elektrona, pa je ona pozitivno nabijena.

Kad bi kugla bila negativno nabijena, ona bi odbijala elektrone, pa bi na strani prema kugli bio manjak elektrona, t. j. pozitivni naboj, a na protivnoj strani višak elektrona, t. j. negativni naboj.

Kad elektriziranu kuglu odmaknemo od dugoljastog tijela, ono postaje opet električki posve neutralno.

Ova pojava, da elektrizirano tijelo utječe na neelektrizirano, zove se *influenција*.* Do ove pojave dolazi sasvim općenito uvijek, kad se u blizini električki nabijenog tijela nalazi drugo tijelo načinjeno od materijala, koji je električki vodič. Kod izolatora nema influencije, odnosno ona je neznatna. Kod izolatora gotovo nema slobodnih elektrona, pa se elektroni ne mogu skupljati pod utjecajem elektriziranog tijela.

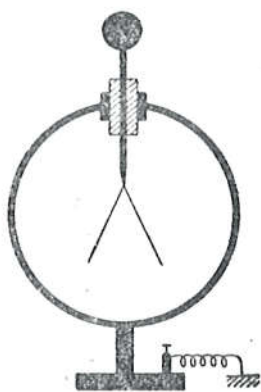
Pomoću influencije može se tijelo i trajno elektrizirati, t. j. tako, da ostane električno i onda, kad elektrizirano tijelo odmaknemo od njega. Pa i naše metalno dugoljasto tijelo na slici 59. možemo influencijom trajno elektrizirati. U tu ga svrhu treba samo spojiti sa zemljom. Pozitivno elektrizirana kugla privuče iz zemlje

*Influencija je latinska riječ, a znači utjecaj.

elektrone, pa sada na cijelom tijelu postoji višak elektrona: cijelo je tijelo negativno električno. Ako sad spoj sa zemljom prekinemo, elektroni se više ne mogu vratiti u zemlju, kad odmaknemo elektriziranu kuglu. Dugoljasto tijelo ostaje negativno električno. Kad bi kugla bila ne pozitivno nego negativno nabijena, mogli bismo na isti način dugoljasto tijelo pozitivno nabiti, jer bismo preko uzemljenja jedan dio elektrona s tijela odveli u zemlju.

4.5. ELEKTROSKOP I ELEKTROSTATSKI VOLTMETAR

Da li je neko tijelo elektrizirano ili nije, možemo najlakše ustanoviti pomoću jednostavnog instrumenta prikazanog na slici 60., koji se naziva *elektroskop*. Glavni dio elektroskopa su vrlo lagani metalni (alumijski) listići, koji se mogu razmaknuti (kao na slici) i skupiti. Ti se listići nalaze na donjem kraju metalnog štapa s kuglom na vrhu, a taj je štap izolirano uveden u metalno kućište, na kojem se nalaze stakleni otvori tako, da listiće možemo vidjeti. Kućište je uzemljeno.



Sl. 60. Elektroskop — instrument, koji na najjednostavniji način pokazuje, da li je neko tijelo naelektrizirano.

Prijedemo li naelektriziranim staklenim štapom nekoliko puta po kugli na vrhu elektroskopa, elektrizirat će se kugla, a s njom i štap i listići pozitivnom elektrikom. Listići će se razmaknuti, jer su oba nabijena pozitivnom elektrikom, a istovrsni se naboji međusobno odbijaju. Ako nakon toga prijedemo po kugli nekoliko puta naelektriziranim komadom pečatnog voska, listići će se najprije stisnuti, jer će se pozitivni naboj elektroskopa izjednačiti s negativnim nabojem pečatnog voska. Nastavimo li elektriziranje komadom pečatnog voska, listići će se opet razmaknuti, jer će se sada elektrizirati negativnom elektrikom.

Da ustanovimo, da li je neko tijelo elektrizirano ili nije, ne treba tim tijelom ni dodirnuti elektroskop. Dovoljno je, da se to tijelo približi kugli elektroskopa, pa će se listići zbog influencije razmaknuti. Možemo postupiti i tako, da uzmemo običnu izoliranu odvrtku, s njom dotaknemo tijelo, koje želimo ispitati, pa odvrtku približimo elektroskopu. Ako je ispitano tijelo elektrizirano, elektrizirat će se i odvrtka, pa će se listići elektroskopa razmaknuti, kad mu je približimo.

Elektroskop iskorišćuje pojavu, da se metalni listići nabijeni istovrsnom elektrikom međusobno odbijaju. Oni se odbijaju to jače, što su jače elektrizirani. Ima elektroskopa, kod kojih se veličina odklona listića može pročitati na skali ispod listića. Takvi se elektroskopi nazivaju *elektrometri*.

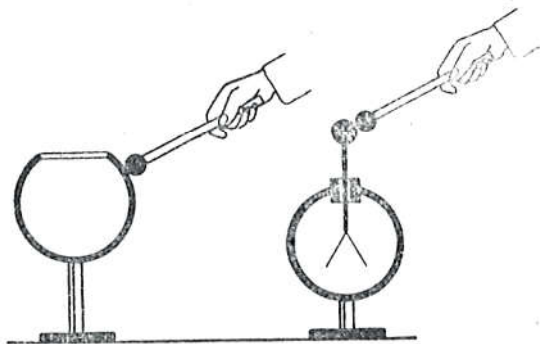
Elektrometar možemo elektrizirati i tako, da ga priključimo na neki napon. U tom slučaju njegov štap spojimo s jednim polom, a kućište s drugim polom. Otklon elektrometra bit će to veći, što je napon viši, pa se takvim instrumentom može i mjeriti napon. Stoga se takvi instrumenti nazivaju i *elektrostatiski voltmetri*. Ima ih složenije građenih, koji iskorišćuju privlačenje tijela (na pr. pločica), između kojih vlada napon, a kod kojih se pomak pomičnog dijela prenosi na kazaljku, pa ona na skali instrumenta pokazuje napon.

4.6. ELEKTRIČNO POLJE U VODIČIMA

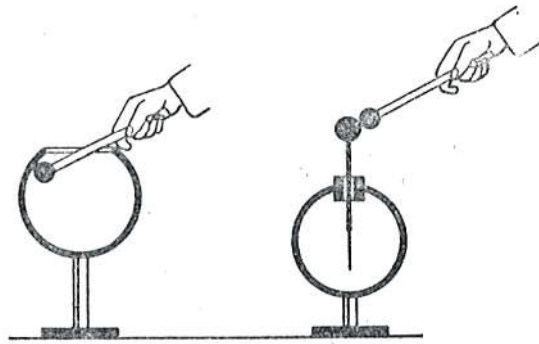
Uzmimo elektriziranu šuplju kuglu prema slici 61., koja ima s gornje strane otvor. Uzmimo nadalje odvrtku ili metalnu kuglicu na izoliranom dršku te elektroskop. Načinimo sada ova dva pokusa:

1. Dotaknimo se kuglicom (ili odvrtkom) šuplje kugle izvana, pa onda elektroskopa. Listići će se smjesta razmaknuti: dokaz, da je šuplja kugla doista elektrizirana.

2. Razelektrizirajmo kuglicu i elektroskop.* Dotaknimo sada kuglicom unutarnju stranu šuplje kugle (slika 62.) pa zatim elektroskop. Listići elektroskopa ne će se razmaknuti: dokaz, da u unutrašnjosti šuplje kugle nema električnih naboja.



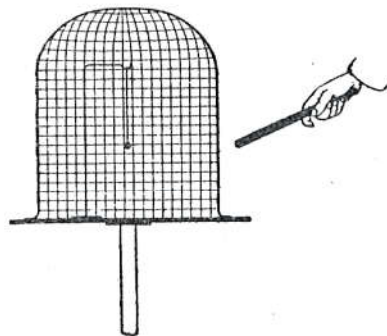
Sl. 61. Da je šuplja kugla naelektrizirana, uvjerimo se elektroskopom.



Sl. 62. U unutrašnjosti šuplje kugle nema ni električnih naboja ni električnog polja.

Kako silnice električnog polja počinju i svršavaju na električnim nabojima, ne može u unutrašnjosti vodiča biti niti električnog polja. Da je to doista tako, može nam pokazati i ovaj pokus: Ako njihalcetu s kuglicom od bazgine srčike približimo elektrizirani štap, ono će se otkloniti. No ako njihalce pokrijemo krletkom od žice, kao na slici 63., ono se ne će otkloniti pod utjecajem bilo kakvog elektriziranog štapa ili drugog elektriziranog tijela.

Sl. 63. U unutrašnjosti vodiča nema električnog polja. Već i metalna mreža sprečava ulaz električnog polja.



Električno polje ne može prodrijeti ni unutar ovakve krletke, a kamoli kroz puni metalni vodič. Prema tome možemo doista reći: *U unutrašnjosti vodiča nema električnog polja.* A gdje nema polja, nema ni električnih naboja. Možemo dakle također reći: *U unutrašnjosti vodiča nema električnih naboja.*

Jednostavnim metalnim kućištem možemo dakle lako zaštititi od utjecaja raznih električnih polja instrumente, kod kojih je to potrebno s obzirom na njihovu točnost.

* U tu je svrhu dovoljno, da ih dotaknemo rukom.

4.7. POZITIVNA I NEGATIVNA ELEKTRIKA I SMJER STRUJE

Zašto je baš električni naboj staklenog štapa nazvan pozitivnim, a onaj jantarova štapa negativnim?

Zamislimo, da imamo komad papira, koji je s jedne strane crven, a s druge strane modar. Mi bismo njegovu crvenu stranu mogli prozvati licem, a modru stranu naličjem, — a mogli bismo, naravno, učiniti i obratno. U istom su položaju bili nekad i stari fizičari. I oni su mogli učiniti obratno: mogli su električni naboj jantarova štapa proglasiti pozitivnim. Ali oni su se — tko zna iz kojeg razloga — odlučili, da znak »plus« (+) dadu naboju staklenog štapa. Odlučili i — pogriješili! Nisu ni slutili, da se nalaze na raskršću dvaju putova, od kojih je samo jedan bio pravi.

Mnogo, mnogo kasnije, kad su otkriveni elektroni, pokazalo se, da ti elektroni imaju naboj iste vrste kao i jantarov štapić. Prema tome kažemo, da su elektroni negativno električni. Već smo na početku ove knjige vidjeli, da je električna struja u metalnim vodičima gibanje elektrona, negativnih čestica elektrike, dok se pozitivne čestice elektrike praktički ne gibaju. Između polova džepne baterije na slici 15. vlada električni napon kao posljedica različitih električnih naboja na polovima. Na negativnom je polu višak elektrona, na pozitivnom polu manjak elektrona, pa postoji težnja za izjednačenjem, električni napon. Ako polove spojimo kao na slici 16. tako, da strujni krug bude zatvoren, poteći će električna struja. Elektroni će od negativnog pola, odanle gdje ih je previše, poteći prema pozitivnom polu, tamo gdje ih je premalo. *Elektroni se dakle gibaju od negativnog pola prema pozitivnom.* No obično se taj smjer ne uzima kao smjer struje. Obično se uzima, da *električna struja teče od pozitivnog pola prema negativnom*, kao što voda teče s veće visine prema manjoj, te kao što toplina prelazi od tijela više temperature na tijelo niže temperature, a ne obratno. Pa kako je onda električna struja gibanje elektrona? Nešto, čini se, nije ovdje u redu.

I doista nešto nije u redu. Nije u redu stoga, što je onaj pol baterije, na kojem je višak elektrona označen sa minus, a onaj pol, na kojem je manjak elektrona, sa plus. Oznaka polova je pogrešna, a to potječe odatle, što pozitivni pol baterije ima istovrsni električni naboj kao elektrizirani stakleni štapić. Pogreška je dakle učinjena onda, kad je električni naboj staklenog štapa dobio oznaku +! No ta je pogreška otkrivena tek onda, kad su otkriveni elektroni, a tada je već bilo prekasno. Već su svi električni strojevi i aparati na svijetu imali krive oznake polova, pa se elektrotehničari nisu više mogli odlučiti, da te oznake promijene. To bi bilo za duže vrijeme uzrokovalo veliku zbrku, a sigurno bi bilo došlo i do mnogih nesreća. A kako je za račun mnogo jednostavnije pretpostaviti, da struja teče od pozitivnog pola prema negativnom, ostao je i krivi smjer struje. No to neka nas ništa ne buni, jer je većinom sasvim svejedno, da li uzmemo, da struja teče od pozitivnog pola prema negativnom, ili obratno. Ima, međutim, slučajeva, gdje je važno znati faktični smjer struje. Tada ne smijemo zaboraviti, da je struja gibanje elektrona i da se *elektroni gibaju od negativnog pola prema pozitivnom, dakle u smjeru obratnom od onoga, koji obično uzimamo za smjer struje.*

4.8. KAPACITET

Spojimo metalnu kuglu s jednim polom izvora istosmjerne struje. Odmah će poteći struja, koja će teći sve dotle, dok se na kugli ne skupi toliki električni naboj, dakle tolika količina elektrike, da će ona svojom odbojnom silom

spriječiti dalje pritjecanje struje, t. j. djelića elektrike, sićušnih električnih naboja. (Istovrsni se naime električni naboji, kako znamo, međusobno odbijaju.) Struja će prestati da teče, kad potencijal kugle bude jednak potencijalu onoga pola, s kojim je kugla spojena, t. j. kad između njih ne će postojati nikakav električni napon. Sve će se to zbiti u izvanredno kratko vrijeme, u neznatnom djeliću sekunde.

Nešto slično će se dogoditi, ako posudu u obliku šuplje kugle spojimo preko cijevi s kotlom, u kojemu se nalazi para pod tlakom. Uzmimo, da je kugla potpuno prazna, pa čak zrakoprazna. Čim je priključimo na kotao, prostrujat će kroz spojnu cijev para, koja će strujati sve dotle, dok tlak u kugli ne bude jednak tlaku u kotlu. U tom je času sila čestica pare u kugli tako velika, da se one mogu oduprijeti svakom daljnjem nadiranjju pare.

O čemu će ovisiti količina pare, što će je primiti naša šuplja kugla? Ona će biti očito to veća što je kugla veća i što je tlak veći. Sasvim je slično i kod elektrike. Količina elektrike, što je primi kugla, ako je spojimo s nekim polom izvora struje, ovisi o veličini kugle i o veličini napona između izvora struje i kugle. Ona će biti to veća, što je promjer kugle veći i što je napon viši. Ako napon povišimo za 1 V, kugla će primiti još neku količinu elektrike, ako ga povišimo za 10 V, onda će primiti 10 puta veću količinu elektrike. To ne vrijedi samo za kuglu, već za makar kakvo tijelo, ako je to tijelo načinjeno od materijala, koji je vodič električne struje. Ako na pr. metalnu ploču spojimo s jednim polom izvora struje, ona će se vladati jednako. *Onu količinu elektrike, koju tijelo prima kod povišenja napona za 1 V, nazivamo kapacitet. Kapacitet je dakle u elektrotehnici sposobnost nekoga tijela da primi izvjesnu količinu elektrike.* Slično je na pr. pod vode: Kapacitet nekog rezervoara je njegova sposobnost primiti izvjesnu količinu vode.

Jedinica kapaciteta je farad (oznaka: F). Kapacitet 1 F ima ono tijelo, koje pri povišenju napona za 1 V primi količinu elektrike 1 As. Jedinica F proizlazi iz općeg sistema jedinica, ali je ona mnogo prevelika za tehničku praksu, jer je 1 As golemi električni naboj*. Tako velika kugla, kao što je naša zemlja, ima kapacitet od svega 0,0007 F. Stoga se upotrebljavaju znatno manje jedinice: mikrofarad (oznaka: μF^{**}), nanofarad (nF) i pikofarad (pF), kod čega je:

$$1 \text{ F} = 1\,000\,000 \mu\text{F} = 1\,000\,000\,000 \text{ nF} = 1\,000\,000\,000\,000 \text{ pF},$$

$$1 \mu\text{F} = 1\,000 \text{ nF} = 1\,000\,000 \text{ pF},$$

$$1 \text{ nF} = 1\,000 \text{ pF}.$$

Kadšto se (na pr. u radiotehnici) kapacitet izražava i u centimetrima. To se osniva na činjenici, da kugla izvjesnog polumjera ima točno određeni kapacitet. Na pr. kapacitet 1 pF ima kuglica polumjera 0,9 cm, a kapacitet 100 pF ima kugla polumjera 90 cm, t. j. kugla sa 100 puta većim polumjerom. Pritom je sasvim svejedno, od kakvog je materijala kugla, samo ako je on vodič. Stoga, ako je za neko tijelo ili za neku napravu navedeno, da ima kapacitet

* 1 As nije kod električne struje nikakva osobito velika količina elektrike. Ta nju čini onaj skup elektrona, koji kod struje od svega 1 A u 1 sekundi proteče kroz neki presjek vodiča. Ali ne smijemo zaboraviti, da se kod električne struje gibaju svi slobodni elektroni u vodiču, kojih ima veoma mnogo. No ti slobodni elektroni u gibanju ne predstavljaju višak negativnog električnog naboja, jer je njihov naboj jednak naboju pozitivnih električnih čestica, pa se učinci tih protivnih naboja poništavaju. Ovdje se međutim radi o višku električnog naboja, pozitivnog ili negativnog, a taj bi višak naboja, koji bi iznosio 1 As, bio golem.

** μ — grčko slovo »mi«.

na pr. 45 cm, onda to znači, da to tijelo, odnosno ta naprava ima isti kapacitet kao kugla polumjera 45 cm. Budući da je $1 \text{ pF} = 0,9 \text{ cm}$, onda je $45 \text{ cm} = 45 : 0,9 = 50 \text{ pF}$.

Zadatak 74. 0,000 022 F (0,14 μF ; 0,098 nF) — koliko je to μF (nF; pF)?

Zadatak 75. 247 μF (64,3 nF; 8000 pF) — koliko je to F (μF ; nF)?

Zadatak 76. 82 (117; 26) pF — koliko je to cm?

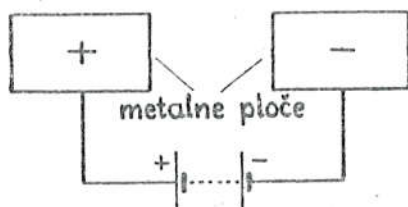
Zadatak 77. 84 (850; 240) cm — koliko je to pF?

4.9. KONDENZATORI

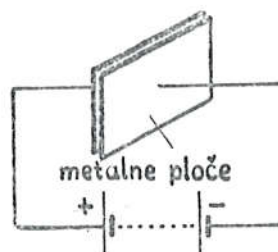
Ima jednostavan način, kako možemo na jednom mjestu skupiti znatno veće električne naboje nego na najvećim metalnim kuglama. Jednostavne naprave, kojima to postizavamo, nazivaju se kondenzatori.

Kondenzatori su u biti dvije međusobno blize vodljive površine, koje se ni na jednom mjestu ne dodiruju.

Uzmimo na pr. dvije ravne ploče te ih spojimo na neki izvor struje kao na slici 64. Na njima će se skupiti neki, ne baš veliki, električni naboji, na



Sl. 64. Na metalnim pločama skupljaju se pod utjecajem elektromotorne sile izvora struje električni naboji. Ako su ploče razmaknute, naboji su mali.



Sl. 65. Ako su ploče jedna uz drugu, naboji su nerazmjerno veći. Dvije blize metalne plohe čine kondenzator.

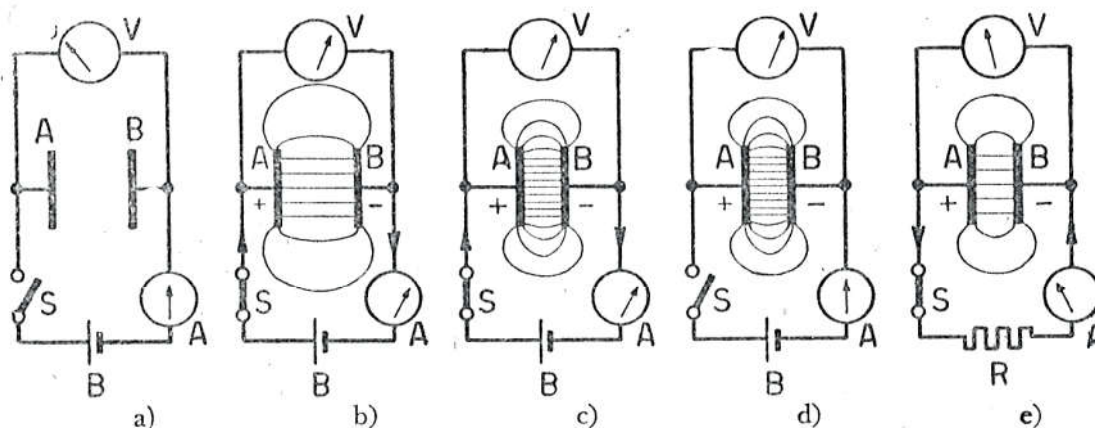
jednoj pozitivan, na drugoj negativan. Ako te ploče međusobno približimo kao na slici 65., njihovi će se naboji mnogostruko povećati i bit će to veći, što smo ploče više približili. Uzrok je tome, što pozitivni naboj lijeve ploče veoma slabi, a — ako su ploče vrlo blizu — gotovo poništava djelovanje negativnog naboja desne ploče. Zbog toga može na desnu ploču doći daleko više elektrona, nego što bi to bilo moguće, kad lijeve ploče ne bi bilo. Jednak je utjecaj desne ploče na lijevu. Približenje ovih ploča uzrokovalo je dakle znatno povećanje električnog naboja uz isti napon izvora struje, a to znači znatno povećanje kapaciteta. Električna kao da se na pločama zgusnula, kondenzirala, pa se stoga takve dvije međusobno blize ploče nazivaju kondenzator.

Kapacitet kondenzatora je to veći, što je veća površina njegovih ploča i što su one međusobno bliže. Kasnije ćemo vidjeti (u 4.11), da kapacitet kondenzatora bitno ovisi još o nečemu: o vrsti materijala, koji se nalazi između njegovih ploča.

Vladanje kondenzatora pri nabijanju i izbijanju možemo promotriti pokusom prema slici 66. Uzmimo u tu svrhu pločasti kondenzator, kojemu se razmak između ploča može mijenjati. Dok je sklopka S isklopljena, između ploča kondenzatora AB nema nikakva napona. Elektrostatski voltmetar V ne pokazuje nikakva otklona. Kad sklopku uklopimo, poteče struja, koja za vrlo kratko vrijeme nabije kondenzator, pa ampermetar A pokaže časoviti otklon. Između ploča nastane

električno polje: silnice izlaze iz plus-naboja i ulaze u minus-naboje. Kondenzator je nabijen, na njegovim se pločama skupila izvjesna količina elektrike.

Tu količinu elektrike, taj naboj na pločama kondenzatora, možemo vrlo jednostavno povećati tako, da smanjimo razmak između ploča kondenzatora. Ako smanjimo razmak na pr. na polovicu, recimo od 4 na 2 cm, naboj će se udvostručiti. Kondenzator kod istog napona primi dvostruku količinu elektrike; to znači, njegov se kapacitet podvostručio. I jakost električnog polja između ploča kondenzatora se podvostručila. I za vrijeme približavanja ploča poteći će vrlo kratkotrajna struja, kazaljka ampermetra će se opet na trenutak otkloniti.



Sl. 66. a) Sklopka je prekinuta, kondenzator se ne može nabiti, voltmetar pokazuje napon 0. b) Kad uklopimo sklopku, kondenzator se nabije, između ploča nastane el. polje. c) Kad približimo ploče, kondenzator se uz isti napon i dalje nabije; el. polje postane jače. d) Kad isključimo sklopku, kondenzator ostane nabijen. e) Preko otpornika i uklopljene sklopke kondenzator se začas izbije.

Ako sada sklopku isključimo, kondenzator ostane nabijen, elektrostatski voltmetar pokazuje isti napon kao i prije, kad je sklopka bila uklopljena. Kad je kondenzator nabijen, ampermetar ne pokazuje nikakav otklon ni pri isklapanju ni pri uklapanju, ako nema nikakvih drugih promjena. Ne teče dakle nikakva struja, naboji na pločama kondenzatora ostaju posve jednaki.

No ako izvor struje zamijenimo s otpornikom, pa onda uklopimo sklopku, kondenzator će se začas izbiti. Ampermetar će pokazati trenutačni otklon, ali ovaj put u protivnom smjeru, jer je smjer struje pri izbijanju suprotan onome pri nabijanju kondenzatora. Voltmetar će nakon toga pokazati, da više nema napona. Pozitivni i negativni naboji izjednačili su se preko otpornika i raspodijelili se svagdje jednoliko. Nigdje više nema viška pozitivne ili negativne elektrike, pa prema tome nema više nikakvih električkih pojava prema vani.

4.10. JAKOST ELEKTRIČNOG POLJA

Na pločasti kondenzator prema slici 66., kojemu je razmak između ploča 2 cm, priključimo izvor struje s naponom 100 V. Između ploča tog kondenzatora vlada jednoliko električno polje. Ako napon udvostručimo, jakost polja će se također udvostručiti, ako ga smanjimo na polovicu, i jakost polja će oslabiti na polovicu. No ako napon udvostručimo, a istovremeno udvostručimo i razmak između ploča, polje će ostati nepromijenjeno. To isto će biti, ako napon smanjimo na polovicu, ali ujedno smanjimo na polovicu i razmak između ploča. U prvom smo slučaju imali 100 V i 2 cm, u drugom 200 V i 4 cm, a u trećem 50 V i 1 cm. Omjer između volta i centimetara ostao je u sva tri slučaja jednak:

$$\frac{100}{2} = \frac{200}{4} = \frac{50}{1} = 50 \text{ volta po centimetru.}$$

Jakost električnog polja očito ovisi o ovom omjeru. Stoga se kao jedinica za jakost električnog polja može uzeti *volt po centimetru* (oznaka: V/cm). Jakost 1 V/cm ima polje između ploča kondenzatora, između kojih je napon 1 V, a razmak 1 cm. Međutim, budući da je osnovna jedinica za duljinu m (a ne cm), osnovna jedinica za jakost električnog polja je *volt po metru* (V/m). $1 \text{ V/m} = 0,01 \text{ V/cm}$.

Polje jakosti 1 V/m vrlo je slabo polje, pa i ono jakosti 1 V/cm još uvijek je razmjerno slabo polje. Kod današnjih kondenzatora polje između ploča iznosi i nekoliko desetaka hiljada volta po centimetru ili nekoliko kilovolta po milimetru (kV/mm).

Zadatak 78. Kolika je jakost polja između ploča kondenzatora, kod kojega je napon između ploča 500 (380; 100) V, a razmak između njih 0,1 mm (2 cm; 0,02 mm)?

4.11. DIELEKTRIČNA SVOJSTVA

Rekli smo, da je kapacitet kondenzatora to veći, što je veća površina njegovih ploča i što su one međusobno bliže. Na kapacitet nimalo ne utječe, od kakvog su materijala ploče kondenzatora. Uvjet je samo i jedino taj, da je taj materijal vodič, da nije izolator. Pa ipak kapacitet kondenzatora bitno ovisi još o nečemu: začudo — o vrsti izolacionog materijala, koji se nalazi između njegovih ploča. Ako se između ploča kondenzatora umjesto zraka nalazi papir, bit će njegov kapacitet oko 2 puta veći uz inače posve iste uvjete. Ako je taj papir impregniran kao kod izolacije kabela, bit će kapacitet čak oko 4 puta veći nego kod zraka, kod stakla i porculana 5 do 7 puta veći, kod tinjca 4—8 puta veći, i t. d.

Izolator između ploča kondenzatora najvažniji je njegov dio. On određuje, koliki se naboj može skupiti na pločama kondenzatora. On je ustvari nosilac električnog polja, a time i pojava, koje su vezane uz to polje.

Izolatori se u nauci nazivaju i *dielektrici*. Svojstva izolatora s obzirom na vladanje u električnom polju nazivaju se *dielektrična svojstva*.

Broj, koji pokazuje, koliko puta poraste kapacitet kondenzatora, kad se između njegovih ploča nalazi koji drugi izolator (dielektrik) umjesto zraka*, naziva se *relativna dielektričnost* (ili relativna dielektrična konstanta) tog izolatora (izolacionog materijala). Za izolatore, koji se normalno upotrebljavaju u tehnici jake struje, relativna dielektričnost se kreće od 1 do otprilike 12.

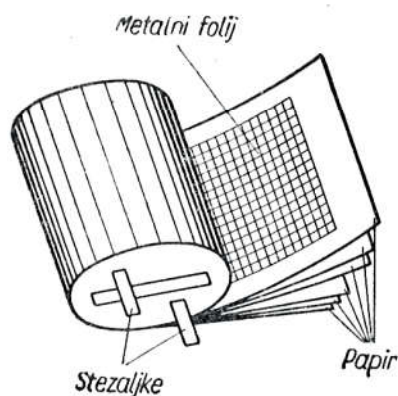
U najnovije vrijeme pronađene su keramičke mase, kojih je relativna dielektričnost 10 000 do 18 000. Glavni sastojak im je barijev i stroncijev titanat. Tvari s vrlo velikom relativnom dielektričnošću nazivaju se segnetoelektrične tvari, jer je prva takva tvar, koja je pronađena, bila Segnetova sol. Takve su tvari važne u visokofrekventnoj tehnici.

Izvanredno važno dielektrično svojstvo izolatora je njihova dielektrična čvrstoća. *Dielektrična čvrstoća je ona jakost električnog polja koju izolator više ne može izdržati te kod koje bude probijen.* Ako, na pr., napon između ploča nekog kondenzatora sve više povišujemo, električno polje između ploča sve više raste te sve više napreže izolator. Konačno ćemo doći do nekog napona, koji izolator više ne će izdržati. Kroz izolator će odjedamput probiti struja, *električna iskra*. Probijeni izolator, ako je krutina, oštećen je na mjestu proboja, te ne može više služiti kao izolator.

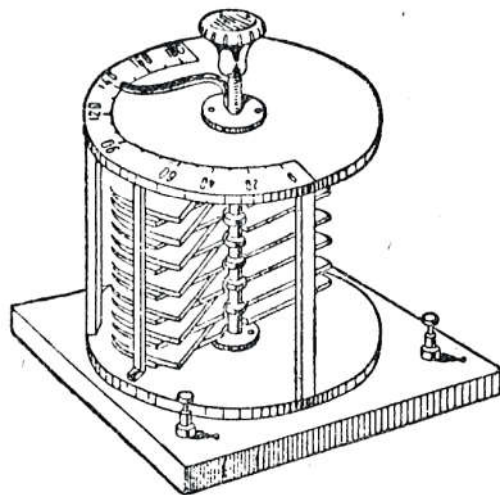
* Točnije: umjesto vakuuma (zrakopraznog prostora). No dielektrična konstanta zraka samo se neznatno razlikuje od dielektrične konstante vakuuma.

Dielektrična čvrstoća mnogo ovisi o trajanju naprezanja, načinu povišavanja napona, obliku elektroda, a prije svega o debljini sloja. Što je sloj tanji, to je njegova dielektrična čvrstoća veća, t. j. više kilovolta može izolator izdržati po milimetru. Na pr. sloj porculana debeo 1 mm probije se kod oko 25 kV/mm, a debeo 10 mm kod oko 20 kV/mm.

Da se dobije veliki kapacitet kondenzatora, a da njihova veličina bude što manja, upotrebljavaju se kao izolatori takvi materijali, koji imaju veliku dielektričnu konstantu i veliku pržbojnu čvrstoću. Kondenzator nipošto ne mora imati ploče kao na slikama 65. i 66. On može biti građen i tako, kako je pokazano na slici 67. Kao izolator služi kod tog kondenzatora nekoliko



Sl. 67. Kondenzatori velikog kapaciteta ponajviše su građeni od vrlo tankih slojeva papira i još tanjih aluminijskih listića (folija).



Sl. 68. Zakretni kondenzator.

listova vrlo tankog* impregniranog papira, a umjesto metalnih ploča dolaze dva izvanredno tanka lista od aluminijske debljine oko jedne stotinke milimetra! Na taj se način mogu dobiti kondenzatori od oko 2 μF , koji su teški svega oko 10 dekgama. Kapacitet 2 μF imala bi inače kugla sa promjerom 36 kilometara!

Pa i današnji veliki kondenzatori, koji se upotrebljavaju u električnim mrežama, grade se općenito tako, da se umjesto metalnih ploča uzmu vrlo tanki aluminijski listići, a kao izolacija služi nekoliko slojeva specijalnog, također vrlo tankog papira impregniranog mineralnim uljem.

Vrlo važno dielektrično svojstvo jesu *dielektrični gubici*, no o njima ćemo govoriti kasnije.

4.12. SPAJANJE I UPOTREBA KONDENZATORA

Kondenzatore možemo spajati paralelno, prema slici 69., i u seriju, prema slici 70.

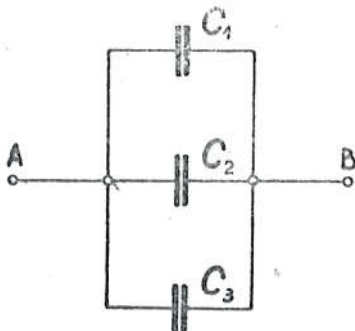
Kod paralelno spojenih kondenzatora ukupni kapacitet jednak je zbroju kapaciteta pojedinih kondenzatora.

* Debljine na pr. 0,01 do 0,05 mm.

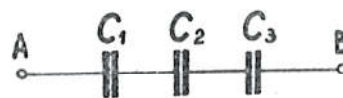
Ukupni kapacitet paralelno spojenih kondenzatora dobijemo iz formule:

$$\boxed{C = C_1 + C_2 + C_3 + \dots} \quad \text{za paralelni spoj}$$

U seriju se kondenzatori spajaju zato, da se smanji napon između njihovih ploča. Ako imamo, na primjer, kondenzatore za 110 V, a hoćemo ih priključiti na napon 220 V, treba dva kondenzatora za 110 V spojiti u seriju.



Sl. 69. Paralelni spoj kondenzatora.



Sl. 70. Serijski spoj kondenzatora.

Na to se može učiniti samo onda, ako je kapacitet tih kondenzatora jednak, jer se inače ukupni napon 220 V ne raspodjeljuje na oba kondenzatora jednako. Ukupni kapacitet u seriju spojenih kondenzatora dobijemo iz formule:

$$\boxed{\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots} \quad \text{za serijski spoj}$$

Kondenzatori su — kako smo vidjeli — u neku ruku spremnici električnog naboja. Količina elektrike, međutim, koju oni mogu spremiti vrlo je mala: kod velikih kondenzatora ona iznosi tek oko 1 As. Veliki bi dakle kondenzatori mogli davati razmjerno malu struju 1 A svega za vrijeme jedne sekunde. Kondenzatori stoga ne dolaze u obzir kao izvori električne struje. Uopće, električni naboji, koji se nalaze skupljeni na bilo kojem mjestu, ne mogu davati iole trajniju struju. Pa čak i tako velike količine elektrike, kakve nastaju u atmosferi za lošeg vremena, a koje se očituju u obliku munje, ne dolaze u obzir u svrhu praktičnog iskorišćivanja. Struja je kod munje dođuše ogromna (čak do 300 000 A), ali njezino trajanje iznosi svega mali dio sekunde.

Kondenzatori imaju vrlo veliku važnost kod izmjenične struje, pa ćemo se tamo još na njih vratiti.

Zadatak 79. 3 kondenzatora kapaciteta $C_1 = 0,4 \mu\text{F}$ ($1,2 \mu\text{F}$; 350 pF), $C_2 = 0,7 \mu\text{F}$ ($1,5 \mu\text{F}$; 100 pF) i $C_3 = 0,2 \mu\text{F}$ ($0,8 \mu\text{F}$; 220 pF) spojena su paralelno kao na slici 69. Koliki je ukupni kapacitet?

Zadatak 80. Koliki bi bio ukupni kapacitet, ako bi tri kondenzatora iz prethodnog zadatka bila spojena u seriju?

Zadatak 81. Kako bismo se ispomogli, ako bismo trebali kondenzator od $30 \mu\text{F}$ ($400 \mu\text{F}$; 120 pF) i 220 V , a imali bismo samo kondenzatore od $10 \mu\text{F}$ ($80 \mu\text{F}$; 20 pF) za 220 V ?

Zadatak 82. Kako bismo se ispomogli, ako bismo trebali kondenzator od 500 (40 ; 140) μF za 500 V , a raspolagali bismo samo sa kondenzatorima od 250 (10 ; 70) μF za 100 (250 ; 250) V ?

Zadatak 83. Kapacitet kondenzatora prema slici 68. može se mijenjati tako, da se pomoću dugmeta zakreću pomične polukružne pločice, koje su smještene na osovinu. Odgovori na ova pitanja:

- a) Zašto kondenzator ima nekoliko pločica?
- b) Kad je njegov kapacitet najveći, a kad najmanji?
- c) Da li bi se kapacitet ovog kondenzatora promijenio, ako bismo ga zaronili u transformatorsko ulje?

5. PRIMJENE KEMIJSKOG DJELOVANJA STRUJE

5.1. ELEKTROLIZA

Elektroliza je rastvaranje pojedinih kemijskih spojeva na njihove sastavne dijelove pod utjecajem električne struje. Elektrolizom se dakle mogu rastvoriti samo složena tijela i samo ona, koja provode električnu struju. Metali, kao što su bakar, aluminij, cink, željezo i dr. provode dobro električnu struju, ali ih struja ne može rastvoriti, jer oni spadaju među osnovne tvari, elemente, a nisu kemijski spojevi. Obratno, na pr. posve čista voda, razna ulja i mnoge druge tvari ne spadaju među osnovne tvari, pa ipak ih električna struja ne rastvara; te tvari naime električnu struju ne provode.

Već smo prije spomenuli, da vodu možemo učiniti vodljivom dodatkom male količine kakve soli ili kiseline. Tada struja može teći kroz vodu te je rastvara na vodik i kisik.

Tekućina, kroz koju struja teče kod elektrolize, te u kojoj se zbivaju kemijske promjene, naziva se *elektrolit*. Sastav elektrolita je od odlučne važnosti za tehničku provedbu elektrolize. Struja u elektrolit ulazi na *anodi*, a izlazi na *katodi*. Anoda i katoda zovu se *elektrode*.

Ako električna struja i ne rastvara metale kao osnovne kemijske tvari, jer su oni jedinstveni, te se ne mogu razlučiti na neke druge tvari, ona metale izlučuje iz njihovih spojeva. Spomenuli smo već prije (a taj je pokus prikazan i na slici 4.), da električna struja izlučuje bakar iz rastopine modre galice. Kemijski spojevi metala građeni poput modre galice nazivaju se *metalne soli*. Električna struja izlučuje metale iz metalnih soli. Metal se pritom uvijek skuplja na katodi (Kovina Ka Katodi). Na taj se način mogu dobiti izvanredno čisti metali.

5.2. FARADAYEVI ZAKONI

Količina izlučenog metala ili druge tvari, koja se dobiva elektrolizom, to je veća, što je struja jača i što ona dulje teče. Uz dvaput jaču struju bit će količina izlučene tvari dvaput veća. Ako struja teče dvaput dulje, bit će količina izlučene tvari također dvaput veća. Dakle, *količina izlučene tvari iz nekog elektrolita razmjerna je s količinom elektrike, koja proteče kroz elektrolit*. Ovaj se prirodni zakon naziva *1. Faradayev zakon**.

Količina elektrike potrebna za izlučivanje neke količine tvari nije jednaka kod svih tvari. Tako na pr. 1 Ah (ampersat) izlučuje 1,18 g bakra, 1,09 g niklja, 4,03 g srebra, 2,45 g zlata i t. d. Količina tvari, koja se izluči iz nekog elektrolita, dok kroz elektrolit proteče količina elektrike 1 Ah, naziva

* Faraday (čitaj: Feredej) — čuveni engleski fizičar.

se elektrokemijski ekvivalent. Faraday je pokazao, da jednaka struja izlučuje iz različitih elektrolita količine tvari proporcijalne elektrokemijskim ekvivalentima tih tvari, koji se mogu unaprijed izračunati iz poznatih svojstava tvari. Ovo je 2. Faradayev zakon.

Sažeto možemo reći: Količina izlučene tvari razmjerna je elektrokemijskom ekvivalentu te tvari i količini elektrike. Matematički se to može izraziti formulom:

$$m = aQ = aIt,$$

gdje je: m — količina (masa) izlučene tvari u gramima, a — elektrokemijski ekvivalent te tvari u g/Ah, Q — količina elektrike, što je prošla kroz elektrolit, u Ah, I — stalna struja u amperima, koja je kroz elektrolit tekla t sati.

20. primjer. Koliko će se bakra izlučiti iz rastopine modre galice za 24 sata, ako kroz rastopinu teče struja 100 A?

Rješenje: Za bakar je $a = 1,18$ g/Ah, pa dobijemo:

$$m = aIt = 1,18 \cdot 100 \cdot 24 = 2832 \text{ g} = 2,83 \text{ kg}.$$

5.3. GALVANOTEHNIKA

Pomoću elektrolize možemo pojedine metale prevući drugim metalima. Tako možemo neki predmet pobakriti, ponikljati, pocinčati, kromirati, kadmizirati, pokositriti, posrebriti, pozlatiti i t. d. Predmet, koji želimo pobakriti, ponikljati i t. d., treba zavjesiti kao katodu u prikladnu »kupku«, t. j. u prikladnu rastopinu soli bakra, niklja, odnosno onog metala, kojim predmet prevlačimo. Anoda mora biti od istog metala, dakle bakra, niklja i t. d., a može biti i od takvog materijala, koji se u dotičnoj kupki ne rastvara. U prvom slučaju dolazi na anodi do kemijskih procesa između metala anode i kupke. Anoda se pomalo otapa u kupki. Na katodi se događa obratno: metal iz kupke se na njoj izlučuje. Metal kod ovakvog postupka prelazi pomalo s anode na katodu (Kovina Ka Katodi) te je prevlači. U drugom slučaju treba kod duljeg postupka od vremena do vremena osvježiti kupku dodavajući joj potrebni materijal, jer se metal, koji se izlučuje na katodi, izlučuje iz kupke, pa bi se kupka nakon nekog vremena iscrpla.

Takvo prevlačenje predmeta tankim slojem nekog metala naziva se galvanostegija. Ona ima zaštitnu ili ukrasnu svrhu. Elektrolitičko bakrenje, cinčanje, kadmiziranje i kositrenje ima uglavnom zaštitnu svrhu. Cinčanjem ili kadmiziranjem štiti se na pr. željezo od rđanja. Kromiranje i nikljanje može služiti za zaštitu i za ukras. Pozlaćuju i posrebruju se predmeti uglavnom samo za ukras.

Za prevlačenje predmeta pojedinim metalima postoje različiti postupci, kojih se kod rada treba točno pridržavati. Osobito su važni sastav i čistoća kupke te gustoća struje. Za prevlačenje pojedinim metalima ima vrlo različitih postupaka; tako na pr. za nikljanje ima vrlo različitih kupki. U kupku se često dodaju i neke primjese, koje smanjuju njezin otpor. Vrlo je važno, da kupka ima što manji otpor, jer je to manji napon potreban na elektrodama, a time je postupak ekonomičniji. Napon između elektroda pojedine kupke iznosi od dijela jednog volta do 6 volta. Kod industrijske galvanostegije redovito se nekoliko kupki spaja u seriju.

Galvanostegija se može primijeniti i kod predmeta, koji nisu od metala. Treba samo njihovu površinu učiniti vodljivom, a to se može učiniti na taj način, da takav predmet premažemo grafitom.

Pomoću elektrolize mogu se praviti reprodukcije pojedinih predmeta. Pomoću voska, gutaperče ili gipsa treba snimiti negativ tog predmeta, pa ga učiniti vodljivim grafitnim premazom. U elektrolitskoj kupki na takav se negativ

taloži metal, pa se stvara pozitiv, t. j. vjerna kopija originalnog predmeta. Većinom se za takve kopije upotrebljava bakar, koji se onda može prevući kojim drugim metalom. Ovakvo pravljenje reprodukcija pomoću elektrolize naziva se *galvano-plastika*.

Zadatak 84. Neki predmet površine 4 (2,5; 6) dm² treba ponikljati tako, da debljina nikalnog sloja bude 0,01 (0,015; 0,02) mm. Za odabranu kupku gustoća struje neka bude 0,5 (0,3; 1,2) A/dm². 1 Ah izlučuje iz elektrolita 1,09 g niklja. Koliko Ah treba za ponikljanje tog predmeta? Kolika treba da bude struja? Kako dugo traje nikljanje? (Specifična težina niklja iznosi 8,9 g/cm³.)

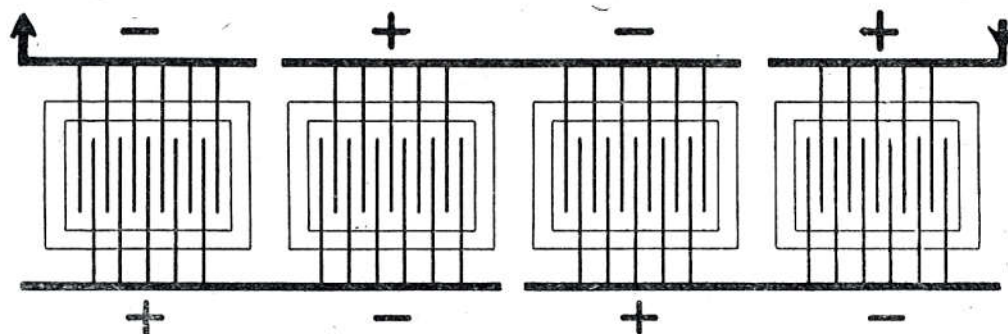
Zadatak 85. Da se predmet površine 5,4 (3,7; 18,3) dm² pobakri, treba ga prevući prevlakom bakra debljine 0,02 mm. Specifična težina bakra iznosi 8,9 g/cm³, a 1 Ah izlučuje 1,18 g bakra. Struja pri bakrenju treba da iznosi 0,4 A po dm². Koliko grama bakra treba za pobakrenje tog predmeta? Koliko je potrebno Ah? Kolika treba da bude struja? Kako dugo traje bakrenje?

5.4. DOBIVANJE I ČIŠĆENJE METALA U ELEKTROLITSKIM KUPKAMA

Dobivanje i čišćenje metala u elektrolitskim kupkama u načelu je vrlo slično postupku kod galvanostegije.

Elektrolitsko čišćenje (rafinacija) metala najviše se primjenjuje kod bakra, niklja, srebra i zlata. Ono je naročito važno kod bakra, pa ćemo ga ukratko opisati.

U istoj kupki spoji se paralelno nekoliko anoda i katoda (slika 71.). Kao katode upotrebljavaju se tanki limovi od posve čistog bakra. Kao anode uzimaju se debele lijevane ploče od sirovog talioničkog bakra, u kojem ima 1—2% raznih primjesa. Kao elektrolit služi rastopina modre galice, koja sadrži slobodne sumporne kiseline. Pod utjecajem električne struje zbiva se ovdje, samo u mnogo većem razmjeru, onaj isti proces, koji smo opisali kod galvanostegije. Bakar se na anodama spaja s elektrolitom i otapa se u njemu, dok se na katodama bakar iz elektrolita izlučuje. No na katodama se izlučuje gotovo sasvim čisti bakar, dok se različite primjese talože na dno. Bakar dakle s anoda pomalo prelazi na katode. Tako se elektrolizom dobiva bakar, koji je 99,93—99,95% čist. Takav nam je bakar potreban osobito za vodiče električnih vodova, strojeva i transformatora, jer već i neznatne primjese drugih tvari znatno pogoršavaju njegovu vodljivost.



Sl. 71. Elektrolitske kupke za čišćenje (rafinaciju) bakra. Svaka kupka sadrži mnogo paralelno spojenih elektroda. Nekoliko je kupki spojeno u seriju.

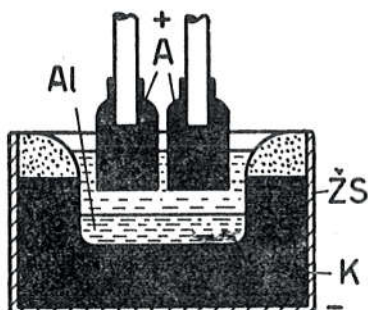
Kod različitih uređaja teče u kupkama ogromna struja od nekoliko hiljada ampera. No kako je otpor elektrolita neznatan zbog velikog presjeka, kroz koji struja između ploča teče, potreban je između elektroda vrlo mali napon od svega nekih 0,1 do 0,3 V. Stoga se mnogo kupki spaja u seriju, kao što je to shematski naznačeno na slici 71.

Kod drugih metala postupak je sličan. Princip je uvijek taj, da su anode od metala, koji treba pročistiti, elektrolit je rastopina soli tog metala, a kao katoda služe tanki limovi čistog metala. Pod utjecajem električne struje metal s anode prelazi na katodu.

Neki metali, naročito bakar i cink, mogu se elektrolizom dobiti iz svojih ruda. Katode su opet od dotičnog metala, kao elektrolit služi ruda uz neke primjese, dok su anode od takvog materijala, koji se u dotičnom elektrolitu pri prolazu struje ne rastvara. Metal iz elektrolita izlučuje se na katodama.

5.5. DOBIVANJE METALA U ELEKTROLITSKIM PEĆIMA

Najvažnije elektrolitske peći su one za dobivanje aluminija. Shematski presjek ovakve peći prikazan je na slici 72. Aluminij se u tim pećima dobiva iz glinice (aluminijeva oksida), koja se opet raznim kemijskim postupcima dobiva iz boksita. Kao katoda služi željezni sanduk ŽS, koji je obložen pečenom smjesom koksa i katrana K. Anoda (jedna ili više njih) napravljena je od čistog koksa, prešanog u blok uz dodatak pakline i katrana, koji se onda peče pri visokoj temperaturi. Anoda je zamočena u elektrolit, koji je u rastaljenom stanju zbog visoke temperature nastale protjecanjem struje. U elektrolitu je glinica rastopljena u kriolitu. Elektrolizom se aluminij izlučuje iz glinice te taloži na dnu posude, na katodi. Rastaljeni kriolit s rastopinom glinice pliva iznad tekućeg aluminija, jer je od njega lakši.



Sl. 72. Elektrolitska peć za dobivanje aluminija.
ŽS - željezni sanduk, K - pečena smjesa koksa i katrana, A - anode,
Al - rastaljeni aluminij.

Pri stavljanju peći u pogon stave se između anode i katode tanki ugljeni štapići, koji se, čim poteče struja, jako užare, pa rastale kriolit. Nakon toga se oni odstrane, pa započinje elektroliza. Visoku temperaturu peći održava vrlo jaka struja, koja, već prema veličini peći, iznosi 10 000 pa sve do 150 000 A. Napon između elektroda iznosi svega 5 do 6 volta.

Kad se jednom stave u pogon, ovakve peći rade neprestano nekoliko mjeseci. Tekući aluminij ispušta se iz peći u određenim razmacima, u pravilu svakih 48 sati.

Pomoću elektrolitskih peći dobivaju se još magnezij, berilij, cer, natrij i kalcij.

5.6. GALVANSKI ELEMENTI (ČLANCI)

Rekli smo, da se voda protjecanjem električne struje daje razlučiti na svoje sastavne elemente vodik i kisik. U tu svrhu treba vodi dodati nešto soli ili kiseline da postane vodljiva, pa utaknuti u nju dva metalna štapa te ih priključiti na neki izvor struje. Ta dva štapa mogu biti od makar kakvog metala, do elektrolize vode će uvijek doći, pa će se na jednoj elektrodi skupljati vodik, a na drugoj kisik. Kod toga se vodik uvijek giba sa strujom (kao i kovine), pa se prema tome skuplja na katodi.

Utaknimo sada u neku posudu s vodom, u koju smo usuli nešto sumporne kiseline, štap od bakra i štap od cinka, ali ih nemojmo spojiti s nekim izvorom struje, već na ta 2 štapa priključimo naprosto voltmetar, slika 73. Očekivali bismo, da voltmetar ne će pokazivati nikakav otklon, jer nema — čini se — izvora struje, pa ne može biti ni napona. Začudo, voltmetar će pokazivati napon 1 V! To znači, da kroz voltmetar teče električna struja!

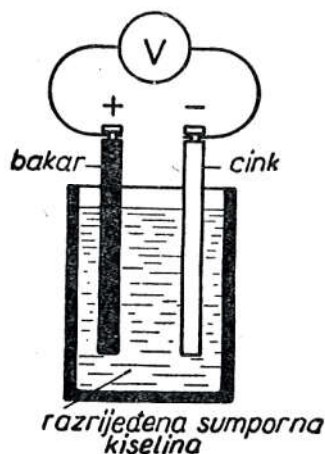
Takva kombinacija metal — elektrolit — metal naziva se *galvanski element*, u čast talijanskog liječnika Galvaniju, koji je pred više od 160 godina prvi primijetio, da na taj način nastaju neke električne pojave. Za postanak galvanskog elementa je uvjet, da su metali elektroda različiti, te da je tekućina (elektrolit) vodljiva. Ta tekućina može biti koja kiselina, lužina ili rastopina soli. Napon, koji daje takav galvanski element, ovisi o vrsti metala elektroda te o sastavu elektrolita.

Galvanski element prema slici 73., koji se sastoji od bakrene i cinkove elektrode te od razrijeđene sumporne kiseline kao elektrolita, prvi je element, koji je otkriven, a načinio ga je talijanski fizičar Volta.

Kako nastaje napon u galvanskom elementu? Pod utjecajem izvjesnih sila elektrolit se razlučuje u svoje sastavne elemente, od kojih jedni imaju pozitivan, a drugi negativan naboj. Voda u elektrolitu na slici 73. razlučuje se na vodik i kisik. Čestice vodika imaju pozitivan naboj, čestice kisika negativan naboj. Cink privlači negativne čestice, čestice kisika, pa se one skupljaju na cinkovoj elektrodi, dok se na bakrenoj elektrodi skupljaju pozitivne čestice, čestice vodika. Na taj način bakrena elektroda poprima pozitivan naboj, a cinkova elektroda negativan naboj. Ovi raznovrsni naboji teže za izjednačenjem, a posljedica je toga — kako znamo — električni napon. U galvanskom elementu kao da postoji neka sila, koja nastoji, da sitne čestice elektrike pokrene u određenom smjeru. Tu silu nazivamo elektromotornom silom.

Kao i kod elektrolitskih kupki tako i kod galvanskih elemenata pozitivnu elektrodu nazivamo anodom, a negativnu katodom.

Pozitivna je elektroda uvijek ona, koja ima veći potencijal, t. j. veći napon prema zemlji. Prema tome je smjer napona uvijek od pozitivne elektrode, anode, prema negativnoj elektrodi, katodi. Taj napon nastoji proizvesti i struju od anode prema katodi. Ako je strujni krug zatvoren, teče u vanjskom dijelu strujnog kruga struja od anode prema katodi: struja na anodi izlazi iz elementa, a na katodi ulazi u element. Kod elektrolitskih kupki napon između anode i katode uzrokuje struju kroz elektrolit — opet od anode prema katodi. No tamo struja na anodi ulazi u kupku, a na katodi izlazi iz nje.



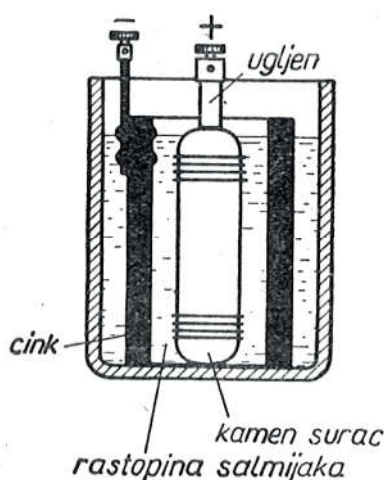
Sl. 73. Voltin element — prvi element uopće, neupotrebljiv zbog nestalnog napona.

Općenito i uvijek anoda je elektroda višeg potencijala.

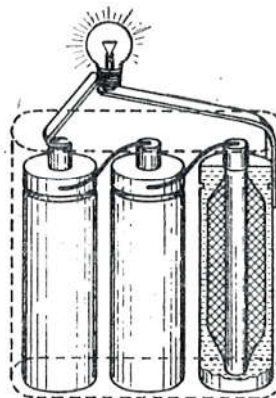
I kod galvanskih elemenata nastaje elektroliza, jer i kod njih struja teče kroz tekućinu (elektrolit), pa je rastvara. Stoga galvanski elementi ne mogu struju davati trajno, ma kako dugo vremena, jer se nakon nekog vremena elektrolit protjecanjem struje rastvori, te element više ne daje napon, a prema tome ni struju. Poželjno je, da element daje struju što dulje, te da mu napon pritom bude što stalniji. Stoga se danas Voltin element prema slici 73. više ne upotrebljava, jer se njegov napon pri opterećenju naglo smanjuje. Na anodi se naime skuplja, kao što smo rekli, vodik, pa on tvori sitne mjehuriće, koji sprečavaju protjecanje struje. Ova se pojava zove *polarizacija*. Stoga je trebalo naći način, da se ova polarizacija ukloni. To je postignuto time, da se oko anode stavi masa, koja se ke-

mijski spaja s tim vodikom, pa na taj način sprečava stvaranje mjehurića. Budući da ova masa sprečava polarizaciju, naziva se *depolarizator*.

Galvanski element, koji se danas najviše upotrebljava, jest *salmijakov* ili *Léclanchéov* (čitaj: Leklanšeov) *element* (slika 74.) Anoda tog elementa je ugljeni štap, oko tog štapa se u lanenoj kesici nalazi surac, koji služi kao depolarizator, a kao katoda služi šuplji valjak od cinka. Elektrolit je rastopina salmijaka, pa odatle i ime tom elementu. Ovaj element daje dosta dugo stalni napon 1.5 V.



Sl. 74. Salmijakov ili Léclanchéov element. Kao depolarizator služi surac.



Sl. 75. Džepna baterija: serijski spoj triju suhih salmijakovih elemenata.

Galvanski elementi naših džepnih baterija također nisu drugo nego salmijakovi elementi, jedino što kao katoda služi sama posuda elementa, koja je od cinka, a osim toga je izvjesnim dodacima postignuto, da se elektrolit zgusnuo. Stoga se takvi elementi nazivaju *suhi elementi*. U plosnatoj džepnoj bateriji nalaze se 3 takva suha elementa spojena u seriju, t. j. tako, da se njihovi naponi zbrajaju (slika 75.). Takva baterija daje dakle napon $3 \times 1,5 = 4,5$ V.

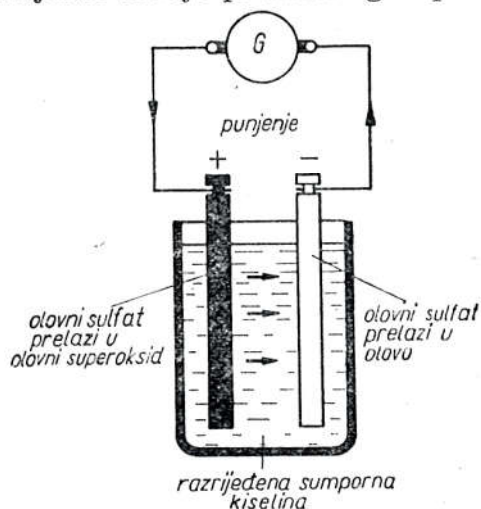
Galvanski elementi bili su nekad jedini izvori električne struje. Danas su oni na svojoj važnosti mnogo izgubili, jer danas kao izvori električne struje mnogo više služe električni strojevi. Galvanski elementi služe danas za dobivanje slabih struja, na pr. za sitne sijalice džepnih baterija, za električna zvonca, za radioaparate (gdje nije provedena elektrifikacija) i t. d.

5.7. OLOVNI AKUMULATORI

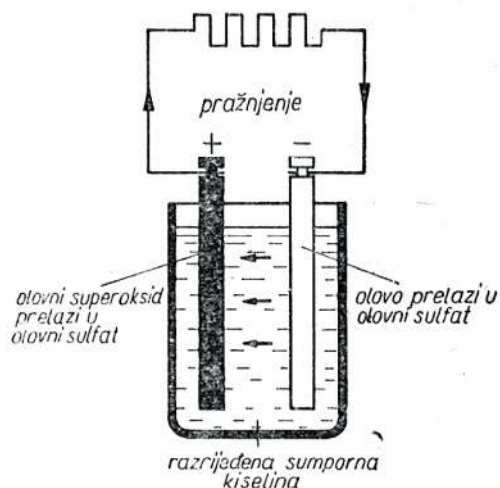
Ako u neku posudu, u kojoj se nalazi razrijeđena sumporna kiselina, uronimo dvije ploče kao dvije elektrode, i to jednu od olova, a drugu od olovnog superoksida, nastat će galvanski element (slika 76.a). Pritom će elektroda od olovnog superoksida biti anoda, a elektroda od olova katoda. Napon između anode i katode iznosi kod ovakvog elementa oko 2 V.

Kad element daje električnu struju, dolazi u njemu, kao i u svakom elementu, do kemijskih promjena. Na obje se elektrode postepeno stvara olovni sulfat. Nakon nekog vremena obje će elektrode biti potpuno pokrivene olovnim sulfatom, obje će dakle biti posve jednake. A između jednakih elektroda ne može postojati napon. Kad do toga dođe, element je posve iscrpen.

No priključimo na takav element, i to prije nego je posve iscrpen, kad je njegov napon spao na oko 1,83 V, neki izvor istosmjerne struje. Učinimo to tako, da na dotadašnji plus-pol (anodu) spojimo plus-pol izvora struje, a na dotadašnji minus-pol (katodu), da spojimo minus-pol izvora struje (slika 76.a). Struja će sad teći kroz element u obratnom smjeru od onoga, kojim je tekla, kad je element sam davao struju. Nakon nekog vremena, kad element otklopimo od izvora struje, pokazat će se, da se element vratio potpuno u prijašnje stanje, njegov je napon porastao natrag na 2 V i on može opet davati struju kao i prije. To možemo ponoviti kolikogod hoćemo puta. Kad god se element iscrpi do 1,83 V*, možemo ga ponovo osvježiti priključkom na izvor istosmjerne struje prikladnog napona.



Sl. 76 a. Punjenje praznog olovnog akumulatora. Napon raste od oko 1,83 V do kojih 2,7 V. Gustoća elektrolita se pri punjenju povećava.



Sl. 76 b. Pražnjenje punog olovnog akumulatora. Srednji napon pražnjenja približno 2 V. Prazniti se smije samo, dok napon ne spadne na oko 1,83 V. Gustoća elektrolita se pri pražnjenju smanjuje.

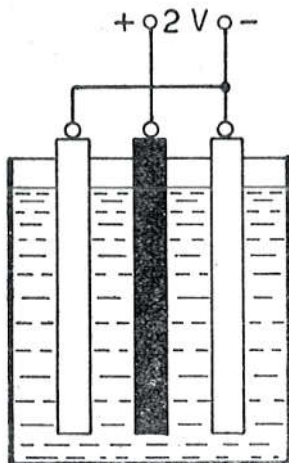
Takav element može dakle davati struju uvijek ponovo, nakon što ga osvježimo. U nj kao da možemo spremati, nagomilati ili — kao što se to još kaže — akumulirati izvjesnu količinu elektrike, koju onda možemo po potrebi iz takvog elementa opet izvući. Stoga se takav element naziva *akumulator*. Kad akumulator priključimo na izvor struje kao na slici 76.a, pa struja tog izvora teče kroz akumulator, kažemo, da se akumulator puni. A kad akumulator sam daje struju, kao na slici 76.b, kažemo, da se akumulator prazni. Akumulator se može, ako se s njim ispravno postupa, vrlo mnogo puta puniti i prazniti. Akumulator prema slikama 76. a i b, s olovnim pločama, naziva se *olovni akumulator*.

Akumulator može, već prema svojoj veličini i građi, akumulirati veću ili manju količinu elektrike. Količina elektrike, koju akumulator može akumulirati, naziva se *kapacitet akumulatora*. On se mjeri u ampersatima (Ah).

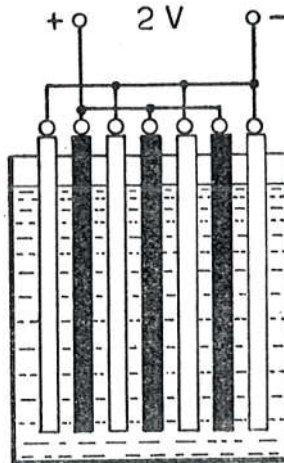
Olovni akumulatori najviše se upotrebljavaju. Njihova je izvedba ipak znatno različita od one na slikama 76. a i b. Osnova za rad akumulatora jesu kemijske promjene, koje se zbivaju na njegovim pločama. Te se kemijske promjene zbivaju, međutim, samo na površini ploča, pa količina elektrike, koju akumulator može akumulirati, ovisi o površini ploča. Ako su ploče glatke,

* Pri pražnjenju za vrijeme 3 do 10 sati. Prazni li se akumulator dulje od 10 sati, neka napon ne spadne ispod 1,9 V. Pri vrlo kratkotrajnom pražnjenju od 1 do 2 sata smije napon spasti i do 1,78 V (pa i do 1,75 V).

ta je površina razmjerno mala, pa bi kapacitet takvih akumulatora bio malen. Stoga se umjetnim načinom povećava površina ploča, i to tako, da se one izrađuje s mnogobrojnim sitnim rebrima, ili tako (kao što se danas normalno čini), da su olovne ploče izrađene kao rešetke, a rupe rešetke da su ispunjene poroznom (šupljikavom) masom.

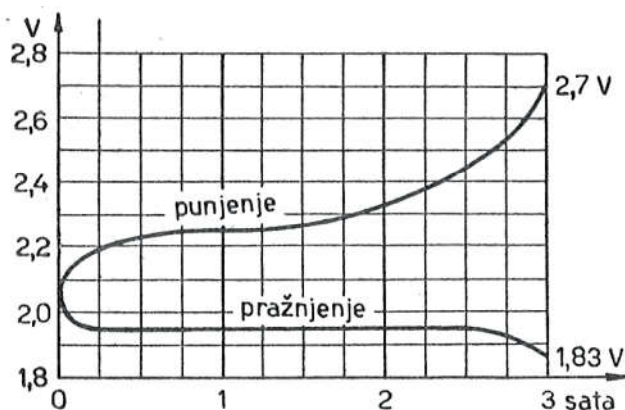


Sl. 77 a. Pozitivna ploča olovnih akumulatora mora uvijek biti između dvije negativne.



Sl. 77 b. Akumulatorska baterija s nekoliko ploča (u svrhu povećanja kapaciteta). Kod olovnih akumulatora broj negativnih ploča uvijek za 1 veći od broja pozitivnih.

Još je nešto svakako potrebno kod praktične izvedbe akumulatora. Ako bismo imali samo 2 ploče, pozitivnu i negativnu kao na slikama 76. a i b, kemijske promjene bi se zbivale samo s unutarne strane pozitivne ploče. Zbog toga bi se ta ploča pri punjenju akumulatora svinula. Da se to spriječi, stavlja se pozitivna ploča uvijek između 2 negativne (slike 77. a i b).



Sl. 78. Grafički prikaz napona pri punjenju i pražnjenju olovnih akumulatora.

na kraju punjenja oko 2,7 V. Punjenje je završeno, kad kiselina oko ploča počne »kipjeti«, a to nastaje stoga, što se na elektrodama stvaraju plinovi vodik i kisik, pa njihovi mjehurići uzburkaju kiselinu.

Napon je pri pražnjenju olovnih akumulatora približno stalan te iznosi prosječno 1,95 V (slika 78.). Na samom početku pražnjenja napon iznosi 2,1 V, ali ubrzo spadne na 1,95 V. Tek pri kraju pražnjenja napon počinje opet opadati, a kad je spao na 1,83 V, treba pražnjenje prekinuti, jer će se inače akumulator oštetiti i ne će se više moći punjenjem posve osvježiti.

Pri punjenju olovnih akumulatora napon iznosi na početku oko 2,1 V, za vrijeme punjenja iznosi prosječno 2,2 do 2,4 V, a

Zbog kemijskih promjena, koje nastaju u kiselini, raste za vrijeme punjenja gustoća kiseline, a za vrijeme pražnjenja opada. Iz mjerenja gustoće kiseline može se zaključiti, koliko se akumulator napunio, odnosno ispraznio.

Ni struja punjenja ni struja pražnjenja ne smiju prijeći izvjesnu granicu određenu veličinom akumulatora, jer inače postoji opasnost, da akumulator bude oštećen.

Akumulator ne može dati veću količinu elektrike, nego što ju je primio. Dobar olovni akumulator daje do 90% od one količine elektrike, koja je potrošena za njegovo punjenje.

Kapacitet akumulatora, t. j. broj ampersati, što ih akumulator može dati pri pražnjenju, ovisi o jakosti struje pražnjenja. On je veći kod manjih struja pražnjenja, a manji kod većih struja pražnjenja. Kapacitet se obično naznačuje za pražnjenje u trajanju od 3 ili 10 sati. Ako taj kapacitet za pražnjenje od 10 sati obilježimo sa 100%, onda kapacitet olovnih akumulatora, za druga trajanja pražnjenja, iznosi približno:

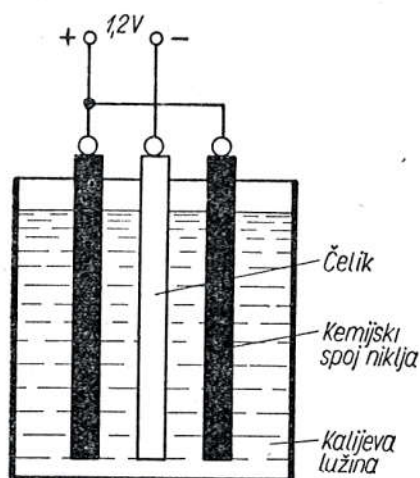
za trajanje pražnjenja	1 sat	52%,
" " "	2 sata	67%,
" " "	3 sata	75%,
" " "	5 sati	86%,
" " "	7½ sati	95%,
" " "	10 sati	100%,
" " "	20 sati	115%.

21. primjer. Koliko ampersati može dati neki akumulator pri pražnjenju strujom 50 A, ako mu je kapacitet pri desetsatnom pražnjenju 180 Ah?

Rješenje: $180 \text{ Ah} : 50 \text{ A} = 3,6$ sati pražnjenja. Pri trosatnom pražnjenju kapacitet se smanjuje na 75%, a pri petsatnom na 86%, pa će pri pražnjenju od 3,6 sati iznositi približno 78% kapaciteta pri 10-satnom pražnjenju, t. j. $180 \cdot 0,78 = 140 \text{ Ah}$.

Nekoliko akumulatora spojenih zajedno u seriju nazivaju se akumulatorska baterija. Na taj se način mogu dobiti viši naponi. Kod većih uređaja spaja se u seriju i preko stotinu akumulatora, pa možemo dobiti napon 220 V, pa i više.

5.8. ALKALIJSKI AKUMULATORI



Sl. 79. Alkalijski akumulator. Kod ovih akumulatora mora negativna ploča biti između dvije pozitivne.

Osim olovnih akumulatora dosta se upotrebljavaju i alkalijski akumulatori. Ovi se akumulatori nazivaju alkalijskim po tome, što je elektrolit u njima neka alkalijska rastopina, obično rastopina kalijeve lužine u destiliranoj vodi. Pozitivna ploča ovih akumulatora je kemijski spoj niklja, dok se za negativne ploče upotrebljava ili čelik ili kadmij. Alkalijski akumulatori s negativnim pločama od čelika zovu se i Edisonovi akumulatori prema američkom izumitelju Edisonu, koji je prvi pronašao praktički upotrebljivi alkalijski akumulator. Ovi akumulatori moraju imati, obratno od olovnih akumulatora, sa svake strane negativne ploče po jednu pozitivnu (slika 79.).

I kod alkalijskih akumulatora nastaju na elektrodama pri punjenju neke kemijske promjene, koje omogućuju, da akumulator može nakon punjenja sam davati struju. Napon punjenja ovih akumulatora iznosi oko 1,0 V na početku, a oko 1,7 V na kraju punjenja. Napon pražnjenja iznosi prosječno 1,2 V.

Alkalijski akumulatori imaju prema olovnim akumulatorima neke prednosti i neke mane. Prednosti su im manja težina, manja osjetljivost prema udarcima, mogućnost davanja znatno jačih struja i velika trajnost. Mana im je u tome, što pri pražnjenju daju samo 70 do 78% od onih ampersati, koje su pri punjenju primili (prema 90% kod olovnih akumulatora); nadalje u tome, što imaju po elementu (čeliji) niži napon (1,2 prema 2 V), te što im je napon mnogo manje konstantan nego kod olovnih akumulatora.

Zadatak 86. Koliko čelija mora imati akumulatorska baterija u nekoj elektrani, da se dobije napon 110 (24; 220) V (uz napon čelije 2 V)?

Zadatak 87. Koliko čelija treba dodati akumulatorskoj bateriji iz prethodnog zadatka, ako hoćemo zadržati jednaki napon i onda, kad pri pražnjenju napon čelija spadne na 1,83 V?

Zadatak 88. Koliki će biti napon i kapacitet triju akumulatorskih baterija za 12 V, 50 Ah, ako ih spojimo a) paralelno, b) serijski?

Zadatak 89. Koliki mora biti najviši napon punjenja za bateriju iz zadatka 86?

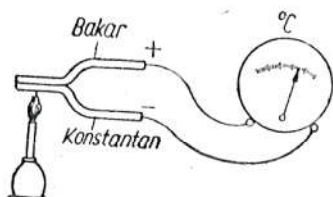
Zadatak 90. Neka akumulatorska baterija ima desetsatni kapacitet 80 (30; 120) Ah. Koliko je vrijeme pražnjenja i koliki je kapacitet pri pražnjenju strujom 10 (6; 60) A?

Zadatak 91. Koliki 10-satni kapacitet treba da ima akumulatorska baterija, ako treba da daje 30 (15; 25) A za vrijeme od 4 (5; 20) sati?

6. ELEKTRIČNA STRUJA IZ TOPLINE I SVJETLOSTI

6.1. TERMoeLEMENTI

Svarimo zajedno po jedan kraj komada bakra i konstantana, prema slici 80., pa svareno mjesto grijmo. Priključimo li na druge krajeve tih svarenih komada voltmetar za mjerenje sitnih napona, milivoltmetar, vidjet ćemo, da će taj instrument pokazati to veći otklon, što svareno mjesto jače ugrijemo. Na spojištu tih dvaju metala stvara se dakle pri grijanju neka elektromotorna sila. Budući da je ona nastala pod utjecajem topline, naziva se termoelektromotorna sila, a sam taj izvor struje *termoelement**.



Sl. 80. Termoelement bakar-konstantan.

Budući da termoelement daje na svojim nesvarenim krajevima to veći napon, što je jače ugrijan, *mjerenjem napona termoelementa možemo izmjeriti temperaturu*, na koju je termoelement ugrijan. Milivoltmetar može biti baždaren neposredno u stupnjevima Celzija ($^{\circ}\text{C}$) kao na slici 80., pa na taj način možemo mjeriti temperaturu odmah u $^{\circ}\text{C}$. Treba naglasiti, da se termoelementom neposredno mjeri zapravo razlika temperature, na koju je termoelement ugrijan, i temperature instrumenta, na koji je priključen, t. j. temperature okoline. Na skali instrumenta možemo dakle pročitati nadtemperaturu mjesta mjerenja prema prostoriji. Ako na skali instrumenta pročitamo

* Od grčke riječi thermos, što znači topao.

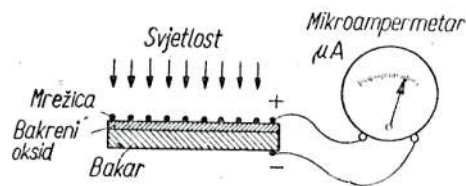
na pr. 90°C , a temperatura prostorije, u kojoj vršimo mjerenje, iznosi 20°C , tada je termoelement ugrijan za 90°C nad temperaturom prostorije; njegova temperatura iznosi prema tome $90 + 20 = 110^{\circ}\text{C}$.*

Elektromotorna sila, koja nastaje u termoelementu, posve je sićušna. Na pr. termoelement bakar—konstantan daje pri ugrijanju za 80°C svega $3,5\text{ mV}$, a pri ugrijanju za 250°C svega 12 mV . Termoelementi ne mogu prema tome poslužiti kao izvori jačih struja, pa se njihova primjena ograničuje na mjerenja. Izvrsno nam služe osobito za mjerenje temperature na vrlo različitim područjima, pa i u elektrotehnici. Na pr. u velikim generatorima ugrađuju se termoelementi na nekoliko mjesta neposredno uz vodiče, pa se vodovima spajaju sve do instrumenata, koji se nalaze na komandnoj ploči. Na taj način možemo svakovremeno u pogonu takvog generatora izmjeriti temperaturu njegova namota i kontrolirati njegovo ugrijanje.

Osim termoelementa bakar—konstantan upotrebljavaju se još termoelementi platina — platin-rodij, željezo — konstantan, kromel — alumel, kromel — konstantan i drugi.

6.2. FOTOELEMENTI

Fotoelementi su takve naprave, u kojima se pod utjecajem svjetlosti stvara elektromotorna sila. Fotoelement prema slici 81. sastoji se od bakrene ploče prevučene slojem bakrenog oksidula (poluvodič), na koju je pritlačena fina bakrena mrežica. Kad svjetlost pada na taj fotoelement, ona uzrokuje gibanje elektrona u poluvodiču. Pod utjecajem tog gibanja jedan dio elektrona prelazi od poluvodiča na bakrenu ploču, ali natrag više ne može, jer se između bakrene ploče i poluvodiča stvorio zaporni sloj, koji propušta elektrone samo u jednom smjeru. Na bakrenoj ploči nastaje prema tome višak elektrona, koji se može izjednačiti samo kroz vanjski strujni krug. Ako je dakle vanjski strujni krug zatvoren, teći će kroza nj struja. U našem je slučaju taj vanjski strujni krug zatvoren preko mikroampermetra, pa će mikroampermetar pokazivati struju.



Sl. 81. Fotoelement s bakrenim oksidom.

Ima fotoelemente, koji su drukčije građeni nego onaj na slici 81., ali je uvijek karakteristično to, da se neki poluvodič nalazi između metalne ploče i fine mrežice, na koju pada svjetlost. Umjesto mrežice može se na poluvodič staviti i izvanredno tanki, prozirni listić (film) zlata. Za mjerenje jakosti svjetlosti odnosno jakosti rasvjete osobito se mnogo upotrebljava selenov fotoelement, kod kojega kao poluvodič služi selen. Ima i tekućinskih fotoelementa, koji su nešto drukčije građeni.

Fotoelementi daju samo neznatne napone, odnosno i neznatne struje, ali se oni ipak na vrlo različite načine iskorišćuju u televiziji, tonfilmu, fototelegrafiji, te za različite signalne i kontrolne uređaje.

Često se u fotoelemente ubrajaju i fotonke (foto-cijevi) i foto-otpornici. Fotonke su takve elektronske cijevi, koje propuštaju struju samo ako su osvijetljene, a fotootpornici su takvi otpornici, kojih se otpor znatno mijenja u ovisnosti o svjetlosti, koja na njih pada. Fotonke ćemo opisati u poglavlju 11.3. Fotootpornici iskorišćuju svojstvo selena, da je nje-

* Ovo vrijedi samo približno. Za točnije podatke vidi specijalnu literaturu.

gov otpor znatno manji, kad na nj pada svjetlost. Ni u fotonkama ni u fotootpornicima ne nastaje nikakva elektromotorna sila, pa ih ne ćemo ubrojiti u fotoelemente. Fotonke, fotootpornike i fotoelemente možemo jednim imenom nazivati *fotoćelije*.

7. ELEKTRIČNA ENERGIJA I DRUGE VRSTE ENERGIJE

7.1. SILA

Tijelo, koje miruje, ne će se pokrenuti iz tog mirovanja, ako na nj ne djeluje neka sila. Pa i tijelo, koje se giba, gibalo bi se bez prestanka u istoj ravnoj liniji i jednakom brzinom, kad ne bi na nj djelovala neka sila te ga skretala s puta i zaustavljala. Sve što može izazvati promjenu u gibanju ili mirovanju nekoga tijela, sve to u fizici i tehnici nazivamo silom. Drugim riječima: *Sila je uzrok gibanju*. Sila može biti vrlo različitog porijekla. Kad bismo glatku kuglu zakotrljali po glatkoj površini zaleđenog jezera, ona bi se gibala dosta dugo, ali bi se napokon zaustavila: zaustavilo bi je trenje između nje i leda i otpor zraka. Sile, koje su izazvale promjenu u gibanju te kugle, jesu dakle sila trenja i sila otpora zraka. Ako bacimo kamen uzrak, uzrok gibanja toga kamena je sila naših mišića. Kamen se, dakako, ne će gibati jednoliko u smjeru, u kojem smo ga bacili, jer na nj za vrijeme toga gibanja također djeluju različite sile: sila teža ili gravitacija vuče ga prema zemlji, sila otpora zraka umanjuje mu brzinu, sila vjetra skreće ga s puta. Kad na nj ne bi djelovale ove sile, a ni nikakve druge sile, kamen bi se gibao jednakom brzinom i u istoj ravnoj liniji: on bi odletio u svemir. Kretanju magnetske igle u magnetskom polju uzrok je magnetska sila; ista sila — kako ćemo kasnije vidjeti — pokreće i električne strojeve. Parne lokomotive pokreće unutarnji tlak pare, automobile unutarnji tlak plinova, koji se razvijaju zbog izgaranja goriva, naše džepne satove pokreće sila navijenog čeličnog pera i t. d.

Sila može djelovati na tijelo, a da ne nastane gibanje, ako je otpor tijela prevelik. Možemo uprijeti najveću silu naših mišića pritiskujući neki zid, a da ga ni najmanje ne pomaknemo. Sila teža djeluje na neki most, koji prelazi preko neke rijeke, pa ipak se most ne će srušiti, jer je konstrukcija mosta dosta jaka, da sile, koje u njoj nastaju, drže ravnotežu sili teži. Uopće, ako na neko tijelo djeluje više sila, pa se one sve zajedno poništavaju, kažemo, da su sve te sile u ravnoteži. Učinak na tijelo bit će u tom slučaju isti, kao da na tijelo ne djeluje uopće nikakva sila.

Dok god sila djeluje na tijelo, ono se ubrzava. Bacimo li kamen s visoka, on će se gibati sve brže i brže pod utjecajem sile teže. No što je veća brzina, to je veći i otpor zraka. Stoga, ako bismo bacili kamen iz aviona s vrlo velike visine, on bi se ubrzavao samo neko vrijeme, dok ne bi sila otpora zraka postala jednaka sili teži. Od toga časa kamen će padati jednolikom brzinom, jer na nj djeluju dvije jednake sile, koje drže ravnotežu. Učinak je takav, kao da se one poništavaju i kao da na kamen ne djeluje nikakva sila.

Težina nekog predmeta nije drugo nego sila, kojom teža djeluje na taj predmet. Težina, a prema tome i sila, mjerila se dosada u kilogramima sile (oznaka kg). No kilogram (pa i gram, dekagram i t. d.) bio je dosada u fizici i tehnici zajednički naziv za dvije sasvim različite jedinice: za jedinicu sile (kilogram sile) i za jedinicu mase (kilogram mase). To je izazvalo i danas još izaziva zbrku. Da se izbjegne toj zbrci, uvodi se u najnovije vrijeme za istu jedinicu sile umjesto naziva kilogram naziv *kilopond* (oznaka kp). *Kilogram sile i kilopond su samo dva različita naziva za jedan te isti pojam. Prema tome je $1\text{ kg} = 1\text{ kp}$* . Poznato je, da je $1\text{ kg} = 1000\text{ grama (g)}$. Isto je tako $1\text{ kp} = 1000\text{ ponda (p)}$. Budući da se kod nas u tehničkoj praksi još uvijek upotrebljava skoro samo naziv kilogram za jedinicu sile, služiti ćemo se u ovoj knjizi i nadalje tim nazivom.

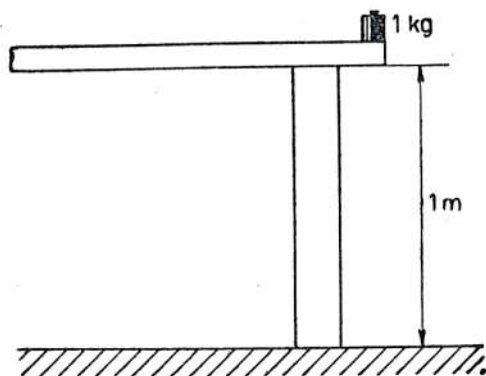
No i uvođenje naziva kilopond samo je privremeno rješenje, jer je i onako međunarodna Generalna konferencija za mjere i utege zaključila, da se prijede na sasvim novi sistem jedinica, u kojem je jedinica sile *njuton* (oznaka N). Vrijedi odnos:

$$\begin{aligned} 1\text{ N} &= 0,102\text{ kg} = 0,102\text{ kp}, \\ 1\text{ kg} &= 1\text{ kp} = 9,81\text{ N}. \end{aligned}$$

Mogao bi tkogod pomisliti: Promijenile se jedinice za silu odnosno težinu kako mu drago, još će dugo, vrlo dugo naše domaćice kupovati meso, krumpir, jabuke i t. d. na kilograme, a ne na kiloponde, a kamoli na njutone. U tom se pogledu ništa ne će promijeniti niti treba da se promijeni. Kilogram ostaje i nadalje jedinica za masu, pa naše domaćice, kad kupuju meso, krumpir, jabuke i t. d., kupuju masu tih tvari, a njihova težina je mjera za masu. *Masa je količina materije nekoga tijela.* Ona je razmjerna s težinom: što je masa veća, tijelo je teže, i obratno. No masa i težina su dva sasvim različita pojma. Na pr., uteg od 1 kg ima neku masu. Kad bismo ga mogli odnijeti na Mjesec ili na neki planet, masa mu se ništa ne bi promijenila. No Mjesec bi ga privlačio manjom silom, a na pr. planet Jupiter većom silom nego Zemlja. Naš uteg bio bi na Mjesecu lakši, a na Jupiteru teži nego na Zemlji. Prodavač, kad prodaje na pr. krumpir, uspoređuje na vagi težinu utega s težinom krumpira. Ako je vaga u ravnoteži, onda su težine utega i krumpira jednake, pa su im jednake i mase. Ako je na vagi uteg od 1 kg (a to je oznaka njegove mase!), onda je i masa krumpira 1 kg. Naše će domaćice kupovati prema tome živežne namirnice kao i dosada.

7.2. RAD

Kad sila djeluje na nekom putu, ona vrši rad. Drugim riječima, *rad je svladavanje otpora na nekom putu.* Ako uteg od 1 kg dignemo s poda na stol visok 1 m (slika 82), izvršili smo rad 1 kilogrammetar (oznaka: kgm). Ako je uteg težak G kg,



Sl. 82. Rad = sila $\times$ put.
Pri podizanju utega s poda na stol obavljen je rad $1 \text{ kg} \times 1 \text{ m} = 1 \text{ kgm}$.

a dignemo ga na visinu h metara, izvršeni rad iznosi Gh kilogrammetara. Moramo li za guranje nekog vagona upotrebiti silu F kg, a vagon guramo l metara, izvršit ćemo rad Fl kilogrammetara. Općenito, rad je jednak umnošku sile i puta preavljenog u smjeru te sile:

$$\boxed{\text{rad} = \text{sila} \times \text{put}} \quad (\text{u smjeru sile})$$

Odnosno pomoću oznaka ova formula glasi:

$$A = Fl,$$

gdje smo rad označili sa A .

Za veličinu rada sasvim je svejedno, za koje vrijeme taj rad izvršimo: da li smo na pr. neki kamen digli za jednu sekundu, jednu minutu ili jedan sat. Rad je uvijek i samo jednak umnošku sile i puta. Rad će biti posve jednak, dignemo li 1 kg 10 m visoko ili 10 kg na visinu 1 m. Takav fizikalni pojam rada srodan je pojmu rada u svakodnevnom životu. Za veličinu rada sasvim je svejedno, da li smo na pr. iscijepali hvat drva za jedan sat, za 10 sati ili za nekoliko dana.

Umjesto naziva kilogrammetar neki upotrebljavaju naziv metarkilogram (oznaka: mkg). To je isto: $1 \text{ kgm} = 1 \text{ mkg}$. No kao i naziv kilogram sile, tako i naziv kilogrammetar treba da se napusti u budućnosti. Umjesto toga uvodi se naziv kilopondmetar (kpm), odnosno metarkilopond (mkp). Dakako da je $1 \text{ kpm} = 1 \text{ mkp} = 1 \text{ kgm}$. I kilopondmetar međutim treba da se upotrebljava samo za vrijeme postepenog pri-

jelaza na novi sistem jedinica, u kojem je jedinica sile njuton, pa je jedinica rada njuton-metar (oznaka Nm). Ta se jedinica naziva i džul* (oznaka J) i vatssekunda (oznaka Ws): $1 \text{ Nm} = 1 \text{ J} = 1 \text{ Ws} = 0,102 \text{ kpm} = 0,102 \text{ kgm}$.

Rad, koji se obavlja pomicanjem tvari (krutina, tekućina ili plinova) pod utjecajem neke sile, naziva se mehaničkim radom za razliku od na pr. električkog rada, koji vrši električna struja.

7.3. SNAGA

Ako i ne utječe na veličinu rada, da li je rad izvršen za dulje ili kraće vrijeme, očito je, da ipak nije u svemu svedeno, da li je netko iscijepao hvat drva za 1 sat ili za 10 sati. Rad je, doduše, u jednom i drugom slučaju jednak, ali nije jednaka brzina rada. Ona će očito biti to veća, što je rad izvršen u kraće vrijeme. U fizici i tehnici tu brzinu rada nazivamo snagom. *Snaga je rad izvršen u jednoj sekundi:*

$$\text{snaga} = \frac{\text{rad}}{\text{vrijeme}} = \frac{\text{sila} \times \text{put}}{\text{vrijeme}}$$

ili

$$P = \frac{A}{t} = \frac{Fl}{t},$$

gdje je P — snaga, A — rad, t — vrijeme, F — sila, l — put u smjeru sile.

Ako rad mjerimo u kilogrammetrima, a vrijeme u sekundama, bit će jedinica za mjerenje snage *kilogrammetar na sekundu* (oznaka: kgm/s). To je ona snaga, koju bismo vršili, ako bismo uteg od 1 kg podizali svake sekunde za 1 m, t. j. ako bismo uteg od 1 kg podizali brzinom 1 m/s.

22. *primjer:* Teret $G = 100 \text{ kg}$ treba dignuti na visinu 10 m pomoću kolotur-nika. a) Koliki je rad za to potreban (uz zanemarenje trenja), b) kolika je snaga, ako dizanje traje 100 sekunda, c) kolika je snaga, ako dizanje traje 20 s?

Rješenje: Sila, koja je potrebna za dizanje tereta, jednaka je njegovoj težini: $F = G$.

$$\text{a) } A = Fl = 100 \cdot 10 = 1000 \text{ kgm}.$$

$$\text{c) } P = \frac{A}{t} = \frac{1000}{100} = 10 \text{ kgm/s}.$$

$$\text{c) } P = \frac{A}{t} = \frac{1000}{20} = 50 \text{ kgm/s}.$$

Rad je u jednom i drugom slučaju jednak, bez obzira na vrijeme, u kojem je obavljen. Snaga je u drugom slučaju 5 puta veća nego u prvom, jer je rad obavljen 5 puta brže.

Upotrebimo li umjesto naziva kilogram naziv kilopond, tada je jedinica snage kilopondmetar na sekundu (oznaka kpm/s). Jedinica snage u novom sistemu je njutonmetar na sekundu (Nm/s) ili džul na sekundu (J/s). Ova se jedinica naziva *vat* (oznaka W):

$$1 \text{ W} = 1 \text{ Nm/s} = 1 \text{ J/s} = 0,102 \text{ kpm/s} = 0,102 \text{ kgm/s}.$$

7.4. RAZLIČITE JEDINICE SNAGE I RADA

Osnovna jedinica snage je vat, no ona je često premala za tehničku praksu, pa se upotrebljava i 1000 puta veća jedinica *kilovat* (oznaka kW): $1 \text{ kW} = 1000 \text{ W}$. Osim toga se još uvijek dosta upotrebljava stara jedinica

* Po engleskom fizičaru Joule-u (čitaj: Džul).

konjska snaga (oznaka KS). Odnos između ovih jedinica i jedinice kgm/s odnosno kpm/s jest:

$$\begin{aligned} 1 \text{ kW} &= 1,36 \text{ KS} = 102 \text{ kgm/s} = 102 \text{ kpm/s} \\ 1 \text{ KS} &= 0,736 \text{ kW} = 736 \text{ W} = 75 \text{ kgm/s} = 75 \text{ kpm/s} \end{aligned}$$

Kao što se vidi, snagu 1 KS vršili bismo onda, ako bismo teret od 75 kg dizali brzinom 1 m/s, ili teret od 10 kg brzinom 7,5 m/s, ili teret od 300 kg brzinom 0,25 m/s, i t. d. Da vršimo snagu 1 kW, morali bismo 102 kg dizati svake sekunde za 1 m.

Rekli smo, da se rad mjeri u kilogrammetrima (kilopondmetrima) i vatsekundama. No rad se mjeri i u drugim jedinicama. Vrijedi odnos

$$\text{snaga} \times \text{vrijeme} = \text{rad}^*$$

Ova općenita formula daje (već prema upotrebljenim jedinicama)

$$\begin{aligned} \text{vati} \times \text{sekunde} &= \text{vatsekunde}, \\ \text{vati} \times \text{sati} &= \text{vatsati}, \\ \text{kilovati} \times \text{sekunde} &= \text{kilovatsekunde}, \\ \text{kilovati} \times \text{sati} &= \text{kilovatsati}. \end{aligned}$$

Ili pomoću oznaka:

$$\begin{aligned} \text{kW} \times \text{s} &= \text{kWs}, & \text{kW} \times \text{h} &= \text{kWh}, \\ \text{W} \times \text{s} &= \text{Ws}, & \text{W} \times \text{h} &= \text{Wh}. \end{aligned}$$

Jedne mjerne jedinice možemo lako preračunati u druge. Budući da je 1 kW = 1000 W, a 1 h = 3600 s, bit će

$$1 \text{ kWh} = 1000 \times 3600 = 3\,600\,000 \text{ Ws}.$$

Iz odnosa 1 kW = 102 kgm/s, 1 h = 3600 s, dobijemo 1 kWh = 102 · 3600 = 367 200 kgm = 367 200 kpm ili približno:

$$1 \text{ kWh} = 367\,000 \text{ kgm}$$

Ako se snaga 1 KS vrši za vrijeme jednog sata, bit će izvršen rad 1 KSh (konjska snaga sat). Budući da je 1 KS = 75 kgm/s i 1 h = 3600 s, bit će 1 KSh = 75 · 3600 = 270 000 kgm = 270 000 kpm.

$$1 \text{ KSh} = 270\,000 \text{ kgm}$$

Kadšto se kao jedinica za rad upotrebljava i tonametar (oznaka tm): 1 tm = 1000 kgm = 1000 kpm. Teži se za tim, da se jedinice KS i KSh ne bi više upotrebljavale te da se posve zamijene jedinicama kW i kWh.

Kako to, da za isti fizikalni pojam imamo nekoliko različitih jedinica? To je i kod drugih veličina često tako, pa čak i kod najosnovnije veličine, a to je duljina. Duljinu mjerimo obično u metrima, no u anglosaksonskim zemljama ona se većinom mjeri u nešto manjim jedinicama, u jardama, ili u još manjim jedinicama, u stopama. Nekada su naši stari mjerili duljinu na laktove, na pedlje, a i pomoću raznih drugih jedinica.

*) Budući da je snaga = $\frac{\text{rad}}{\text{vrijeme}}$.

Zadatak 92. Koliki rad obavimo, ako dignemo uteg od 50 (20; 80) kg na visinu 1,80 (1,70; 0,60) m?

Zadatak 93. Kolika je prosječna snaga, ako rad iz prethodnog zadatka obavimo za 3 (2; 5) s?

Zadatak 94. 15 (27; 0,04) kWh — koliko je to kgm?

Zadatak 95. 0,22 (0,63; 2,05) KSh — koliko je to mkp?

Zadatak 96. Koliki rad obavi čovjek, koji gura kolica 3 (1,5; 5) km daleko, ako je za guranje tih kolica potrebno 10 kg? Ako je put prevalio za 1 sat i 40 minuta, koliko je on snagu prosječno obavljao a) u kgm/s, b) u KS, c) u kW?

Zadatak 97. Ako se teret od 1000 (500; 30 000) kg diže brzinom 5 (8; 2) m/min, koliko je snaga za to potrebna a) u kgm/s, b) u kW, c) u KS (uz zanemarenje svih gubitaka)?

Zadatak 98. Koliku korisnu snagu daje sisaljka (pumpa), koja baca 30 m³ (4000 l; 2 m³) vode u minuti na visinu 15 (25; 52) m? Koliki rad izvrši ona za vrijeme 5 (3,5; 24) sati?

Zadatak 99. Koliki rad je potrebno da obavi elektromotor, koji diže dizalo (lift) težine 300 (250; 400) kg sa 4 (3; 6) čovjeka prosječne težine 75 kg na visinu 15 (12; 20) m?

Zadatak 100. Radnik kod napornog osamsatnog rada može davati snagu otprilike 3 kgm/s. Koliki rad, izražen u kWh, obavi radnik za 8 sati?

7.5. MEHANIČKA ENERGIJA

Općenito, *energija je sposobnost vršenja rada*. Mehanička energija je sposobnost vršenja mehaničkog rada. Voda na primjer, skupljena u jezeru poviše neke hidroelektrane, može vršiti mehanički rad tjerajući vodne turbine u toj hidroelektrani. Ta voda, dakle, ima neku energiju. Ona tu energiju ima zahvaljujući baš tom svom povišenom položaju prema turbinama u hidroelektrani. Stoga se ta energija naziva *energija položaja ili potencijalna energija*. Ta potencijalna energija, koja je u toj vodi skupljena, veća je, što je količina vode veća i što je veća visinska razlika između razine vode u jezeru i vodnih turbina u hidroelektrani. Ona je jednaka onom radu, koji bi bilo potrebno obaviti, da se voda dovede do tog povišenog položaja. Općenito, *energija položaja nekog tijela jednaka je onom radu, koji je potrebno izvršiti, da se to tijelo dovede u taj položaj*.

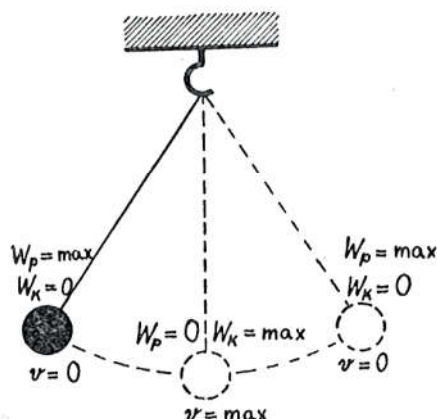
Budući da je energija sposobnost vršenja rada, mjeri se ona istim jedinicama kao i rad. Na pr. ako voda skupljena u jezeru iznad neke hidroelektrane ima potencijalnu energiju 1 000 000 kWh, mogla bi ona u turbinama u toj hidroelektrani izvršiti rad 1 000 000 kWh (u idealnom slučaju; u praksi zbog trenja i t. d. izvršila bi manje, možda svega nekih 800 000 kWh).

No mehanički rad može obavljati ne samo voda smještena na povišem položaju, već i voda, koja teče, koja se giba. Voda, koja teče u nekoj rijeci ili u nekom potoku može, na pr., tjerati mlinsko kolo i na taj način vršiti mehanički rad. I voda dakle, koja teče, ima neku energiju. Općenito, *svako tijelo, koje se giba, ima neku energiju*. Ta se energija naziva *energija gibanja ili kinetička energija*. Ona je to veća, što je veća masa tijela, koje se giba, i što je veća njegova brzina. Kinetička energija brzog voza vrlo je velika, jer je velika i njegova masa i njegova brzina.

Zamislimo, da bacimo kamen vertikalno u zrak, pa da promatramo, kako bi se on pritom gibao i kakvu bi imao energiju u pojedinim točkama toga svoga puta. Jednostavnosti radi zanemarimo sve sporedne utjecaje, kao što su otpor zraka, sila vjetrova i slično, pa promatrajmo kamen, kao da se on nalazi samo pod utjecajem sile teže. U času kad smo ga bacili vertikalno u zrak, dali smo mu neku kinetičku energiju. Kamen će se gibati tako visoko, da će rad, koji će on obaviti protiv sile teže, biti upravo jednak kinetičkoj energiji, koju je on imao na početku svoga puta. Kad kamen postigne svoju najvišu točku, njegova će kinetička energija biti jednaka nuli, jer je u tom času kamen u potpunom mirovanju. No u tom će času njegova potencijalna energija biti maksimalna. A može se računskim putem, na osnovi zakona mehanike, pokazati, da će ona biti upravo jednaka onoj kinetičkoj energiji, koju je kamen imao na početku svoga puta. U međupoložajima između početne i najviše točke gibanja toga kamena, njegova će kinetička energija sve

više padati, dok će njegova potencijalna energija sve više rasti. Ako bismo pravili račun na osnovi zakona mehanike, vidjeli bismo, da je zbroj obiju energija u svakoj točki na putu toga kamena jednak. Možemo dakle smatrati, da se kinetička energija pomalo pretvara u potencijalnu, dok u najvišoj točki, koju kamen postigne, nije sva kinetička energija prešla u potencijalnu energiju. Za vrijeme padanja kamena ponovit će se taj prijelaz jedne energije u drugu, samo u obrnutom smjeru. Sada će potencijalna energija postepeno prelaziti u kinetičku, dok će napokon na kraju pada opet sva potencijalna energija prijeći natrag u kinetičku.

Kod njihala* (slika 83.) vrši se neprestana pretvorba potencijalne energije u kinetičku i obratno. U lijevom i desnom krajnjem položaju kinetička je energija jednaka nuli, dok je potencijalna energija maksimalna. U srednjem položaju potencijalna je energija jednaka nuli, dok je kinetička maksimalna. Kad ne bi bilo otpora



Sl. 83. Kod njihala se vrši neprestana pretvorba potencijalne energije u kinetičku i obratno.

W_p - potencijalna energija, W_k - kinetička energija,
 v - brzina.

zraka i posve nikakvog trenja u ovjesištu, njihalo bi se njihalo vječno, jer bi se neprestano vršilo pretvaranje potencijalne energije u kinetičku i obratno, a da bi kod toga ukupna mehanička energija njihala ostala uvijek jednaka. Tome se idealnom slučaju možemo malo približiti, ako pustimo, da se njihalo njiše u posve zrakopraznom prostoru, pa oko se zgodnim zavješanjem niti (konca) pobrinemo, da i trenje u ovjesištu bude neznatno.

Ono najbitnije, što proizlazi iz gornja dva primjera, a o čemu ima još nebrojeno mnogo najrazličitijih drugih primjera, jest to, da mehanička energija ne nastaje sama od sebe niti se sama od sebe ne povećava, a isto tako da se ona bez vanjskih utjecaja niti ne umanjuje, a kamoli gubi. U gornjim je naime primjerima početna energija dobivena tako, da smo u prvom slučaju morali obaviti neki rad, da kamenu damo početnu brzinu, dok smo u drugom slučaju morali obaviti također neki rad, da kamen pomaknemo iz srednjeg položaja u krajnji položaj. U prvom slučaju (uz zanemarenje svih vanjskih utjecajnih faktora, osim dakako sile teže) mehanička energija ostala je za cijelo vrijeme gibanja kamena jednaka sve dotle, dok kamen nije udario o zemlju. Rekli bismo, da je u tom času energija bila uništena ili da je propala. Doista, mehaničke je energije nestalo, ali — kako ćemo vidjeti — nije nestalo energije kao takve. Mehanička se energija samo pretvorila u toplinu. U drugom slučaju, u slučaju njihala, mehanička bi energija ostala vječno konstantna, kad ne bi bilo otpora zraka ni trenja u ovjesištu. Međutim, kako i jedno i drugo postoji, njihalo će se prije ili kasnije zaustaviti, a to znači, da je ono svoju mehaničku energiju postepeno izgubilo. No ni ovdje nije nestalo energije kao takve, već se ona i ovdje iz mehaničke energije pretvorila u toplinsku (i to zbog trenja u ovjesištu i trenja sa česticama zraka).

Zadatak 101. Kolika je energija u kWh sadržana u jezeru iznad hidroelektrane, ako je u tom jezeru skupljeno 200 000 (60 000; 1 200 000) m³ vode na visini od 150 (80; 115) m?

* Pod njihalom zamislimo ovdje na pr. neki kamen svezan i zavješan koncem.

7.6. TOPLINSKA ENERGIJA

Ako dignemo neki uteg na stol, mehanički rad, koji je za to potreban, ostat će, kako smo vidjeli, sačuvan u energiji položaja toga utega. Ako udarimo nekoliko puta batom po nakovnju, izvršit ćemo time također neki mehanički rad, ali od toga nije nastala nikakva mehanička energija. Pa ipak je i taj mehanički rad izazvao neku promjenu u prirodi. Ta je u tome, što su se zbog udaranja i bat i nakovanj ugrijali: nastala je toplina. I mnogobrojnim drugim primjerima dade se pokazati, da se mehaničkim radom stvara toplina. Sjetimo se samo primjera, za koje sigurno svi znamo iz vlastitog iskustva. Ako trljamo ruke, osjećamo, kako se ruke griju; ako se neki predmet brusi, on se pri brušenju grije; pri svakom se trenju stvara toplina, pa se zato svi ležaji u pogonu griju, a sve se kočnice, kojima se koči trenjem, za vrijeme kočenja znatno griju; autogume se kod brze vožnje zbog trenja i udaraca znatno ugriju, ako nekim kompresorom tlačimo zrak na visoki tlak, opaziti ćemo, da se zrak pritom vrlo jako grije i t. d., i t. d.

No ne samo da se mehaničkim radom može dobiti toplina, već se i obratno, pomoću topline može dobiti mehanički rad. Svakome je poznato, da parne strojeve tjera para, koja je dobivena toplinom stvorenom izgaranjem ugljena.

Činjenica, da se mehaničkim radom može proizvesti toplina, kao i da se iz topline može dobiti mehanički rad, pokazuje, da je i *toplina vrsta energije*.

Toplina nije isto što i temperatura. Dok je temperatura mjera za to, kako jako je koje tijelo ugrijano, dotle je toplina vrsta energije. Količina topline je količina energije, koju neko tijelo sadrži, odnosno koja mu je privedena. Temperatura plamena žigice sigurno je prilično visoka. No količina toplinske energije, koju žigica razvija, ipak je malena, mnogo premala, a da bi mogla iole zamjetljivo ugrijati na pr. 1 litru vode.

Količina topline, koja je potrebna za ugrijanje nekog tijela, veća je, što je to tijelo teže, što ga hoćemo jače ugrijati, te što se ono teže grije. Za grijanje 10 litara vode trebat će 10 puta više topline nego za grijanje 1 litre vode. Da se voda ugrije za 20° C, trebat će dvostruka količina topline nego za njezino ugrijanje za 10° C. Konačno, voda se teže grije nego sve druge tvari. Za grijanje 1 kg vode za 1° C treba 5 puta više topline nego kod aluminijske, 9 puta više nego kod čelika, 11 puta više nego kod bakra, a čak 32 puta više nego kod olova i lijevanog željeza.

Kao jedinica količine topline uzeta je ona količina topline, koja je potrebna, da se 1 kg vode ugrije za 1° C. Ta se jedinica naziva *kilokalorija*, a oznaka joj je *kcal*. Ona količina topline, koja je potrebna, da se 1 kg neke tvari ugrije za 1° C, naziva se općenito *specifična toplina* te tvari, a obilježiti ćemo je sa *c*. Kod vode je prema gornjemu $c = 1 \text{ kcal/kg}$, a kod nekih drugih tvari specifična toplina iznosi:

drvo	0,60 kcal/kg	lijev. željezo	0,095 kcal/kg
strojno ulje	0,40 „	olovo	0,093 „
aluminij	0,22 „	kositar	0,055 „
staklo	0,20 „	bakar i mjed	0,031 „
čelik	0,11 „	cink	0,031 „
nikalj	0,11 „		

Ako obilježimo težinu nekog tijela u kilogramima slovom *G*, a razliku temperatura u stupnjevima Celzija nakon i prije grijanja sa *t*, možemo lako izračunati količinu topline *Q* potrebnu za ugrijanje tog tijela po formuli:

$$Q = c G t$$

Kadšto se upotrebljava i manja jedinica kalorija (cal). $1 \text{ kcal} = 1000 \text{ cal}$.

23. primjer. Kolika je količina topline potrebna, da zakuhamo 2 litre mlijeka od 20° C u loncu od lijevanog željeza teškom 2 kg?

Rješenje: a) Za mlijeko: Zakuhati mlijeko znači ugrijati ga na temperaturu 100° C. Dakle je: $c = 1 \text{ kcal/kg}$, $G = 2 \text{ kg}$,

$$t = 100 - 20 = 80^\circ \text{ C},$$

$$Q = 1 \cdot 2 \cdot 80 = 160 \text{ kcal}.$$

b) Za lonac: $c = 0,031 \text{ kcal/kg}$, $G = 2 \text{ kg}$; temperatura lonca može biti nekih 10°C viša od temperature mlijeka;

$$t = 110 - 20 = 90^\circ \text{C},$$

$$Q = 0,031 \cdot 2 \cdot 90 = 5,57 \text{ kcal}.$$

Za grijanje lonca treba dakle samo:

$$\frac{5,57}{160} \cdot 100 = 3,5 \%$$

one količine topline, koja je potrebna za grijanje mlijeka.

Zadatak 102. Kolika je toplota potrebna za zagrijavanje 10 (4; 25) l vode od 12 (22 ; 15) $^\circ \text{C}$ na 75 (90 ; 30) $^\circ \text{C}$?

Zadatak 103. Kolika je toplota potrebna za zagrijavanje bakrenog (olovnog; aluminijskog) komada, teškog 10 (20 ; 15) kg , od 20 do 1083 (327 ; 658) $^\circ \text{C}$, t. j. do temperature tališta bakra (olova; aluminijska)?

7.7. ZAKON O ODRŽANJU ENERGIJE

Kad smo promotрили ona dva primjera iz mehanike, t. j. bacanje kamena vertikalno uvis i njihanje njihala, ustanovili smo, da je zbroj potencijalne i kinetičke energije tako dugo nepromijenjen, dok na kamen, odnosno na njihalo ne djeluje ništa drugo, osim sile teže. Ukupna je energija prema tome ostala konstantna, ona se nije ni uvećala ni umanjila. No mehanička se energija može pretvoriti u toplinsku i obratno, pa se nameće pitanje, da li se kod ovakvih pretvorbi jedne vrste energije u drugu stvara kakva energija ili pak, možda, uništava? Da li postoji neki odnos, po kojemu se mehanička energija pretvara u toplinsku i obratno, da li se jedinice mehaničke energije, kilogrammetri (odnosno kilopondmetri), vatsekunde, kilovatsati i dr. mogu dovesti u neki omjer s jedinicama toplinske energije, kilokalorijama? Ako taj omjer postoji, i ako je on kod svih procesa, koji se zbivaju u prirodi, uvijek jedan te isti, znači, da određenoj količini mehaničke energije odgovara uvijek točno određena količina toplinske energije i obratno.

I doista još 1842. godine ustanovljeno je, a kasnije na nebrojeno mnogo načina potvrđeno, da između toplinske i mehaničke energije postoji stalan odnos. On iznosi približno:

$$1 \text{ kcal} = 427 \text{ kgm}$$

t. j. 427 kgm (427 kpm) mehaničke energije kod potpune pretvorbe u toplinsku energiju daju 1 kcal .

Taj odnos je, kako je lako uočiti, vrlo povoljan za toplinsku energiju. Ona ista energija, koja odgovara dizanju velike težine od 427 kg 1 m visoko, tek je ravna onoj maloj količini topline, kojom se 1 litra vode ugrije za 1°C . Ona količina topline, koja nam je potrebna, da 1 litru vode od 20°C dovedemo do ključanja, t. j. zagrijemo na temperaturu 100°C , ta ista, svakako ne prevelika količina topline, bila bi dovoljna, da digne teret od 427 kg 80 m visoko, kad bismo je svu mogli pretvoriti u mehanički rad!

Budući da je $1 \text{ kWh} = 367\,000 \text{ kgm}$, a $1 \text{ kcal} = 427 \text{ kgm}$, bit će $1 \text{ kWh} = 367\,000 : 427 = 860 \text{ kcal}$.

$$1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal}$$

Pokazalo se, da se i druge vrste energije daju pretvarati jedna u drugu, i to uvijek i samo tako, da određena količina energije jedne vrste odgovara točno određenoj količini energije druge vrste. Nije moguće izmisliti nikakav postupak, nikakav stroj, nikakav aparat, pomoću kojega bi se mogao proizvesti neki višak energije, kojim bi se stvorila energija ni iz čega ili kojim bi se energija, koja postoji, uništila. *Energija se ni na koji način ne može stvoriti niti uništiti; u prirodi postoje*

*i moguće su samo pretvorbe energije jedne vrste u energiju druge vrste. Ta spoznaja, stara nešto preko 100 godina, zove se zakonom o održanju energije, a to je jedan od najvažnijih prirodnih zakona uopće.**

Proizvesti električnu energiju ne znači dakle stvoriti tu energiju ni iz čega, jer je to nemoguće. To znači samo pretvoriti neku drugu vrst energije u električnu, a takva je pretvorba moguća, kako ćemo još vidjeti, iz raznih vrsta energije.

Vratimo se sad ponovo na onaj naš primjer s kamenom, koji smo bacili okomito uzrak. Rekli smo, da je njegova energija bila nepromijenjena za cijelo vrijeme njegova gibanja, t. j. njegova dizanja i padanja. A kad je kamen udario o zemlju, njegova se mehanička energija morala pretvoriti u toplinsku, jer po zakonu o održanju energije ona ne može nestati. Ako bismo doista izveli taj pokus, pa kamen dotakli rukom, nakon što je udario o zemlju, ne bismo primijetili, da se je ma i neznatno ugrijao. Da to objasnimo, promotrimo ovaj primjer.

24. primjer. Kod nekog vodopada pada voda s visine od 100 m. Treba izračunati, koliko se voda kod pada ugrije, ako sva toplina, koja se razvije iz mehaničke energije, ostane u vodi, koja je pala, t. j. ništa od razvijene topline ne prijeđe na okolinu.

Rješenje: Na visini od 100 m svaki kilogram vode ima potencijalnu energiju 100 kgm. Za vrijeme pada ta potencijalna energija prelazi postepeno u kinetičku, pa na kraju pada svaki kilogram vode ima kinetičku energiju 100 kgm. Pri likom sudara sva se kinetička energija pretvara u toplinsku, i to prema odnosu 1 kcal = 427 kgm. Kako 1 kg vode ima samo 100 kgm mehaničke energije, razvija se u svakom kg vode samo $100 : 427 = 0,23$ kcal. A ta će količina topline taj kg vode ugrijati za samo $0,23^{\circ}\text{C}$, dakle sasvim nezamjetljivo, makar je voda pala s velike visine od 100 m!

Sad je jasno, zašto ni kod kamena nakon njegova pada ne bismo primijetili nikakvo ugrijanje.

Zadatak 104. Koliku kinetičku energiju gibanja ima kamen od 100 (10; 25) kg čas prije, nego se dotakne zemlje, ako padne s visine od 10 (100; 25) m?

Zadatak 105. Pri ispitivanju motor se opterećuje tako, da ga mehanički kočimo pomoću posebnih kočnica, koje se taru o remenicu motora. Na taj se način mehanički rad, koji motor daje, pretvara u toplinu. Kolika se toplina pritom razvije u minuti, ako motor daje na remenicu snagu 10 (15; 5,5) KS?

7.8. ELEKTRIČNA ENERGIJA

Da je i električna struja nosilac energije, jasno je već i po tome, što električna struja može tjerati elektromotore, t. j. vršiti mehanički rad. Kod elektromotora zbiva se pretvorba električne energije u mehaničku, kod električnih se peći električna energija pretvara u toplinsku, a kod nekih drugih uređaja električna se energija pretvara i u druge vrste energije.

Kod naših razmatranja iz mehanike naučili smo, što je rad i što je snaga (u fizikalnom smislu). Za snagu smo rekli, da je mjera za brzinu rada, t. j. onaj rad, koji se obavi u jedinici vremena, u 1 sekundi. Isto tako kao što u mehanici postoji mehanička snaga, tako u elektrotehnici postoji električna snaga. A to je mjera za onaj električni rad, koji je obavljen u jedinici vreme-

* U posljednjih pola vijeka nauka je pokazala, da je zakon o održanju energije samo poseban slučaj jednog mnogo šireg zakona. Danas se zna, da se pod naročitim okolnostima energija može pretvoriti u masu i, obratno, masa u energiju. Masa se pretvara u energiju na pr. pri cijepanju atomske jezgre elementa urana, i to je osnova za iskorišćivanje atomske energije, pa i za rad takozvane atomske bombe. Jednom gramu mase odgovara energija od 25 000 000 kWh. Prema tome možemo energiju i masu smatrati dvjema formama materije, pa osnovni zakon glasi: Materija se ne može ni na koji način povećati ni smanjiti. No za sva tehnička razmatranja (osim za iskorišćivanje atomske energije) zakon o održanju energije vrijedi apsolutno točno.

na. Snaga je mjera za veličinu nekog stroja. Što je stroj veći, to će (pod inače jednakim okolnostima) njegova snaga biti veća, to veći će biti rad, što će taj stroj moći da obavi u jedinici vremena.

Slično je i kod čovjeka. Što je čovjek snažniji, to će veći rad moći obaviti za neko vrijeme.

Električna snaga mjeri se vatima (W) i kilovatima (kW) kao i mehanička snaga. Električni rad odnosno električna energija mjeri se kilovatsatima, vatsatima, kilovatsekundama i vatsekundama kao i mehanički rad odnosno mehanička energija. Električna snaga 1 kW odgovara mehaničkoj snazi 1 kW ili 102 kgm/s. Električna energija odn. električni rad 1 kWh odgovara mehaničkoj energiji odn. mehaničkom radu 1 kWh ili 367 000 kgm kao i toplinskoj energiji 860 kcal — sve prema odnosima, koje smo prije naveli.

Utroškom električne energije 1 kWh mogli bismo dakle na idealnom štednjaku ugrijati 10 litara vode za 86° C odn. 100 l vode za 8,6° C, a pomoću idealnog dizala mogli bismo 367 000 kg dignuti 1 m, odn. 367 kg 1000 m visoko! Kako se vidi, 1 kWh je prilično velika energija!

Kako je 1 kWh = 860 kcal, bit će

$$1 \text{ kWs} = \frac{860}{3600} = 0,24 \text{ kcal},$$

$$1 \text{ Ws} = 0,24 \text{ cal (kalorija)}, 1 \text{ kcal} = 1000 \text{ cal}.$$

Kod proizvodnje i prijenosa velikih električnih snaga upotrebljavaju se još veće jedinice:

za snagu: 1 MW (megavat) = 1000 kW = 1 000 000 W,

za energiju: 1 MWh (megavatsat) = 1000 kWh = 1 000 000 Wh.

Na električnim trošilima pored drugih podataka treba da bude naznačen i broj vata odnosno kilovata dotičnog trošila, a to je ona snaga, za koju je to trošilo dimenzionirano i građeno. Ta se snaga zove *nazivna snaga*. Kod sijalica te elektrotoplinskih naprava (električne peći, kuhala, glačala i t. d.) to je ona snaga, koju će trošilo povući iz mreže, kad ga priključimo na ispravan napon. Kod elektromotora to je ona snaga, koju elektromotor daje na svojoj osovini stroju, koji je od njega tjeran.

Kod žarulja i elektrotoplinskih naprava možemo pomoću toga podatka lako izračunati, koliko neko trošilo za izvjesno vrijeme troši električne energije. Žarulja, na primjer, na kojoj piše 40 W, povlači, kad svijetli, iz električne mreže snagu 40 W. Za 10 sati svijetljenja ta će žarulja potrošiti $40 \cdot 10 = 400$ Wh (vatsati), a za 100 sati svijetljenja $40 \cdot 100 = 4000$ Wh = 4 kWh. Glačalo već uzima iz mreže znatno veću snagu: 400 do 500 W, rešo i 1000 pa i više W, a sobna električna peć redovito 1000, 1500, 2000 pa čak i 3000 W. Električna peć od 2000 W već će za 2 sata potrošiti 4 kWh, t. j. toliko, koliko žarulja od 40 W za 100 sati. Već taj primjer pokazuje, da su elektrotoplinske naprave mnogo veća trošila električne energije nego žarulje.

Zadatak 106. Koliku električnu energiju u kWh troši 5 (6; 20) žarulja po 40 (100; 60) W, ako ove žarulje svijetle 10 (4; 100) sati?

Zadatak 107. Prosječna trajnost žarulja je 1000 sati svijetljenja. Koliko stoji električna energija, koju žarulja od 100 (60; 25) W potroši prije nego pregori, ako je cijena električne energije Din 15,— (8,—; 12,—) po kWh?

Zadatak 108. Seljačka radna zadruga u Kupljenovcu hoće izračunati, koliko će je dnevno stajati električna energija za pogon električne vršalice. Motor vršalice uzima iz mreže snagu od 8 (5,5; 13,5) kW. Predviđeno je, da će vršalice za vrijeme vršidbe raditi 20 (16; 22) sati dnevno. Električna energija stoji Din 15,— (12,—; 10,—) po kWh. Pomozite Zadruzi, da to izračuna!

Zadatak 109. Za električno grijanje prostorija zimi može se približno uzeti, da treba električna snaga 50 W po kubičnom metru. Koliko bi mjesečno stajalo električno grijanje sobe površine 5×5 (4×4 ; $5,5 \times 3$) m², visine 3 (2,70; 3,20) m, ako se ta soba grije 8 (4; 6) sati dnevno, a električna energija stoji Din 5,— (10,—; 7,50) po kWh?

Zadatak 110. Koliku električnu snagu uzima iz mreže električna peć, ako za 6 (4; 8) sati pogona potroši 10,8 (10; 9,6) kWh?

Zadatak 111. Da ustanovimo, koliku snagu uzima iz mreže električno glačalo, očitamo brojilo (za potrošak električne energije) prije glačanja: 3576,8 (1900,2; 0804,0) kWh, te nakon glačanja: 3577,7; (1901,7; 0806,2) kWh, pa izmjerimo vrijeme, za koje je glačalo bilo uklopljeno: 2 (3; 4) sata.

Zadatak 112. Poduzeće Udarnik pozvalo je elektromontera da ustanovi, da li je motor, koji bi smio uzimati iz mreže najviše 11 (4; 7,5) kW, preopterećen. Elektromonter je izmjerio pomoću brojila — u pomanjkanju ampermetra ili vatmetra — potrošak motora za vrijeme od 30 min te ustanovio, da on iznosi 6,2 (2,3; 4,1) kWh. Da li je motor preopterećen?

Zadatak 113. Treba izračunati, koliki će biti mjesečni troškovi za električnu energiju kod neke obitelji. Obitelj u tu svrhu navodi ove podatke: za rasvjetu upotrebljavaju 1 žarulju od 60 (40; 75) W prosječno 5 (6; 4) sati dnevno, 1 žarulju od 40 (100; 60) W prosječno 2 (2; 3) sata dnevno; 1 rešo od 700 (600; 800) W upotrebljavaju prosječno $\frac{1}{2}$ sata (1 sat; 20 minuta) dnevno. Električnim glačalom od 450 (500; 450) W glačaju oko 5 (4; 6) sati mjesečno. Cijena električne energije iznosi Din 15,— po kWh za prvih 5 kWh, a za svaki daljnji kWh Din 8,— (5,—; 5,50). Koliki su mjesečni troškovi za električnu energiju?

Zadatak 114. Za proizvodnju 1 kg aluminija (kalcijska karbida; umjetnog kaučuka) potrebno je 20 (3,6; 40) kWh električne energije. Koliko električne energije godišnje treba tvornica aluminija (kalcijska karbida, umjetnog kaučuka), ako joj je godišnja proizvodnja 6 000 (50 000; 5 000) tona?

7.9. NEKE DRUGE VRSTE ENERGIJE

Za proizvodnju električne energije vrlo je važna kemijska energija, koja je sadržana u gorivu. Sagorijevanje goriva nije drugo nego spajanje nekih sastavnih dijelova goriva s kisikom uz razvijanje topline, koja tom prilikom nastaje iz kemijske energije goriva, dakle pretvorbom jedne vrste energije u drugu. Ovu kemijsku energiju goriva izražavamo također u kilokalorijama, jer je mjerimo onom količinom topline, koja se dobiva pri potpunom sagorijevanju jednog kilograma goriva.*

Kad električna struja teče kroz tanku žicu u žarulji, ona tu žicu ugrije. Ugrije je na tako visoku temperaturu, da žica isijava ne samo toplinu već i svjetlost. Energija, koju žica isijava, naziva se energijom isijavanja, a ona nastaje iz električne energije, ali ne neposredno, nego posredstvom toplinske energije. Idealno bi bilo, kad bi se sva ili gotovo sva električna energija, koja se žarulji privodi, mogla pretvoriti u energiju isijavanja svjetlosti, i to po mogućnosti tako, da bi proizvedena svjetlost bila što sličnija danjoj svjetlosti. Nažalost, kod današnjih se naših žarulja svega oko 2% od privedene električne energije pretvara u energiju svjetlosti, koju vidimo! Oko 98% ostaje najvećim dijelom toplinska energija, koja je kod žarulja beskorisna.

Kemijska se energija ne oslobađa samo pri sagorijevanju, već i kod raznih drugih kemijskih procesa. Na pr. u akumulatorima vrši se, kao što smo već vidjeli, neprestana pretvorba električne energije u kemijsku i obratno.

* Količina topline, koja se dobiva pri potpunom sagorijevanju 1 kg nekog goriva, naziva se njegova ogrjevnna moć, a iznosi približno kod plinskog ulja (nafte) 10 000 kcal/kg, kod kamenog ugljena 7000 kcal/kg, kod mrkog ugljena 4000 kcal/kg, kod drva 3000 kcal/kg, kod lignita 2000 kcal/kg.

Energija budućnosti čini se da je atomska energija, nazvana tako, jer se dobiva cijepanjem ili sastavljanjem nekih atomskih jezgara, i to tako, da se pritom jedan dio mase atomskih jezgara pretvara u energiju. Na pr. pri cijepanju uranova atoma u dva druga atoma jedan hiljaditi dio mase pretvara se u energiju. Kako 1 gram mase odgovara energiji od 25 000 000 kWh, nastaje pri potpunom cijepanju 1 grama urana energija od 25 000 kWh, a pri potpunom cijepanju 1 kg urana energija od 25 000 000 kWh ili 18 milijardi kilokalorija prema svega 8000 kcal pri sago-rijevanju 1 kg najboljeg ugljena. (Atomska energija naziva se još i nuklearna* ener-gija, jer se ona oslobađa pri cijepanju atomskih jezgara pretvaranjem jednog dijela mase tih jezgara u energiju.)

7.10. KORISNOST (STUPANJ DJELOVANJA)

Svakom stroju ili aparatu, koji daje ma kakvu energiju, treba prema zakonu o održanju energije tu energiju privesti. Nikakav stroj ni aparat ne može energiju proizvesti ni iz čega. No nije dovoljno, da se stroju privodi samo ona energija, koju on daje. Treba mu privesti veću energiju. Zašto?

U svakom se stroju ili aparatu jedan dio energije pretvara u toplinu: griju se ležajevi zbog trenja, pri okretanju stroja nastaje trenje s okolnim zrakom, griju se vodiči, kojima teče struja i t. d. Ova je toplinska energija beskorisna, ona nam, štoviše, samo smeta, jer može suviše zagrijati stroj. Stoga ona sa stanovišta iskorišćivanja energije predstavlja gubitak.

Stroju dakle treba privesti onu energiju, koju on daje, uvećanu za onu energiju, koja se u njemu »gubi«, t. j. koja se ne privodi korisnoj svrsi. Ako na pr. neki elektromotor daje na osovinu za vrijeme jednog sata 8 kWh, uzima on iz mreže ne samo 8 kWh na sat, već onoliko više, koliko se u njemu iz raz-nih razloga pretvara u toplinu. To će biti, recimo, 2 kWh, tako da će motor uzimati iz mreže ukupno $8 + 2 = 10$ kWh na sat.

Omjer između one energije, koju neki stroj, aparat ili makar kakva dru-ga tehnička naprava daje, i one energije, koju je toj napravi potrebno privesti, nazivao se dosada kod nas dosta nespretno »stupanj (stepen) djelovanja«. Mi ćemo se međutim u ovoj knjizi radije služiti nazivom *korisnost*. Redovito se korisnost obilježuje grčkim slovom η (čitaj: eta):

$$\eta = \frac{\text{predana energija}}{\text{primljena energija}} = \frac{W_2}{W_1}$$

Kod našeg primjera bilo bi dakle:

$$\eta = \frac{8}{10} = 0,80 = 80\%.$$

No umjesto omjerom energija izražavamo η obično omjerom snaga: Primljena snaga na pr. elektromotora jednaka je onoj energiji, koju taj motor uzima iz mreže u jednoj sekundi; a predana je snaga jednaka onoj energiji, koju motor svake sekunde daje na osovinu. Ako je snaga konstantna, omjer je predane i primljene snage jednak omjeru predane i primljene energije:

$$\eta = \frac{\text{predana snaga}}{\text{primljena snaga}} = \frac{P_2}{P_1}$$

* Prema latinskoj riječi nucleus (čitaj nukleus) = jezgra.

Gubitak energije nije uvijek jednak stvorenoj toplini. Na pr. kod električnog se kuhala pretvara u toplinu sva energija, koju ono uzima iz mreže. No ako na tom kuhalu grijemo vodu, iskorišćuje se samo ona toplina, koja prelazi na tu vodu. Ona toplina, koja služi za zagrijavanje samog kuhala i lonca, kao i ona, koja prelazi na okolinu, jest gubitak.

Zadatak 115. Motor za pogon mlina u Poznanovcu daje na osovinu 7,5 (4,5; 22) kW, a uzima iz mreže 9,0 (5,7; 25,6) kW. Kolika je korisnost tog motora?

Zadatak 116. Koliku snagu uzima iz mreže elektromotor od 3,3 (20; 14) kW, ako mu je korisnost 78 (86; 84,5) %?

Zadatak 117. Neki elektromotor, koji uzima iz mreže 14 (22; 12) kW, tjera pumpu neprekidno 24 (8; 12) sata. Za to vrijeme pumpa baci 2600 (8400; 1700) m³ vode na visinu od 30 (5; 19) m. Kolika je korisnost ovog uređaja?

Zadatak 118. Motor od 55 (30; 68) KS treba da bude upotrebljen za dizanje tereta u ljevaonici u Železniku. Brzina dizanja treba da iznosi 1 (3; 5,8) m u minuti. Koliki će se teret moći dignuti, ako korisnost iznosi 0,7?

Zadatak 119. Lokomobil, koji tjera električni generator u nekoj staroj elektrani, treba za proizvodnju jednog kWh 4,2 (2,5; 3,7) kg ugljena ogrjevnice moći 3200 (4000; 3000) kcal/kg. Kolika je korisnost tog uređaja?

Zadatak 120. Neka velika elektrana s modernim parnim kotlovima i turbo-generatorima treba za proizvodnju jednog kWh 2,2 (2,0; 1,7) kg ugljena ogrjevnice moći 1800 (2000; 2200) kcal/kg. Kolika je korisnost te elektrane? Za koliko se postotaka u toj elektrani ugljen bolje iskorišćuje nego u elektrani iz zadatka 119?

Zadatak 121. Mala hidroelektrana u Vodencima iskorišćuje 2,5 (0,6; 15) m³ vode u sekundi uz pad od 4 (8,5; 1,80) m. Kolika je korisnost te hidroelektrane, ako ona daje snagu 70 (35,5; 20) kW?

Zadatak 122. Koliko stoji zakuhavanje na električnom kuhalu (rešou) 1 litre vode (od 14° C na 100° C), ako je korisnost kuhala 70 (65; 72) %, a cijena električne energije Din 8,— (5,50; 15,—) po kWh?

Zadatak 123. Kolika mora biti priključna vrijednost u kW električnog bojlera (t. j. koliku on snagu mora uzimati iz mreže), ako treba da za vrijeme 8 noćnih sati ugrije 30 (50; 100) litara vode od 10° C na 90° C te ako je korisnost bojlera 85%?

Zadatak 124. Za koliko bi se stupnjeva Celzijevih ugrijalo 100 (50; 20) litara vode upotrebom električne energije od 1 (3; 2) kWh, ako je korisnost električnog štednjaka pritom 0,75?

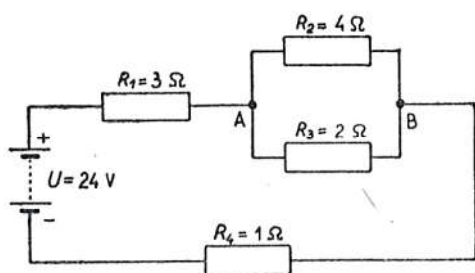
7.11. ELEKTRIČNA SNAGA I RAD

Snaga nekog mlaza vode to je veća, što je veći tlak, pod kojim voda izlazi iz cijevi, i što je jača struja vode. Slično je i kod električne struje. Električna je snaga to veća, što je napon viši i što je struja jača. Za izračunavanje električne snage vrijedi jednostavna formula

$$P = UI \text{ vata} \quad \text{za istosmjernu struju}$$

Kod toga je napon U izražen u voltima, a struja I u amperima. Jedinica za električnu snagu je prema tome određena odnosom:

$$1 \text{ vat} = 1 \text{ volt} \times 1 \text{ amper.}$$



Sl. 84. Kombinacija otpora uz
25. primjer.

Za veličinu električne snage je dakle sasvim svejedno, da li imamo napon 1000 V i struju 10 A ili napon 10 V i struju 1000 A; u oba je slučaja umnožak napona i struje 10 000 W = 10 kW, dakle jednak. *Električna snaga je kod istosmjerne struje jednaka umnošku napona i struje.*

Formula $P = UI$ vrijedi poput Ohmova zakona ne samo za cijeli strujni krug, već i za bilo koji njegov dio.

25. primjer: Kolika je snaga, koju daje izvor struje na slici 84., te kolika se snaga troši u otporu R_3 ?

Rješenje: Ukupni otpor iznosi $R = 3 + 1,33 + 1 = 5,33 \Omega$.

$$I = \frac{U}{R} = \frac{24}{5,33} = 4,5 \text{ A.}$$

Snaga, koju daje izvor struje, iznosi $P = UI = 24 \cdot 4,5 = 108 \text{ W}$. Napon između točaka A i B iznosi $U_{AB} = I_{AB} R_{AB} = 4,5 \cdot 1,33 = 6,0 \text{ V}$. Struja kroz otpor R_3 iznosi $I_3 = U_{AB} : R_3 = 6,0 : 2 = 3 \text{ A}$. A snaga, koja se u njemu troši, jednaka je umnošku napona na njegovim stezaljkama i struje, koja kroza nj teče: $P_3 = U_{AB} I_3 = 18 \text{ W}$.

Već otprije znamo, da je rad = snaga $\times$ vrijeme, pa se električni rad može izračunati po formuli:

$$A = Pt = UIt \text{ vatsekunda,}$$

gdje je t vrijeme u sekundama. Osim toga električni se rad može izraziti i u drugim jedinicama: u kilovatsekundama, vatsatima, kilovatsatima i megavatsatima, kako je to razloženo na strani 85.

Zadatak 125. Koliku snagu uzima bušilica (električna pećnica; elektromagnet), koja kod 220 (110; 24) V uzima 5 (12; 0,08) A?

Zadatak 126. Koliku struju uzima žarulja od 220 (110; 12) V i 100 (60; 5) W?

Zadatak 127. Koliku snagu uzima električno lemilo (elektromotor za istosmjernu struju, električna peć) koje pri 110 (220; 190) V uzima iz mreže 4,5 (39,1; 7,9) A? Koliko potroši električne energije za $1\frac{1}{2}$ (12; 7) sat?

Zadatak 128. Koliku struju uzima iz mreže gater (kružna pila; blanjalica), ako ga tjera motor za istosmjernu struju od 20 (5,5; 10) KS, 440 (220; 220) V, a korisnost motora je 84,5 (78; 81) %?

Zadatak 129. Na koji napon treba da bude priključena električna peć od 2 (1,5; 1) kW, ako kroz nju treba da teče struja 9,1 (13,6; 4,55) A?

7.12. JOULEOV* ZAKON, STVARANJE TOPLINE

Ako u formuli $P = UI$ umjesto napona U stavimo umnožak IR (jer je po Ohmovu zakonu $U = IR$), dobijemo

$$P = UI = IR \cdot I$$

ili

$$P = I^2 R$$

* Čitaj: Džul (Džulov zakon).

Električna snaga, koja se troši u nekom otporu, razmjerna je s kvadratom struje i s veličinom tog otpora. Ovo se zove *Jouleov zakon*.

Energija, koja se troši u nekom otporu, pretvara se u tom otporu u toplinu. Stvorena toplina bit će:

$$Q = A = I^2 R t \text{ vatsekunda.}$$

Toplinska se energija međutim obično ne izražava u Ws nego u kcal ili cal. No kako je navedeno na strani 85., $1 \text{ Ws} = 0,24 \text{ cal}$. Prema tome iznosi toplina, koja se kroz vrijeme t razvije u vodiču otpora R , kojim teče struja I :

$$Q = 0,24 I^2 R t \text{ kalorija.}$$

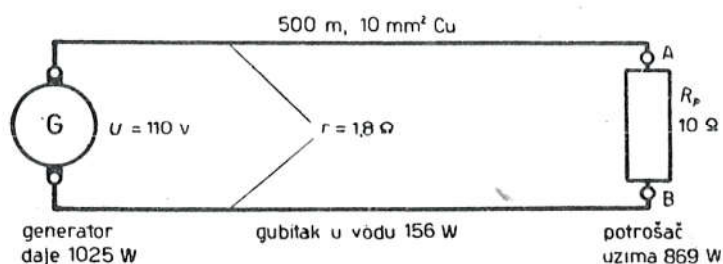
Zadatak 130. Kolika se snaga troši u otporniku od $200 \text{ } \Omega$ (18; 135) Ω , ako kroz njega teče struja 5 (2,2; 3,5) A? Kolika se toplina stvara u tom otporniku za 17 min (8 min, 47 s; 21 min, 3 s)?

Zadatak 131. Koliki je otpor električne peći od 2 (1,5; 1) kW, 220 (110; 190) V?

Zadatak 132. Ampermetar do 100 (50; 15) A ima unutarnji otpor 0,0006 (0,002; 0,005) Ω . Kolika se električna snaga u njemu troši, kad kroza nj teče cijela struja? Kolika se toplina u njemu stvara za 1 sat? Za koliko bi se $^{\circ}\text{C}$ mogla ugrijati 1 l vode tom toplotom?

7.13. GUBITAK SNAGE

26. primjer: Neka generator od 110 V dobavlja električnu energiju potrošaču priključenom na kraju voda dugačkog 500 m, presjeka vodiča 10 mm^2



Sl. 85. Od snage, koju proizvodi generator, jedan dio se gubi u prijenosnim vodovima (uz 26. primjer).

Cu. Ukupni otpor svih trošila kod toga potrošača neka iznosi 10Ω (slika 85.).

a) Koliku snagu daje generator, b) koliku snagu uzima potrošač?

Rješenje: Otpor dovodnih vodiča:

$$r = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,018 \cdot 2 \cdot 500}{10} = 1,8 \Omega.$$

Ukupni otpor: $R = R_p + r = 10 + 1,8 = 11,8 \Omega$.

Struja:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{110}{11,8} = 9,32 \text{ A.}$$

Napon na stezaljkama potrošača:

$$U_{AB} = I R = 9,32 \cdot 10 = 93,2 \text{ V.}$$

Snaga, koju daje generator:

$$P = UI = 110 \cdot 9,32 = 1025 \text{ W.}$$

Snaga, koju uzima potrošač:

$$P_p = U_{AB}I = 93,2 \cdot 9,32 = 869 \text{ W.}$$

Razlika $1025 - 869 = 156 \text{ W}$ »izgubila« se u vodu, a to se naziva *gubitak snage*. Zapravo, ta se snaga pretvorila u dovodnom vodu u toplinu, ona se potrošila u otporu r voda. Tu snagu možemo izračunati i prema Jouleovu zakonu:

$$p = I^2 r = 9,32^2 \cdot 1,8 = 156 \text{ W,}$$

ili u procentima:

$$p \% = \frac{p}{P} \cdot 100 = \frac{156}{1025} \cdot 100 = 15,2 \%$$

Pad (gubitak) napona iznosi $110 - 93,2 = 16,8 \text{ V}$ ili u procentima:

$$u \% = \frac{16,8}{110} \cdot 100 = 15,2 \%$$

Procentualni pad (gubitak) napona i procentualni gubitak snage kod istosmjernje struje su jednaki.

I s obzirom na pad napona i s obzirom na gubitak snage u gornjem bismo primjeru imali nedopustive prilike, jer je 15% i za jedno i za drugo previše. Za taj mali prijenos energije morali bismo upotrebiti barem $25 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$.

Kod svakog prijenosa električne energije pojavljuje se ne samo pad napona kao tehnički neugodna pojava, jer su trošila više ili manje osjetljiva na promjene napona, već dolazi i do gubitka snage, do izvjesnog gubitka energije. Taj se gubitak snage ne može ni na koji način izbjeći, jer se u prijenosnim vodovima zbog struje stvara toplina. Ispravnim dimenzioniranjem vodova treba nastojati, da taj gubitak snage ne bude prevelik, jer to iz ekonomskih razloga ne bi bilo povoljno.

Vodove dakle treba dimenzionirati ne samo s obzirom na mehaničku čvrstoću, ugrijavanje i pad napona (o čemu je bilo govora na strani 36.) već i s obzirom na gubitak snage, koji iz ekonomskih razloga ne smije prijeći izvjesnu granicu.

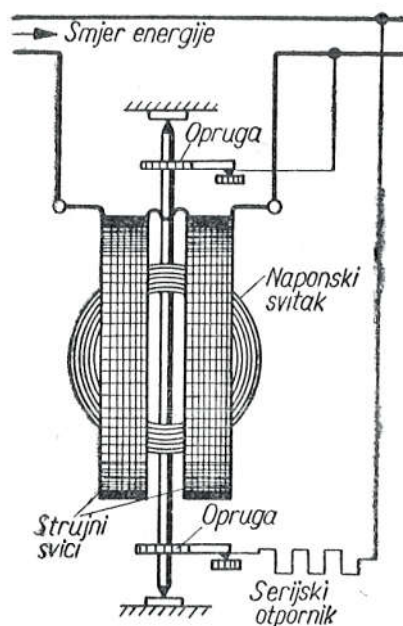
Zadatak 133. Koliki je gubitak snage u vodu 500 (250; 750) m dugom, presjeka 25 (50; 35) $\text{mm}^2 \text{ Al}$, ako kroza nj teče struja 30 (40; 15) A?

Zadatak 134. Vodom duljine 800 (500; 250) m, presjeka 25 (50; 10) $\text{mm}^2 \text{ Cu}$ napaja se elektromotor od 15 (3,3; 4,5) KS, 440 (110; 220) V, kojemu je korisnost 83 (77; 78) %. Koliki je gubitak snage u tom vodu?

Zadatak 135. Koliki mora biti presjek voda s bakrenim vodičima, dugačkog 660 (330; 240) m, kojim se napaja elektromotor od 440 (220; 440) V, 15 (6; 11) kW, $\eta = 84,5$ (78,5; 83) %, ako gubitak snage ne smije biti veći od 7 (8; 6) %?

7.14. MJERENJE SNAGE

Mjerenje električne snage vrši se pomoću instrumenata, koji se nazivaju *vatmetri*. Kao i gotovo svi drugi električni mjerni instrumenti i ti se instrumenti osnivaju na magnetskom djelovanju struje. Shemu ovakvog vatometra prikazuje slika 86. Struja teče kroz svitak (odnosno na našoj shemi 2 svitka) s malo zavoja, a razmjerno debelom žicom, koji je spojen u strujni krug upravo tako, kako se spaja ampermetar. Kad struja teče kroz svitak, on



Sl. 86. Vatmetar ima 4 stezaljke: Na 2 stezaljke priključuje se kao ampermetar, a na 2 kao voltmetar.

se vlada kao magnet. Unutar toga svitka, koji se obično naziva strujni svitak, a koji je nepomičan, nalazi se pomični svitak s razmjerno mnogo zavoja tanke žice. Ovaj se svitak može zakretati oko svoje osi, ali se tom njegovu zakretanju odupiru opruge. Ovaj svitak je priključen kao voltmetar, a u seriju je s njim kao i kod voltmetra spojen otpornik velikog otpora. Ovaj se svitak naziva naponski svitak, jer je struja, koja kroza nj teče, razmjerna s naponom, na koji je on priključen. Naponski svitak će se iz svog početnog položaja to jače zakrenuti, svladavajući pritom otpor opruga, što je jača struja kroz strujni svitak i što je jača struja kroz naponski svitak, t. j. što je viši napon. Njegov zakret bit će prema tome razmjeran umnošku struje i napona, a to znači razmjeran električnoj snazi. Na osovini pomičnog, naponskog svitka nalazi se kazaljka, koja na skali vatmetra pokazuje mjerenu snagu.

7.15. ČEMU VISOKI NAPON?

Danas se električna energija nastoji proizvoditi samo u velikim elektranama smještenim na nalazištima jeftine energije, na pr. na mjestima, gdje se mogu iskoristiti vodne snage, na ugljenicima, u vezi s tvornicama i gradovima, koji trebaju velike količine topline i t. d. Kod toga treba vodovima prenijeti velike snage od nekoliko hiljada ili desetaka hiljada kilovata, a kadšto i ogromne snage od nekoliko stotina hiljada kilovata na veće ili manje daljine. Takav se prijenos danas vrši, kako je poznato, vodovima visokog napona. No zašto se za takve prijenose upotrebljava visoki napon, te zašto se i prijenosi velikih snaga na velike daljine ne mogu izvršiti uz upotrebu našeg normalnog niskog napona od 220 V?

Da ovo objasnimo, uzmimo prijenos ne baš prevelike snage od 3000 kW uz napon od 220 V. Struja bi u tom slučaju iznosila:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{3\,000\,000}{220} = 13\,600 \text{ A.}$$

Kad bismo uzeli opterećenje 2 A/mm² presjeka (što je razmjerno vrlo mnogo kod tako velikog presjeka), bio bi za navedenu struju potreban presjek

$$S = \frac{13\,600}{2} = 6800 \text{ mm}^2,$$

a to bi bio fantastično velik presjek vodiča! Uz takav presjek vodiča bili bi vodovi neobično skupi, a i njihova bi tehnička izvedba nailazila na znatne poteškoće. Ako bismo, međutim, za taj prijenos upotrebili napon 30 000 V, bila bi struja:

$$I = \frac{3\,000\,000}{30\,000} = 100 \text{ A.}$$

a ta bi se struja lako dala svladati presjekom, recimo 70 mm². Istina, u ovom drugom slučaju bit će izolacija svih uređaja znatno skuplja, no čitav će prijenos biti ipak daleko ekonomičniji nego niskim naponom.

Ako uzmemo u obzir i pad napona i gubitak snage, koji nastaju kod prijenosa većih snaga na iole veće daljine, postaje još očitije, da su za takve prijenose neophodni viši naponi.

27. primjer. Koliki je gubitak snage u postocima, ako snagu 100 kW prenosimo na daljinu 10 km vodom od 16 mm² Cu, i to a) uz napon 1 kV, b) uz napon 10 kV?

Rješenje:

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,018 \cdot 2 \cdot 10\,000}{16} = 22,5 \, \Omega.$$

Struja

$$\text{kod 1 kV: } I = \frac{100}{1} = 100 \text{ A.}$$

$$\text{kod 10 kV: } I = \frac{100}{10} = 10 \text{ A.}$$

Gubitak snage:

$$\text{kod 1 kV: } I^2 R = 100^2 \cdot 22,5 = 225\,000 \text{ W} = 225 \text{ kW,}$$

$$\text{kod 10 kV: } I^2 R = 10^2 \cdot 22,5 = 2\,250 \text{ W} = 2,25 \text{ kW.}$$

Procentualni gubitak snage:

$$\text{kod 1 kV: } \frac{225}{100} \cdot 100 = 225 \, \%.$$

$$\text{kod 10 kV: } \frac{2,25}{100} \cdot 100 = 2,25 \, \%.$$

Kod 10 puta višeg napona procentualni gubitak snage je $10^2 = 100$ puta manji. Kod 2 puta višeg napona procentualni gubitak snage je $2^2 = 4$ puta manji, kod 3 puta višeg napona je $3^2 = 9$ puta manji i t. d. Kod istosmjerne struje to sve jednako vrijedi i za procentualni pad napona.

Kod prijenosa većih snaga na veće daljine potrebni su dakle viši naponi. *Napon potreban za prijenos električne energije to je viši, što se prenosi veća snaga i što je daljina prijenosa veća.*

8. MAGNETSKO POLJE I NJEGOVI UČINCI

8.1. MAGNETSKO POLJE

U prostoru oko nekih tijela, koja nazivamo magnetima, i oko vodiča, kojima teče struja, opažamo neke naročite pojave:

1. Magnetska igla dovedena u taj prostor zauzima u svakoj točki neki točno određeni smjer (vidi na pr. sliku 5.).

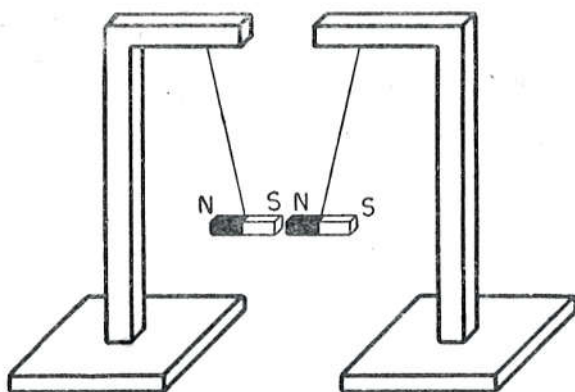
2. Magneti i vodiči, kojima teče struja, djeluju na drugi vodič, kojim teče struja, nekom silom: oni ga privlače ili odbijaju (vidi na pr. slike 7., 8. i 9.).

3. U vodiču, koji se giba u tom prostoru, inducira se — kako ćemo još vidjeti — neka elektromotorna sila.

Sve ove pojave nazivamo *magnetskim* odnosno *elektromagnetskim* pojavama, a prostor, u kojemu zamjećujemo ove pojave, nazivamo *magnetskim poljem*. U biti nema nikakve razlike između magnetskog polja magneta i magnetskog polja vodiča, kojim teče struja.

8.2. MAGNETIZAM

Sposobnost nekih tijela, da u svojoj okolini stvaraju magnetsko polje, nazivamo *magnetizam* ili *magnetičnost*. Za takva tijela kažemo, da su magnetska i nazivamo ih *magnetima*.



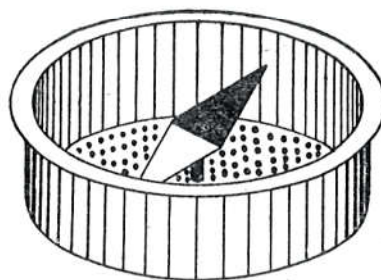
Sl. 87. Istoimeni magnetski polovi međusobno se odbijaju, a raznoimeni se privlače.

te ga označujemo slovom S*. Pokusima se može ustanoviti, da se sjeverni polovi međusobno odbijaju, a isto tako da se međusobno odbijaju i južni polovi. Sjeverni i južni pol se, naprotiv, privlače. Odatle proizlazi pravilo: *Istoimeni magnetni polovi se međusobno odbijaju, a raznoimeni privlače.*

I Zemlja (zemaljska kugla) velik je magnet. Svaki slobodno zavješeni, dovoljno lagani magnet postaviti će se zbog magnetičnosti Zemlje na jednom te istom mjestu uvijek u jednom te istom smjeru, i to uvijek tako, da isti kraj pokazuje na istu stranu. Magnet se uvijek postavlja gotovo točno u smjer sjever-jug, i odatle su potekla imena magnetnih polova. Onaj kraj magneta, koji pokazuje prema sjeveru, nazvan je sjevernim polom, a onaj kraj, koji pokazuje prema jugu, južnim polom. Budući da se raznoimeni polovi privlače, nalazi se južni magnetni pol Zemlje u blizini sjevernog geografskog pola. Magnetni i geografski polovi Zemlje ne poklapaju se posvema, pa stoga magnet ne pokazuje sasvim točno u smjeru sjever-jug. No to odstupanje od točnog smjera nije znatno, pa se za mnoge praktične svrhe može

Magneta ima prirodnih i umjetnih. Prirodni magneti su neke željezne rudače, prije svega magnetit. Umjetni magneti su oni, koji su postali magnetski izvjesnim postupcima. Kako, vidjet ćemo kasnije.

Približimo li međusobno dva magneta, koji su slobodno zavješeni tako, da se mogu okretati oko osi (slika 87.), vidjet ćemo, da se neki krajevi magneta međusobno privlače, a neki odbijaju. Krajeve magneta nazivamo polovima. Jedan pol nazivamo sjevernim i obilježujemo ga slovom N*, a drugi pol južnim



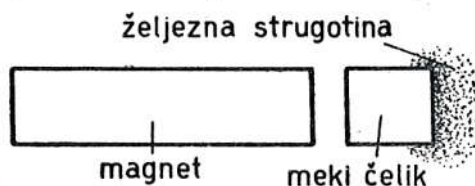
Sl. 88. Magnetska igla pod utjecajem magnetizma Zemljine kugle pokazuje svojim sjevernim polom prema sjevernom polu Zemlje, jer je tamo južni magnetski pol Zemlje.

* Internacionalne oznake, koje potječu od engleskih riječi north (čitaj: nort) = sjever i south (čitaj: saut) = jug.

zanemariti. Svima su poznati lagani, baš u tu svrhu građeni trajni magneti (slika 88.), koji služe za određivanje smjera, a nazivaju se *kompas* ili *bussola*. Svaki pak lagani, sasvim tanki trajni magnetič, koji je pričvršćen tako, da se može okretati oko neke osi, nazivamo *općenito magnetska igla*.

Ako u blizinu nekog magneta dovedemo komad željeza* (najbolje mekog čelika), postat će i taj komad magnetičan, što se pokazuje na pr. po tome, da taj komad privlači željeznu strugotinu (sl. 89.). Ta će magnetičnost potrajati samo tako dugo, dok se taj komad željeza (čelika) nalazi u blizini magneta. Željezo (čelik) magnetiziraju se dakle pod utjecajem magnetskog polja, a mogu se magnetizirati i druge tvari, samo što je njihova sposobnost magnetiziranja različita. One tvari, koje privlače i magneti osrednje jakosti, nazivaju se *feromagnetičnima***.

Sl. 89. Meki čelik doveden u blizinu magneta postaje magnetičan. Njegov magnetizam traje samo dotle, dok se nalazi u magnetskom polju magneta.



netični su nikalj i kobalt. Izvanredno jaki magneti djeluju međutim gotovo na sve tvari: gotovo sve se tvari daju u izvjesnoj, barem maloj mjeri magnetizirati. Pritom se pojedine tvari različito vladaju; neke tvari magnet privlači, a neke odbija. One tvari, koje magnet privlači, nazivaju se *paramagnetičnima*. To su na pr. mangan, krom, cer, titan, paladij, osmij i gotovo sve željezne slitine. One pak tvari, koje magnet odbija, nazivaju se *dijamagnetičnima*. To su na pr. bizmut, antimon, cink, kositar, olovo, srebro, bakar, zlato. U praksi često smatramo magnetičnima samo feromagnetične tvari, a ostale tvari smatramo nemagnetičnima, jer je njihova magnetičnost neznatna.

Vidjeli smo, da ima dvije vrste električnih naboja, pozitivnih i negativnih, te da se istoimeni naboji međusobno odbijaju, a raznoimeni privlače. Slično se i istoimeni magnetni polovi odbijaju, a raznoimeni privlače. No dok jedno tijelo može biti pozitivno električno, a drugo negativno, *nema takvog magneta, koji bi imao samo sjeverni ili samo južni pol*. Svaki magnet bez obzira na veličinu i oblik ima s jedne strane sjeverni, a s druge strane južni pol. Između polova nalazi se takozvana neutralna zona, t. j. pojas, u kojem magnet ne pokazuje nikakva magnetska svojstva. Razrežemo li neki magnet napola po neutralnoj zoni, pojavit će se magnetizam na novim krajevima obje polovine. Ta se pojava ne da ni na koji način izbjeći i ona pokazuje, da nema nekih magnetskih naboja ili magnetskih masa, kao što se je nekada smatralo, već da magnetske pojave treba drukčije tumačiti. Kako, bit će pokazano u poglavlju 8.20.

8.3. JAKOST I SMJER MAGNETSKOG POLJA, MAGNETSKE SILNICE

Dovedemo li magnetsku iglu u blizinu nekog magneta, djelovat će na nju magnetsko polje tog magneta. Pomicanjem magnetske igle u razne točke oko magneta (slika 90.) zamijetit ćemo:

1. da magnet djeluje na magnetsku iglu najjače u blizini polova, t. j. da je tamo najjača mehanička sila;

* Željezo je ovdje opći naziv za čelik, lijevano željezo i ostale vrste željeza.

** Od latinske riječi *ferrum* = željezo. Feromagnetični su dakle željezo i takve tvari, kojih je magnetičnost po jakosti slična magnetičnosti željeza.

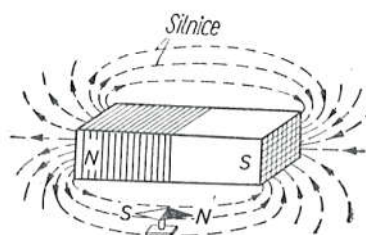
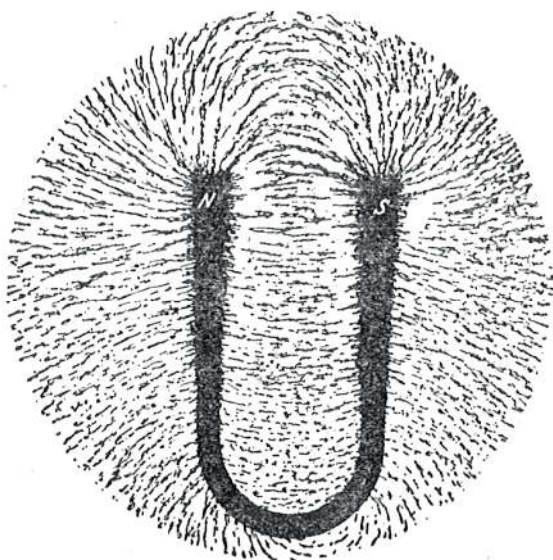
2. da magnetska igla u svim točkama prostora zauzima neki točno određeni položaj, u pojedinoj točki uvijek isti, kolikogod puta magnetsku iglu doveli u tu točku.

Što magnetsko polje u nekoj točki prostora jače djeluje na magnetsku iglu (ili na bilo koji drugi magnet), to jače je, kažemo, magnetsko polje u toj točki. Mehanička sila, kojom polje djeluje na magnete u nekoj točki, mjera je dakle za jakost magnetskog polja u toj točki.

Smjer, u koji se postavlja magnetska igla u nekoj točki prostora, smatramo smjerom magnetskog polja u toj točki. Pritom, dogovorno, pozitivnim smjerom magnetskog polja smatramo onaj, u kojem pokazuje sjeverni pol magnetske igle.

Zornu sliku o smjeru magnetskog polja u pojedinim točkama možemo dobiti ovim jednostavnim pokusom. Na magnet u obliku potkove (slika 91.) stavimo komad stakla ili kartona, pa to staklo ili karton pospemo sitnom željeznom strugotinom. Pritom treba po staklu ili kartonu lako tuckati rukom, kako bi se odstranio utjecaj trenja, pa kako bi se željezna strugotina mogla porazmjestiti samo pod utjecajem magnetskog polja. Strugotina se tako porazmjesti, da dobijemo sliku nekih linija, koje idu od jednog pola do drugoga. Stavimo li iznad bilo koje točke takve linije magnetsku iglu, postaviti će se ona točno u smjeru te linije. Te nam dakle linije pokazuju smjer magnetskog polja.

I doista, da magnetsko polje učinimo zornim, zamišljamo, da je ono ispunjeno takvim linijama, koje nazivamo *silnice* (slika 90). Silnice izlaze iz sjevernog pola magneta i ulaze u njegov južni pol, čineći pritom veće ili manje lukove. No silnice nam ne predočuju samo smjer magnetskog polja, već je njihova gustoća razmjerna s jakošću magnetskog polja. Što je jakost magnetskog polja na nekom mjestu veća, to treba da silnice na tom mjestu budu gušće nacrtane. Gustoća silnica na nekom mjestu daje nam dakle sliku o jakosti magnetskog polja na tom mjestu.



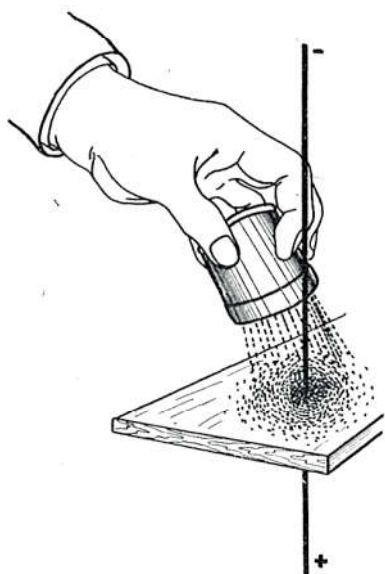
Sl. 90. Magnetsko polje ravnog magneta predočujemo silnicama. Smjer magnetskog polja pokazuje magnetska igla.

← Sl. 91. Željezna strugotina postavlja se na staklenoj ploči ili kartonu iznad magneta u smjeru silnica.

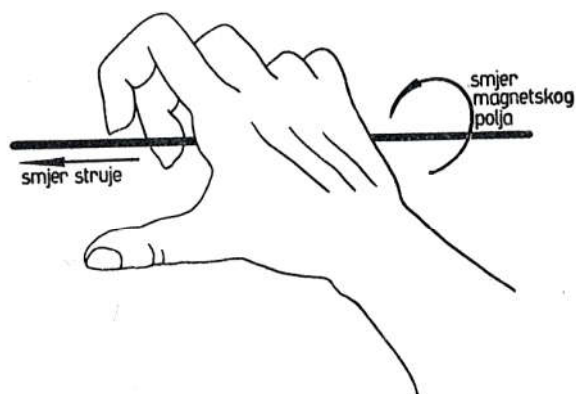
8.4. MAGNETSKO POLJE PRUŽENOG VODICA

Kao što je već rečeno na strani 12., ako magnetsku iglu dovedemo u blizinu vodiča, kojim teče struja, ona će se otkloniti i zauzeti prema vodiču točno određen položaj. To znači, da se i oko vodiča, kojim teče struja, stvara

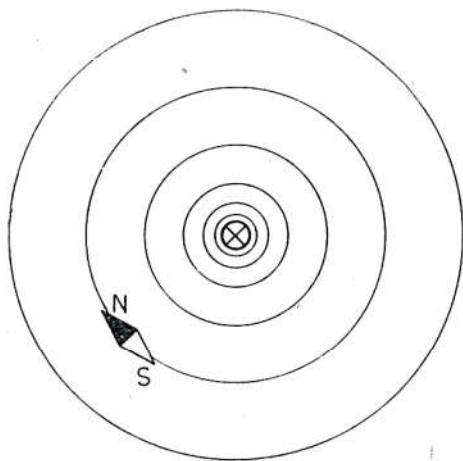
magnetsko polje. Kakvo je to polje, prikazuje nam slika 92., na kojoj vidimo, kako se željezna strugotina poslagala oko takvog vodiča, i slika 5., iz koje se vidi položaj magnetske igle prema takvom vodiču. *Magnetsko polje oko*



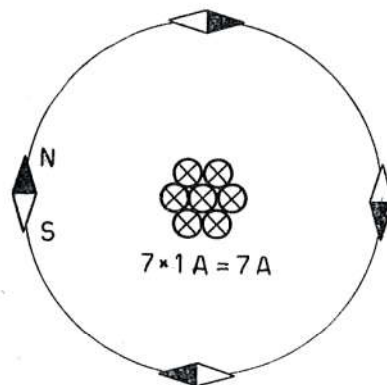
Sl. 92. Oko vodiča, kojim teče struja, željezna se strugotina postavlja u obliku kružnica. Magnetsko polje oko takvog vodiča je kružno polje.



Sl. 93. Pravilo desne ruke: Ruku stavimo oko vodiča tako, da palac pokazuje smjer struje, pa će nam prsti pokazivati smjer magnetskog polja.



Sl. 94. Silnice oko vodiča, kojim teče struja, jesu kružnice.



Sl. 95. Magnetsko polje oko vodiča je jače, što je jača ukupna struja. Kod toga je svejedno, da li je to, na pr., struja od 7 A u jednom vodiču ili struja od 1 A u svakom od 7 vodiča.

vodiča, kojim teče struja, kružno je polje. Njegov smjer pokazuje sjeverni pol magnetske igle. Najlakše ćemo njegov smjer upamtiti pomoću pravila desne ruke (slika 93.). Ako palac pokazuje smjer struje, onda prsti pokazuju smjer magnetskog polja.

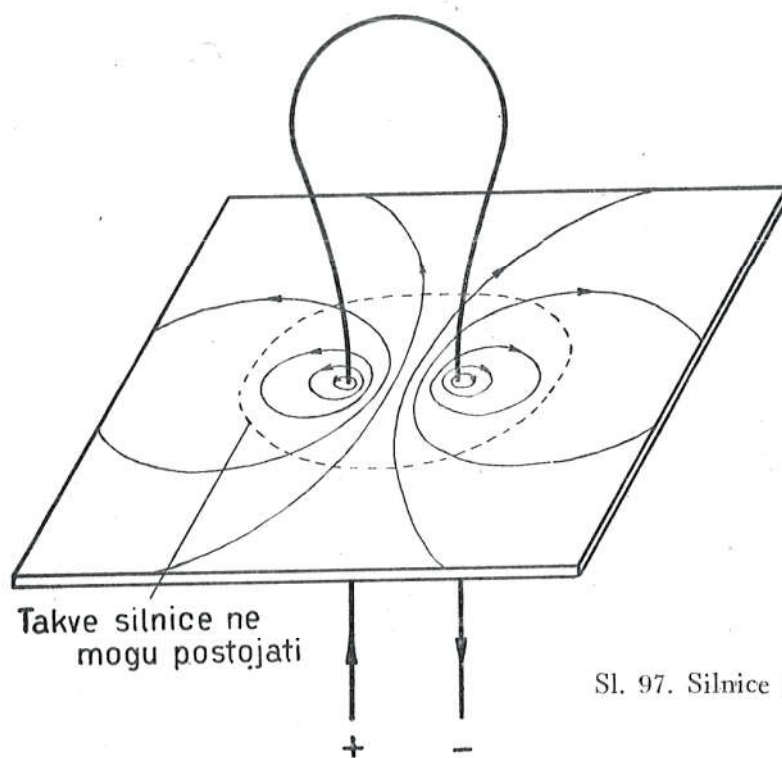
Kružno magnetsko polje proizvodi kružne silnice kao na slici 94.* Silnice su sami krugovi sa zajedničkim središtem u osi vodiča. Silnice su najgušće oko samog vodiča, jer je oko vodiča polje najjače, a što dalje od vodiča, to su silnice rjeđe, jer *jakost polja opada s udaljenošću od vodiča*.

Magnetsko polje oko vodiča to je jače, što kroz vodič teče jača struja. Dva-put jača struja izaziva dvaput jače polje, triput jača struja triput jače polje i t. d.

Ako mjesto jednog vodiča imamo snop od nekoliko vodiča, na pr. 7 kao na slici 95., jakosti magnetskog polja pojedinih vodiča međusobno se zbrajaju. Magnetsko polje bit će isto tako jako, kao da imamo jedan vodič, ali da u njemu teče 7 puta jača struja. Ako na pr. u svakom vodiču teče struja 1 A, ukupna je struja $7 \times 1 = 7$ A. O toj ukupnoj struji ovisi jakost magnetskog polja u okolnom prostoru.

8.5. MAGNETSKO POLJE SVITKA

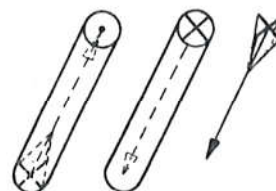
Magnetsko polje oko vodiča, kojim teče struja, uvijek je kružno, dakle ne samo onda, kad je vodič ravan, pružen. Vodič možemo saviti u svi-



Sl. 97. Silnice jednog zavoja.

tak ili kakogod drukčije, oko svakog dijela vodiča stvara se kružno magnetsko polje. No kod vodiča, koji nije ravan, polje jednoga njegova dijela

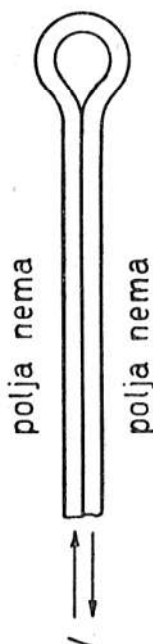
* Kod vodiča, koji je okomit na papir ove knjige smjer struje označuje se ovako: $\odot$ smjer struje iz papira, $\otimes$ smjer struje prema papiru. Prvi znak smatra se vrhom, a drugi znak repom strelice prema slici 96.



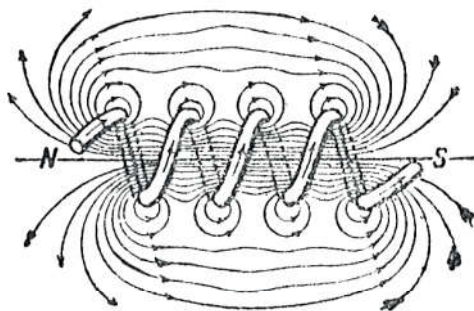
Sl. 96.

djeluje u istom prostoru kao i polje drugoga njegova dijela, pa se ta polja zbrajaju, nastaje neko rezultatno, ukupno polje, koje više nije kružno.

Promotrimo najprije jedan zavoj nekog vodiča, prikazan na slici 97., i to u naznačenoj ravnini. Polje jednog dijela vodiča istiskuje polje drugog dijela vodiča, pa silnice oko vodiča nisu više krugovi. Nijedna se silnica ne može zatvoriti oko obje strane vodiča, kao



Sl. 98. Oko ovakvog vodiča nema magnetskog polja, jer je ukupna struja jednaka nuli.

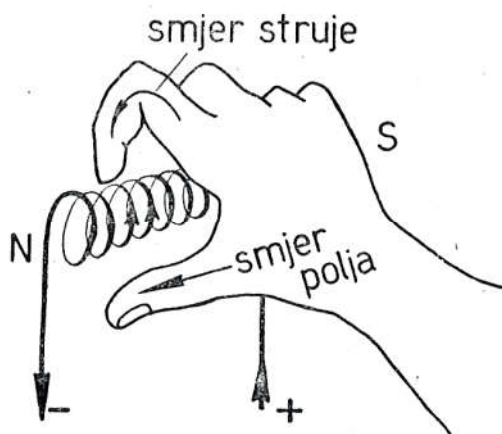


Sl. 99. Svitak, kojim teče struja, vlada se kao magnet. Njegovo je magnetsko polje slično polju pruženog magneta.

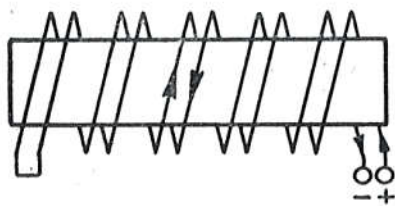
što je to crtkano naznačeno na slici 97., jer je ukupna struja kroz takvu silnicu jednaka nuli, pa silnica ne može postojati. Nikakva silnica ne može postojati oko dva vodiča, kojima teče jednaka struja u protivnom smjeru. Oko vodiča na slici 98. nema prema tome nikakvih silnica.

Promotrimo sad silnice svitka kao na slici 99. Pojedine silnice obuhvaćaju sve vodiče jedne strane svitka, jer kroz te vodiče teče struja u istom smjeru, pa imamo prilike slične kao na slici 95. Slika silnica izvan svitka praktički je jednaka kao kod ravnog magneta na slici 90. Silnice na jednoj strani izlaze iz svitka, a na drugoj ulaze u svitak. Prema tome se svitak mora vladati kao ravan magnet, i to tako, da mu sjeverni pol bude na strani, gdje silnice izlaze, a južni pol na strani, gdje one ulaze. I doista svitak se tako i vlada. On privlači komadiće mekog čelika upravo tako, kao svaki obični magnet (slika 6.). Međutim, *magnetičnost svitka postoji samo tako dugo, dok teče struja, i ona je razmjerna sa strujom: ona je to jača, što je struja jača. Čim nestane struje, nestane i magnetičnosti.*

Polarnost svitka, t. j. s koje je strane sjeverni, a s koje južni pol, možemo jednostavno odrediti opet pomoću *pravila desne ruke*. Samo što nam ovaj put prsti pokazuju smjer struje, a palac smjer magnetskog polja unutar svitka (slika 100.). Sjeverni pol se nalazi u smjeru magnetskog polja.



Sl. 100. Smjer magnetskog polja svitka određuje se po pravilu desne ruke. Prste postavimo tako, kako struja »obilazi«
svitkom, pa će nam palac pokazati smjer polja.

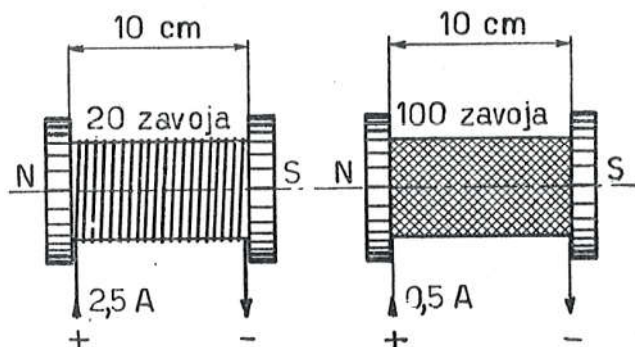


Zadatak 136. Svitak namotan prema slici 101. ne proizvodi nikakvo magnetsko polje (bifilarno* namatanje). Rastumači zašto!

Sl. 101. Bifilarno namatanje — magnet-skog polja nema.

8.6. IZRAČUNAVANJE JAKOSTI MAGNETSKOG POLJA SVITKA

Rekli smo, da jakost magnetskog polja ovisi o jakosti struje. Polje u sredini svitka bit će to jače, što je jača struja, koja teče kroz svitak. Uzmimo na pr. svitak 10 cm dugačak, koji ima 20 zavoja (slika 102.). Neka kroz taj svitak teče struja 2,5 A. Ako bismo struju smanjili na 0,5 A, dakle na jednu petinu, jakost polja bi se smanjila također na jednu petinu. No ako uzmemo drugi svitak posve jednak kao prvi samo sa 100 zavoja, a kroz koji teče struja 0,5 A, pokazuje mjerenje, da je jakost polja u sredini svitka posve jednaka kao kod svitka sa 20 zavoja, kad kroza nj teče struja 2,5 A. Za jakost polja važan je umnožak broja zavoja i jakosti struje, slično kao što jakost polja snopa vodiča prema slici 95. ovisi o umnošku broja vodiča i jakosti struje u njima. Budući da se struja mjeri u amperima, umnožak struje i broja zavoja naziva se amperzavojima. Na stvaranje magnetskog polja u oba svitka na slici 102. djeluje jednak broj amperzavoja: 50.



Sl. 102. Jakost magnetskog polja u sredini svitka ovisi o broju amperzavoja po jedinici duljine.

Još je jedan činilac bitan za jakost polja u sredini svitka. To je duljina svitka. Nije svejedno, da li je 100 zavoja namotano na duljinu od 10 cm ili 50 cm. Važno je, koliko je zavoja namotano po jedinici duljine svitka. Jakost magnetskog polja ovisi o broju amperzavoja po jedinici duljine svitka.

Kao jedinicu za mjerenje jakosti magnetskog polja možemo uzeti onu jakost polja, koja vlada u svitku s jednim amperzavojem po metru njegove duljine, budući da je metar osnovna jedinica duljine. Jakost magnetskog polja mjeri se dakle u amperzavojima po metru ili, kraće, u amperima po metru (oznaka A/m), budući da se zapravo radi o ukupnom broju ampera po m duljine svitka.** Polje jakosti 1 A/m vladalo bi na pr. u svitku dugačkom 1 m, koji ima 1000 zavoja, a kroz koje teče struja 1 mA = 0,001 A, jer je 0,001 A $\times$ 1000 zavoja = 1 amperzavoj po metru ili 1 A/m.

Jakost magnetskog polja može se mjeriti i u amperima po cm, kako je to označeno na slici 102., gdje imamo 50 amperzavoja na 10 cm, t. j. 5 amper-

* Bifilarno = sa dvije niti, jer se namata dvostrukom žicom.

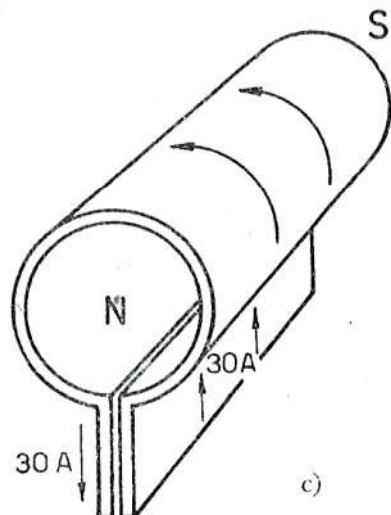
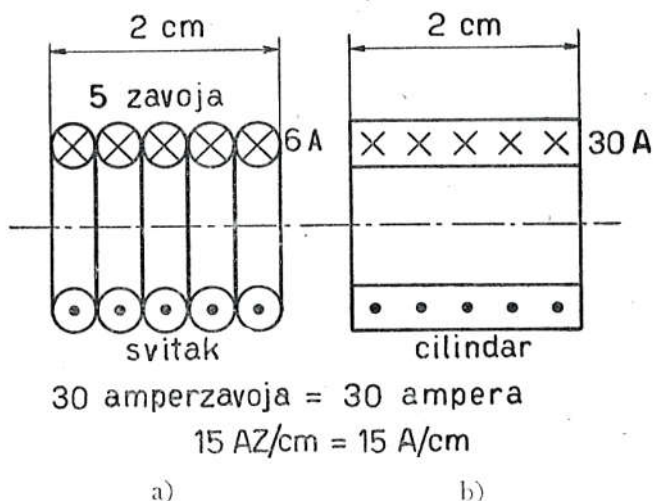
** Svitak, dakako, ne mora biti dugačak 1 m ili više. Za usporedbu, kad na pr. kažemo, da neko vozilo juri brzinom 100 km na sat, to vozilo ne mora prijeći 100 km odnosno voziti 1 sat. Kilometri na sat jesu samo jedinica za mjerenje brzine upravo tako, kao što su amperi po metru jedinica za mjerenje jakosti magnetskog polja.

zavoja po cm. Ako na nekom svitku ima 5 amperzavoja po cm, a svitak je dugačak 1 m, tada bi na tom svitku bilo ukupno 500 amperzavoja, a jakost magnetskog polja bila bi 500 A/m. Odatle proizlazi, da je

$$1 \text{ A/cm} = 100 \text{ A/m}.$$

Iz izvjesnih razloga danas se polje normalno mjeri u A/m, pa ćemo tu jedinicu upotrebljavati i u ovoj knjizi.

Zašto možemo amperzavoje po metru nazivati naprosto amperima po metru, odnosno amperzavoje po centimetru amperima po centimetru, objašnjuju slike 103.a do c. Prilike su s obzirom na jakost magnetskog polja jednake, imamo ili umjesto svitka cilindar prema slici 103c., koji je u presjeku pri-



Sl. 103 a i b. Amperzavoje po centimetru ili amperi po centimetru — to je u stvari isto.

Sl. 103 c. Cilindar sa slike 103 b.

kazan na slici 103.b. Umjesto da struja 6 ampera teče kroz 5 zavoja, dakle 5 puta »okolo naokolo« — kao kod svitka, sasvim je isto, ako struja $6 \times 5 = 30$ A teče samo jedamput »okolo naokolo« — kao kod cilindra. Kao da su se naši svici stopili zajedno. Važno je dakle samo to, koliko imamo ukupno ampera po centimetru.

$$\text{Jakost polja (A/cm odn. A/m)} = \frac{\text{broj amperzavoja}}{\text{duljina svitka (cm odn. m)}},$$

odnosno:

$$H = \frac{IN}{l}$$

H — jakost magnetskog polja (A/m),

I — jakost struje (A),

N — broj zavoja svitka,

l — duljina svitka (m).

Jakost magnetskog polja u osi nekog svitka duljine $l = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$, koji ima $z = 200$ zavoja, a kroz koji teče struja 0,5 A, bit će

$$H = \frac{IN}{l} = \frac{0,5 \cdot 200}{0,2} = 500 \text{ A/m}.$$

Može se čak pokazati, da je polje ne samo u osi svitka, nego i u svim točkama unutar svitka približno jednako. Prema tome će u cijelom svitku vladati polje 500 A/m.

Treba naglasiti, da se u jedinicama A/m ne mjeri samo jakost polja unutar svitaka. U tim se jedinicama može mjeriti i mjeri se jakost makar kakvoga magnetskog polja, na pr. polja nekog običnog magneta. Ako je na pr. u nekoj točki u blizini takvog magneta jakost magnetskog polja 50 A/m, znači, da je polje u toj točki jednako jako kao unutar svitka sa 50 amperzavoja po metru duljine toga svitka.

Zadatak 137. Kolika je jakost magnetskog polja H u svitku sa 50 (2500; 120) zavoja, kojim teče struja 3 (0,1; 10) A? Duljina svitka je 10 (30, 20) cm.

Zadatak 138. Kolika bi bila jakost magnetskog polja u prethodnom zadatku, ako bismo struju smanjili na polovicu?

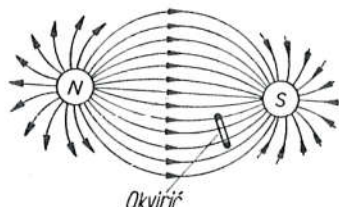
Zadatak 139. Kolika bi bila jakost magnetskog polja H u svitku, ako bi svitak imao jednaki broj zavoja kao u zadatku 137. i kroza nj bi tekla jednaka struja, ali bi on bio dvaput dulji?

8.7. MAGNETSKA INDUKCIJA, MAGNETSKE LINIJE, MAGNETSKI TOK

Vidjeli smo u 8.2 (slika 89.), da se komad mekog čelika doveden u magnetsko polje i sam magnetizira pod utjecajem magnetske indukcije. Ovo magnetiziranje je to jače, što je jače magnetsko polje, a smjer tog magnetiziranja je isti kao i smjer silnice u dotičnoj točki.

Magnetska indukcija ili magnetska uzbuđenost je naročito stanje u magnetskom polju, koje postoji bez obzira na prisutnost mekog čelika ili kakve druge feromagnetične tvari, ali se očituje magnetiziranjem tih tvari. Pa kao što smo jakost magnetskog polja učinili zornim pomoću silnica, tako isto možemo i magnetsku indukciju učiniti zornom pomoću linija, koje ćemo nazivati *magnetskim linijama*, a koje u svakoj točki prostora pokazuju smjer indukcije. Kao što se silnicama može prikazati ne samo smjer nego i jakost magnetskog polja, može se magnetskim linijama prikazati ne samo smjer nego i jakost indukcije, i to tako, da se one nacrtaju na nekom mjestu to gušće, što je indukcija na tom mjestu jača.

Budući da magnetska indukcija ima isti smjer kao i magnetske silnice, imaju magnetske linije posve isti oblik kao i silnice. Prema tome silnice prikazane na slikama 90., 94., 97. i 99. možemo smatrati i magnetskim linijama.



Sl. 104. Magnetske linije idu od sjevernog pola N prema južnom polu S. — Magnetski tok kroz okvirić određen je brojem magnetskih linija, što prolaze kroz taj okvirić.

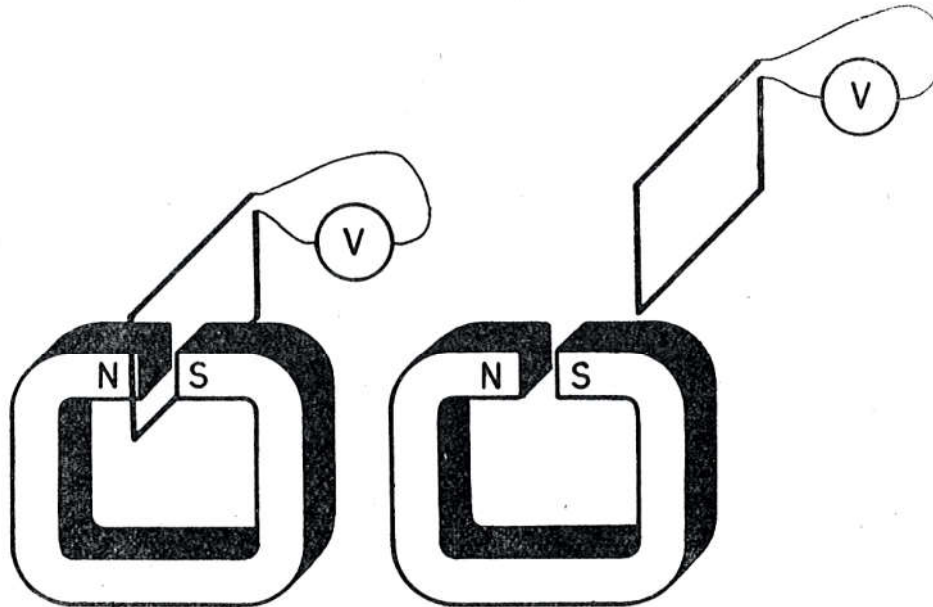
Zamislamo, da potkovičasti magnet poput onoga na slici 91. postavimo okomito na ovu knjigu tako, da mu polovi ostavljaju trag kao na slici 104. Na toj su slici nacrtane i magnetske linije (jednaka je i slika magnetskih silnica!); one idu od sjevernog pola N prema južnom polu S. Stavimo li okomito na magnetske linije između pola N i S sitan okvirić, prolazit će kroz taj okvirić izvjestan broj magnetskih linija. Ukupni broj magnetskih linija, što prolaze kroz taj okvirić, nazivamo *magnetski tok* kroza nj. Općenito, *magnetski tok* kroz neku površinu je ukupni broj magnetskih linija, što prolaze kroz tu površinu. Ukupni pak broj svih magnetskih linija nekoga magneta je ukupni magnetski tok toga magneta.

Odmah ćemo vidjeti, da je značenje magnetskog toka vrlo veliko.

8.8. ELEKTROMAGNETSKA INDUKCIJA PROMJENOM TOKA

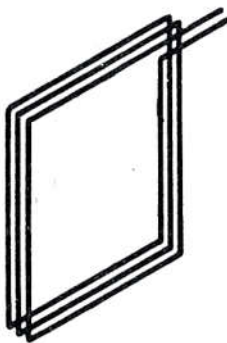
Uzmimo magnet i metalni okvir prema slici 105. Okvir neka je na jednom mjestu otvoren tako, da ne predstavlja sam za sebe zatvoreni strujni

krug. Na tom mjestu priključimo voltmetar, pa je strujni krug sada zatvoren preko voltmetra. Stavimo taj metalni okvir između magnetnih polova, pa ga nakon toga naglo izvucimo van. Ako pritom promatramo voltmetar, vidjet ćemo, da je on pokazao otklon, a nakon toga da se opet vratio na nulu. Ako sada taj okvir naglo stavimo natrag između polova magneta, voltmetar će ponovo pokazati otklon, ali ovaj put u protivnom smjeru.



Sl. 105. Ako metalni okvir naglo izvučemo ili ga naglo stavimo između polova magneta, voltmetar pokazuje otklon: inducirala se elektromotorna sila zbog promjene magnetskog toka, koji prolazi kroz okvir.

Dok se okvir nalazi između magnetnih polova, kroza nj prolazi magnetski tok. Ako metalni okvir pomikemo tako, da on ostane između polova magneta te da se ne mijenja magnetski tok, koji kroza nj prolazi, voltmetar ne će pokazivati nikakva otklona. Samo *promjena magnetskog toka, koji prolazi kroz neku petlju, izaziva u toj petlji postanak elektromotorne sile*. Ova, za elektrotehniku tako izvanredno važna pojava, naziva se *elektromagnetska indukcija*. Elektromotorna sila, koja na taj način nastaje, naziva se *inducirana elektromotorna sila*.



Sl. 106. U okviru s 3 zavoja inducirala bi se triput veća elektromotorna sila nego u okviru s jednim zavojem (pod inače jednakim okolnostima).

Veličina inducirane elektromotorne sile ovisi:

1. o veličini magnetskog toka; što je magnetski tok veći, inducirana će elektromotorna sila biti veća; dvaput veći tok inducira se dvaput veću elektromotornu silu;

2. o brzini gibanja: što je gibanje brže, to će elektromotorna sila biti veća; kod dvaput veće brzine, bit će elektromotorna sila dvaput veća;

3. o broju zavoja petlje: da je naš okvir na slici 105. imao tri zavoja kao onaj na slici 106., u svakom bi se zavoju inducirala, zbog promjene

toka, jednaka elektromotorna sila. Ove bi se tri elektromotorne sile zbrajale, pa bi ukupna elektromotorna sila bila triput veća. Što je dakle broj zavoja petlje veći, inducirana elektromotorna sila bit će veća.

Ukratko, *elektromotorna sila, koja se inducira u svakom zavoju, ovisi o promjeni toka u jedinici vremena, t. j. u jednoj sekundi.* Ako je na pr. tok, koji prolazi kroz neki svitak, spao u jednoj sekundi od 1000 magnetskih linija na 900, inducirana elektromotorna sila bit će jednaka kao i onda, ako bi tok spao od 100 magnetskih linija na nulu. U jednom i u drugom slučaju promjena toka iznosi 100 magnetskih linija po sekundi, a samo i jedino to je mjerodavno za veličinu inducirane elektromotorne sile.

Na pojavi elektromagnetske indukcije osnivaju se svi strojevi za proizvodnju električne energije, električni generatori.

8.9. JEDINICE MAGNETSKOG TOKA I MAGNETSKE INDUKCIJE

Osnovna jedinica magnetskog toka je veber*, oznaka Wb. 1 veber je onaj magnetski tok, koji u strujnom krugu s jednim zavojem inducira elektromotornu silu 1 volt, ako ga u jednoj sekundi jednoliko smanjimo na nulu:

$$1 \text{ veber po sekundi (Wb/s)} = 1 \text{ V.}$$

Općenito je:

$$\text{inducirana elektromotorna sila (V)} = \frac{\text{promjena toka (Wb)}}{\text{vrijeme (s)}},$$

ili slovima:

$$E = \frac{\Phi'}{t} \quad (\Phi - \text{veliko grčko slovo „fi“})$$

Veber je vrlo velika jedinica za magnetski tok, pa se mogu upotrebiti i manje jedinice miliveber (oznaka mWb) i mikroveber (oznaka μWb); $1 \text{ Wb} = 1000 \text{ mWb} = 1\,000\,000 \mu\text{Wb}$. Osim toga se u elektrotehničkoj praksi još dosta upotrebljava stara, sto milijuna puta manja jedinica meskvel**, oznaka M:

$$1 \text{ Wb} = 100\,000\,000 = 10^8 \text{*** M}; 1 \text{ mWb} = 100\,000 \text{ M}; 1 \mu\text{Wb} = 100 \text{ M}.$$

28. *primjer*: Magnetski tok mijenja se tako, da se u jednoj tisućinki sekunde = 0,001 s promijeni za 0,01 Wb. Kolika je inducirana elektromotorna sila?

Rješenje:

$$E = \frac{\Phi'}{t} = \frac{0,01}{0,001} = 10 \text{ V.}$$

* Po njemačkom fizičaru Weberu.

** Po čuvenom engleskom fizičaru Maxwell-u (čitaj Meksvel).

*** Vrlo veliki i vrlo mali brojevi pišu se jednostavnosti radi na ovaj način:

1. Vrlo veliki brojevi: Na pr. 10^4 (čitaj: deset na četvrtu potenciju, ili: naprosto: deset na četvrtu) znači 10 pomnožen sam sa sobom 4 puta, t. j. $10^4 = 10 \cdot 10 \cdot 10 \cdot 10 = 10\,000$. Dakle 10^4 znači broj s jedinicom naprijed i 4 nule iza toga. $10^8 = 100\,000\,000$, t. j. broj s jedinicom naprijed i 8 nula iza toga.

2. Vrlo mali brojevi: na pr. 10^{-8} (čitaj: deset na minus osmu) jest obrnuta vrijednost od 10^8 :

$$10^{-8} = \frac{1}{10^8} = \frac{1}{100\,000\,000} = 0,000\,000\,01.$$

Rekli smo, da je magnetski tok kroz neku površinu jednak broju magnetskih linija, koje prolaze kroz tu površinu. Za grafički prikaz možemo magnetski tok predstaviti povoljnim brojem magnetskih linija. Te magnetske linije možemo, na primjer, nacrtati tako, da svakom miliveberu odgovara jedna magnetska linija.

Magnetske linije nisu u svim točkama oko magneta jednako guste, kako to prikazuju slike 90. i 99. Gdje su magnetske linije gušće, tamo je magnetska indukcija (ili magnetska uzbuđenost) veća, tamo je magnetski tok gušći. *Magnetska indukcija nije drugo već gustoća magnetskog toka*, t. j. magnetski tok kroz jedinicu površine, kroz koju taj magnetski tok prolazi.

$$\boxed{B = \frac{\Phi}{S}} \quad \text{odnosno} \quad \Phi = BS.$$

Ako magnetski tok Φ mjerimo u veberima, a površinu S u m^2 , bit će jedinica magnetske indukcije tesla* (oznaka T) = Wb/m^2 . Ponekad se međutim još upotrebljava stara jedinica gaus** (oznaka G), koja je 10 000 puta manja od jedinice tesla. Jedinica gaus za magnetsku indukciju B dobije se, ako se magnetski tok Φ mjeri u meksvelima, a površina S u cm^2 . Vrijedi dakle:

$$\boxed{1 \text{ T} = \frac{1 \text{ Wb}}{1 \text{ m}^2}}$$

$$\boxed{1 \text{ G} = \frac{1 \text{ M}}{1 \text{ cm}^2}}$$

$$\boxed{1 \text{ T} = 10\,000 \text{ G}}$$

jedinica tesla je dosta velika jedinica za slabu magnetsku indukciju, pa se stoga može upotrebiti manja jedinica militesla (oznaka mT), koja je 1000 puta manja od T, kao što je mm hiljadu puta manji od m. $1 \text{ T} = 1000 \text{ mT}$; $1 \text{ mT} = 10 \text{ G}$. Lako možemo izračunati magnetsku indukciju B u bilo kojoj udaljenosti od ravnog (pruženog) vodiča po formuli:

$$B = \frac{2I}{10\,000\,000 a} \text{ tesla,}$$

gdje je I — struja kroz vodič u amperima, a — udaljenost od vodiča u metrima, B — magnetska indukcija u teslama. Na pr. u udaljenosti 5 cm od vodiča, kojim teče struja 100 A, magnetska indukcija iznosi:

$$B = \frac{2 \cdot 100}{10\,000\,000 \cdot 0,05} = 0,0004 \text{ T} = 0,4 \text{ mT} = 4 \text{ G.}$$

8.10 ODNOS IZMEĐU JAKOSTI MAGNETSKOG POLJA I MAGNETSKE INDUKCIJE

Jakost magnetskog polja i magnetska indukcija dvije su karakteristične veličine magnetskog polja. Rekli smo, da je magnetska indukcija B to jača, što je jakost magnetskog polja H veća i da im je smjer isti. U zraku vrijedi:

$$B = \frac{1,25}{1\,000\,000} H \quad \text{odnosno} \quad H = 800\,000 B,$$

gdje je B magnetska indukcija u teslama, a H jakost magnetskog polja u amperima po m. Treba naglasiti, da taj odnos vrijedi samo u zraku i u takvim tvarima, kojih se magnetičnost može zanemariti. U čeliku i željezu (i u drugim magnetičnim materijalima) taj je odnos sasvim drukčiji.

* Po slavnom izumitelju Jugoslavena Nikoli Tesli. Ova je jedinica tako prozvana na kongresu Internacionalne elektrotehničke komisije (IEC) u Filadelfiji u septembru 1954.

** Prema jednom od najvećih matematičara Gaussu.

Za svitak na strani 101., duljine 20 cm, sa 200 zavoja, kroz koji teče struja 0,5 A, izračunali smo jakost magnetskog polja $H = 5 \text{ A/cm} = 500 \text{ A/m}$. Magnetska indukcija jest:

$$B = \frac{1,25}{1\,000\,000} H = \frac{1,25 \cdot 500}{1\,000\,000} = \frac{6,25}{10\,000} \text{ T (tesla)} = 0,625 \text{ mT} = 6,25 \text{ G (gausa)}.$$

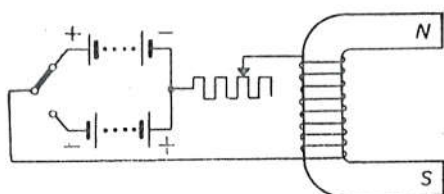
Ako je presjek svitka $S = 8 \text{ cm}^2 = \frac{8}{10\,000} \text{ m}^2$, iznosi magnetski tok kroz taj svitak:

$$\Phi = BS = \frac{6,25}{10\,000} \cdot \frac{8}{10\,000} = \frac{50}{100\,000\,000} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ Wb} = 0,5 \mu \text{ Wb}.$$

$$\text{ili } \phi = BS = 6,25 \text{ gaussa} \times 8 \text{ cm}^2 = 50 \text{ M (meksvela)}.$$

8.11. UTJECAJ ŽELJEZA — KRIVULJE MAGNETIZIRANJA

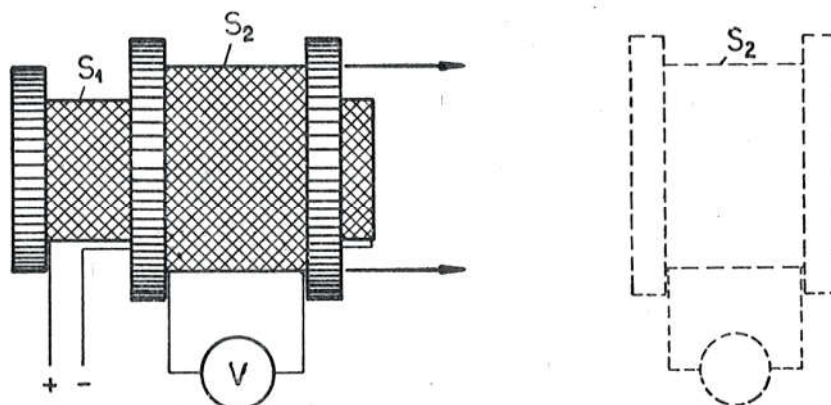
Namotajmo izvjestan broj zavoja oko svinutog komada mekog čelika kao na slici 107., pa pustimo kroz tako dobiveni svitak sa čeličnom jezgrom (svitak sa čelikom) struju. Već pomoću obične magnetske igle možemo ustanoviti, da je magnetsko djelovanje svitka znatno jače nego onda, kad se unutar svitka ne nalazi meki čelik. Takav svitak sa čelikom može privući znatno veće komade čelika ili lijevanog željeza: takav svitak sa čelikom je *elektromagnet*.



Sl. 107. Magnetsko djelovanje svitka znatno se pojačava, ako se u njemu nalazi meki čelik (»svitak sa čelikom«).

Promotrimo utjecaj čelika u svitku još jednim pokusom. Uzmimo prema slici 108 dva svitka S_1 i S_2 . Na svitak S_1 priključimo izvor struje, a na svitak S_2 voltmetar. Kad

svitak S_2 naglo skinemo i odmaknemo od svitka S_1 , inducirat će se u njemu elektromotorna sila, voltmetar će pokazati otklon. Ta elektromotorna sila posljedica je promjene magnetskog toka, koji prolazi kroz svitak. Dok se drugi svitak nalazi na prvom, prolazi i kroza nj tok, koji prolazi i kroz prvi

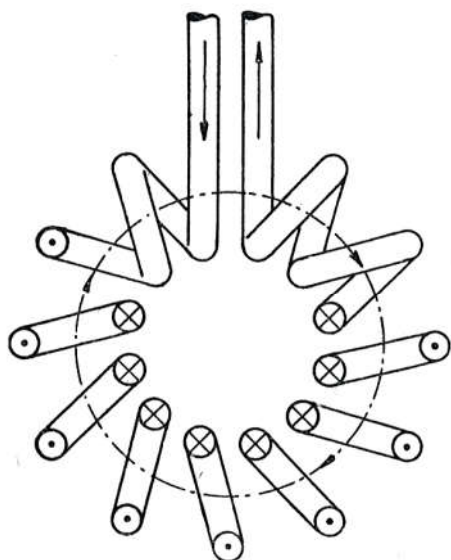


Sl. 108. Kad svitak S_2 naglo skinemo sa svitka S_1 ili ga naglo nataknemo natrag, inducira se u S_2 elektromotorna sila. Ona je znatno veća, ako je u svitku S_1 čelična jezgra.

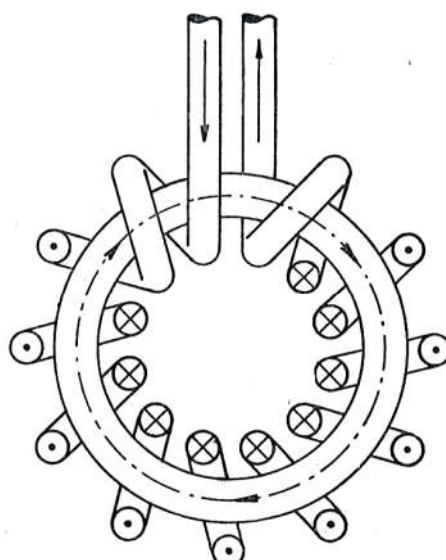
svitak, a kad ga skinemo i odmaknemo, ne prolazi kroza nj više nikakav tok. No ta inducirana elektromotorna sila ne će biti jednaka bez obzira, da li se u svitku S_1 nalazi čelik ili ne. Kad se u svitku nalazi čelik, bit će inducirana elektromotorna sila znatno veća.

Očito je dakle, da prisutnost čelika izaziva pojačanje magnetskog toka. Pitanje je samo, zašto?

Na slici 89. vidjeli smo, da meki čelik postaje u magnetskom polju i sam magnetičan, da komad mekog čelika postaje magnet. To se događa uvijek, bez obzira na to, odakle potječe samo magnetsko polje, da li od kakvog trajnog magneta kao na slici 89. ili od svitka kao na slici 107. Kad stavimo komad čelika u svitak kao na slici 107., postaje on i sam magnet, pa njegovo magnetsko polje podupire magnetsko polje svitka. Što je polje svitka jače, to će se čelik jače magnetizirati, pa će i magnetski tok, a s njim i magnetska indukcija biti veći.



Sl. 109. Kružni svitak bez čelika:
Magnetska indukcija B je mala.



Sl. 110. Kružni svitak sa čelikom:
Magnetska indukcija B je nekoliko stotina do nekoliko hiljada puta veća nego unutar svitka bez čelika.

Uzmimo dva kružna svitka poput onih na slikama 109. i 110. Dok se u prvom ne nalazi ništa, osim, dakako, zraka, dotle je drugi namotan na prsten od mekog čelika. Jakost magnetskog polja u prvom svitku možemo lako izračunati; ona iznosi:

$$H = \frac{IN}{l},$$

a odatle možemo također lako izračunati i magnetsku indukciju po formuli:

$$B = \frac{1,25 H}{1\,000\,000}.$$

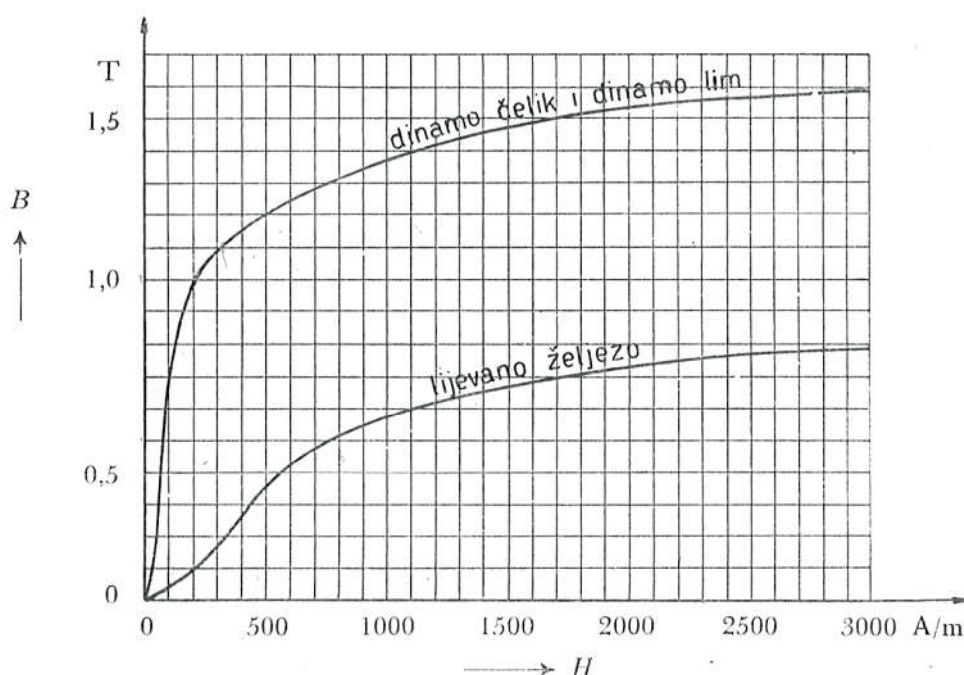
Međutim, u drugom svitku bit će magnetska indukcija zbog prisustva čelika mnogostruko veća, jer se čelik pod utjecajem magnetskog polja H namagnetizira. Koliko iznosi ta magnetska indukcija B , ne da se izračunati, ako ne znamo magnetske karakteristike dotične vrste čelika, jer se različite vrste čelika vrlo različito magnetiziraju. Ima međutim različitih načina, pomoću kojih se magnetska indukcija B daje mjeriti, pa se lako daje ustanoviti mjerenjem, da je magnetska gustoća pri istoj jakosti struje kroz svitak nekoliko stotina do nekoliko hiljada puta veća kod svitka sa čelikom kao na slici 110. nego kod svitka bez čelika. Ovaj omjer:

$$\frac{B \text{ sa čelikom}}{B \text{ bez čelika}} = \mu$$

nazivamo *permeabilnost* ili *magnetska propustljivost*. Što je magnetska propustljivost veća, to bolje dotični čelik »propušta« magnetski tok. Magnetska propustljivost ovisi o dva faktora, i to:

1. ona je vrlo različita kod različitih vrsti čelika i
2. ona se jako mijenja u zavisnosti od struje kroz svitak odnosno, točnije, u zavisnosti od jakosti magnetskog polja H uzrokovanog strujom kroz svitak.

Zavisnost magnetske indukcije B u čeliku odn. lijevanom željezu od jakosti magnetskog polja H uzrokovanog strujom kroz svitak prikazuje se redovito grafički kao na sl. 111. Na vodoravnoj osi nanosena je jakost magnetskog polja H , a na okomitoj osi veličina magnetske indukcije B . Na slici su prikazane dvije krivulje, koje se međusobno jako razlikuju: jedna za lijevano željezo, a druga za normalni dinamo-lim ili dinamo-čelik.



Sl. 111. Krivulje magnetiziranja.

Ovakve krivulje nazivaju se krivulje magnetiziranja. Različite krivulje magnetiziranja za lijevano željezo i za dinamo-čelik pokazuju, da su magnetska svojstva tih dvaju materijala različita, kako se vidi čak vrlo različita. Dok u dinamo-čeliku već polje 200 A/m izaziva magnetsku indukciju 1 T (tesla), dotle u lijevanom željezu 15 puta jače polje 3000 A/m izaziva magnetsku indukciju koja ne doseže niti 0,8 T.

No još se nešto razabire iz slike 111. Dok je uz $H = 200$ A/m magnetska indukcija $B = 1$ T (za dinamo-čelik), dotle uz 10 puta jače polje $H = 2000$ A/m ne iznosi B deset puta više, t. j. 10 T, već samo nešto preko 1,5 T. Kod porasta H magnetska indukcija B raste sve polaganije: kažemo, da čelik i željezo postaju magnetski zasićeni, magnetska propustljivost sve više i više opada.

28. primjer: Uzmimo svitak sa 100 zavoja, namotan na prsten od dinamo-čelika poput onoga na slici 110. Srednji promjer prstena neka iznosi 20 cm.

Izračunajmo jakost magnetskog polja H , magnetsku indukciju B i magnetsku propustljivost μ za struju kroz svitak 0,2 A, 0,5 A, 1 A, 3 A i 15 A.

Rješenje. Jakost magnetskog polja H izračunamo po formuli

$$H = \frac{IN}{l},$$

$$l = d\pi = 20\pi = 62,8 \text{ cm} = 0,628 \text{ m}.$$

Za struje $I = 0,2 \ 0,5 \ 1 \ 3 \ 15 \text{ A}$
dobijemo dakle $H = 32 \ 80 \ 150 \ 480 \ 2390 \text{ A/m}$.

Iz krivulje magnetiziranja za dinamo-čelik na slici 111. dobijemo
za jakost magn. polja $H = 32 \ 80 \ 150 \ 480 \ 2390 \text{ A/m}$
magnetsku indukciju $B = 0,1 \ 0,5 \ 0,9 \ 1,19 \ 1,57 \text{ T}$

Magnetsku indukciju B_0 svitka, kad ne bi bilo u njemu čelika, možemo izračunati pomoću formule:

$$B_0 = \frac{1,25 H}{1\,000\,000}$$

Dakle za	$H =$	32	80	150	480	2390	A/m
dobijemo	$B_0 =$	$\frac{40}{1\,000\,000}$	$\frac{100}{1\,000\,000}$	$\frac{190}{1\,000\,000}$	$\frac{600}{1\,000\,000}$	$\frac{2980}{1\,000\,000}$	T
odnosno	$B_0 =$	$\frac{0,4}{10\,000}$	$\frac{1,0}{10\,000}$	$\frac{1,9}{10\,000}$	$\frac{6,0}{10\,000}$	$\frac{29,8}{10\,000}$	T.

Magnetsku propustljivost μ izračunamo pomoću formule:

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

pa za $H = 32 \ 80 \ 150 \ 480 \ 2390 \text{ A/m}$
dobijemo $\mu = 2500 \ 5000 \ 4740 \ 1980 \ 530$.

Kako se vidi, magnetska propustljivost kod vrlo malih jakosti magnetskog polja H raste s pojačavanjem magnetskog polja, ali ubrzo počinje naglo opadati.

30. primjer. Koliki je magnetski tok u 29. primjeru, ako poprečni presjek prstena iznosi 20 cm^2 ?

Rješenje. Magnetski tok jednak je umnošku magnetske indukcije i presjeka, kroz koji tok prolazi:

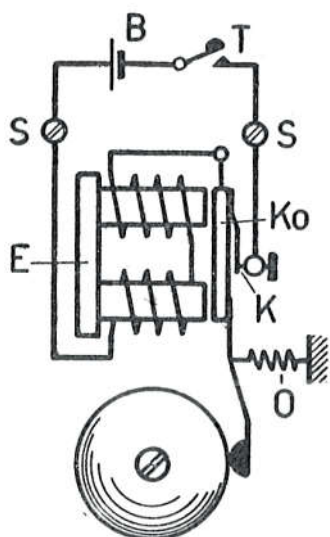
$$\Phi = BS.$$

Da dobijemo magnetski tok u veberima, moramo magnetsku indukciju B uvrstiti u teslame, a presjek S u m^2 . Računamo sasvim jednako kao na str. 106. gore, pa odatle za

struju $I = 0,2 \ 0,5 \ 1 \ 3 \ 15 \text{ A}$
dobijemo $\Phi = 0,2 \ 1,0 \ 1,8 \ 2,38 \ 3,14 \text{ mWb}$.

Zadatak 140. 1000 (500; 3000) zavoja tanke žice namotano je na prsten od dinamo-čelika, poput onoga na slici 110. Prsten ima srednji promjer 30 (20; 25) cm i presjek $100 \ (25; 30) \text{ cm}^2$. Kroz svitak pustimo redom struje 0,1 A, 0,3 A, 1 A (0,1 A, 0,4 A, 1,2 A; 0,02 A, 0,1 A, 0,5 A). Koliko će iznositi kod tih struja:

- jakost magnetskog polja H ,
- magnetska indukcija B ,
- magnetska propustljivost μ ,
- magnetski tok Φ ?



Sl. 112. Električno zvonce.

Zadatak 141. Na prsten od dinamo-čelika, poput onoga na slici 110., namotano je 200 (80; 30) zavoja žice. Prsten ima srednji promjer 15 (25; 50) cm, a presjek 10 (40; 200) cm². Kolika struja mora teći kroz žicu, da u prstenu nastane magnetski tok 1,2 (4,0; 30,0) mWb.

Zadatak 142. Na slici 112. prikazano je obično električno zvonce. Na njegove stezaljke S priključena je baterija B, a u strujnom krugu zvonceta i baterije nalazi se tipkalo T, kojim zvonimo. Kad pritisnemo tipkalo, elektromagnet E čas privuče, čas ispusti kotvu Ko, te tako otvara i zatvara kontakt K. Rastumači:

a) zašto elektromagnet privuče kotvu;

b) zašto je ispusti;

c) od kakvog materijala moraju biti elektromagnet i kotva: od drva, mekog dinamo-čelika ili tvrdog čelika za permanentne magnete i zašto;

d) koji je smjer magnetskog toka kroz elektromagnet i kotvu (smjer kazaljke na satu ili protivan, gledajući na sliku 112.);

e) da li bi zvonce zvonilo, ako bismo bateriju obratno priključili (ako bismo izmijenili polove)?

8.12. MAGNETSKI KRUG

Kad kroz svitak na slici 110. protječe struja, nastaje u čeličnom prstenu unutar svitka magnetski tok. Taj magnetski tok proizvode amperzavoji, t. j. umnožak ampera, koji teku kroz svitak, s brojem zavoja svitka. Pa kao što smo kod električne struje uzročnika, pokretača struje nazvali elektromotornom silom, tako ovdje uzročnika, izazivača magnetskog toka nazivamo magnetomotornom silom. Dakle, *magnetomotorna sila jednaka je broju amperzavoja.*

Kao što električna struja teče po nekom samom u sebe zatvorenom putu, strujnom krugu, koji ne smije biti nigdje prekinut, tako ni magnetski tok ne može biti nigdje prekinut; on postoji na nekoj samoj u sebe zatvorenoj stazi, on se zatvara sam u sebe. Ta staza, na kojoj magnetski tok postoji, naziva se *magnetski krug.*

Magnetomotorna sila, amperzavoji, izazivaju dakle u magnetskom krugu stvaranje i održavanje magnetskog toka, koji postoji samo tako dugo, dok magnetomotorna sila djeluje, t. j. dok struja teče. No veličina magnetskog toka ne ovisi samo o veličini magnetomotorne sile, kao što ni struja u strujnom krugu ne ovisi samo o veličini elektromotorne sile, koja u tom strujnom krugu djeluje. Kao što jakost struje ovisi i o osobinama strujnoga kruga, o njegovu električnom otporu, tako i veličina magnetskog toka ovisi o osobinama magnetskog kruga, o njegovu — da tako kažemo — magnetskom otporu.

Uz jednaku magnetomotornu silu tok će biti veći, što je magnetski otpor manji i obratno. Pa kao što kod električnog strujnog kruga električni otpor ovisi o električnim osobinama materijala (t. j. o njegovom specifičnom otporu) te o duljini i presjeku strujnoga kruga, tako kod magnetskog kruga magnetski otpor ovisi o magnetskim osobinama materijala (t. j. o njegovoj magnetskoj propustljivosti) te o duljini i presjeku magnetskog kruga.

Sam se račun, međutim, kod magnetskog toka provodi ponešto drukčije nego kod električne struje. Glavni razlog tome jest, što je magnetska propusljivost, kao što smo vidjeli, vrlo promjenljiva, dok je električni otpor uglavnom konstantan te se samo s temperaturom nešto mijenja.

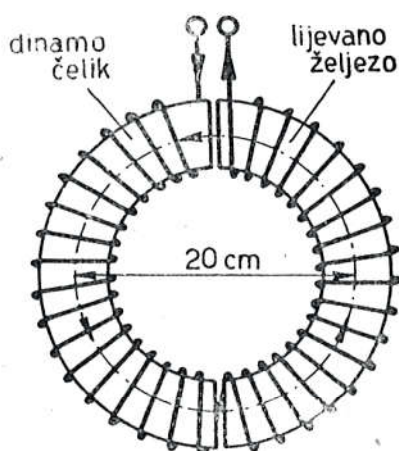
Već znamo, da se jakost magnetskog polja može izračunati po formuli:

$$H = \frac{IN}{l}$$

Odavle možemo izračunati magnetomotornu silu:

$$IN = Hl.$$

Uzmimo sad jednaki svitak kao u 28. primjeru, samo što ga namotajmo na 2 poluprstena (slika 113.), između kojih neka je razmak 1 mm. Jedan poluprsten neka je od dinamo-čelika, a drugi od lijevanog željeza. Ukupna duljina



Sl. 113. Magnetski krug sastavljen od različitih materijala: Magnetski otpor zračnih raspora znatno je veći od magnetskog otpora ostalih dijelova magnetskog kruga.

magnetskog kruga iznosi — kako smo izračunali u 28. primjeru — $l = 62,8$ cm. Ovaj se magnetski krug sastoji od:

dijela u dinamo-čeliku duljine	$l_1 = 31,3 \text{ cm} = 0,313 \text{ m}$
dijela u lijevanom željezu duljine	$l_2 = 31,3 \text{ cm} = 0,313 \text{ m}$
dijela u zraku ukupne duljine	$l_3 = 2 \cdot 0,1 = 0,2 \text{ cm} = 0,002 \text{ m}$
Ukupno	$l = 62,8 \text{ cm} = 0,628 \text{ m}$

Slično kao što se u električnom strujnom krugu elektromotorna sila »troši« na svladavanje električnog otpora u pojedinim njegovim dijelovima, tako se i ovdje magnetomotorna sila »troši« u pojedinim dijelovima magnetskog kruga:

$$IN = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 \dots$$

31. primjer. Kolika je magnetomotorna sila potrebna za održavanje toka 1,4 mWb kroz svitak prema slici 113., ako je presjek prstena 20 cm^2 ?

Rješenje: $\Phi = 1,4 \text{ mWb} = 0,0014 \text{ Wb}$; $S = 20 \text{ cm}^2 = 0,002 \text{ m}^2$. Prema tome je magnetska indukcija:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{0,0014}{0,002} = 0,7 \text{ T.}$$

Budući da je presjek svagdje jednak, bit će i magnetska indukcija svagdje jednaka. Iz krivulje magnetiziranja na slici 111. dobijemo, da je za stvaranje magnetske indukcije $B = 0,7 \text{ T}$ potrebna jakost magnetskog polja:

kod dinamo-čelika $H_1 = 100 \text{ A/m}$,
 kod lijevanog željeza $H_2 = 1720 \text{ A/m}$.

Za zrak vrijedi poznati odnos:

$$B_0 = \frac{1,25 H}{1\,000\,000}, \text{ t. j. } H_2 = \frac{1\,000\,000 B_0}{1,25} = \frac{1\,000\,000 \cdot 0,7}{1,25} = 560\,000 \text{ A/m}.$$

Da se prema tome kroz svitak »progura« tok $\Phi = 1,4 \text{ mWb}$, potrebna je magnetomotorna sila:

za poluprsten od dinamo čelika	$H_1 l_1 = 100 \cdot 0,313$	$= 31 \text{ A},$
za poluprsten od lijevanog željeza	$H_2 l_2 = 1720 \cdot 0,313$	$= 538 \text{ A},$
za oba zračna raspora	$H_3 l_3 = 560\,000 \cdot 0,002$	$= 1120 \text{ A}.$

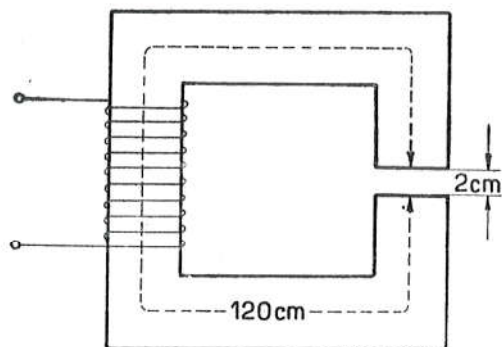
Ukupno $IN = 1689 \text{ A}.$

Budući da je $N = 100$ zavoja, potrebna je struja $1689 : 100 = 16,9 \text{ A}.$

Kako se vidi, *zrak predstavlja ogroman otpor za magnetski tok*. Za »guranje« toka kroz neznatna 2 raspora od 1 mm svaki potrebno je oko 36 puta više amperzavoja nego za guranje toga toka kroz poluprsten od dinamo-čelika! No to nije ni čudo, ako se sjetimo, da je magnetska propustljivost čelika i nekoliko hiljada puta veća nego magnetska propustljivost zraka.

Treba ovdje ukazati na bitnu razliku između električne struje i magnetskog toka. Dok električnim strujnim krugom teče stalna električna struja, potrebna je za njezino održavanje stalna elektromotorna sila. Struja je gibanje elektrona, a zbog toga gibanja nastaju neprestani gubici električne energije pretvaranjem u toplinu u otporu voda. Za održavanje stalnog magnetskog toka u magnetskom krugu potrebna je stalna magnetomotorna sila, ali nikakva energija. Izraz »tok« nije ovdje sretno odabran, jer ništa ne teče. *Magnetski tok ne teče, on samo postoji u magnetskom krugu*, a to samo znači, da je magnetski krug sijelo izvjesnog naročitog stanja, koje zorno predočujemo zatvorenim magnetskim linijama. Energija je ovdje potrebna samo za održavanje magnetomotorne sile, i to zbog stvaranja topline u amperzavojima, ali za održavanje samog magnetskog toka nije potrebna nikakva energija.

Zadatak 143. Uzmimo prsten iz zadatka 141., samo ga na jednom mjestu prepilimo tako, da ostane zračni raspor od 2 mm. Kolika struja mora sada teći kroz žicu, da ostane magnetski tok 1,2 (4,0; 30,0) vebera, t. j. jednak kao i prije.



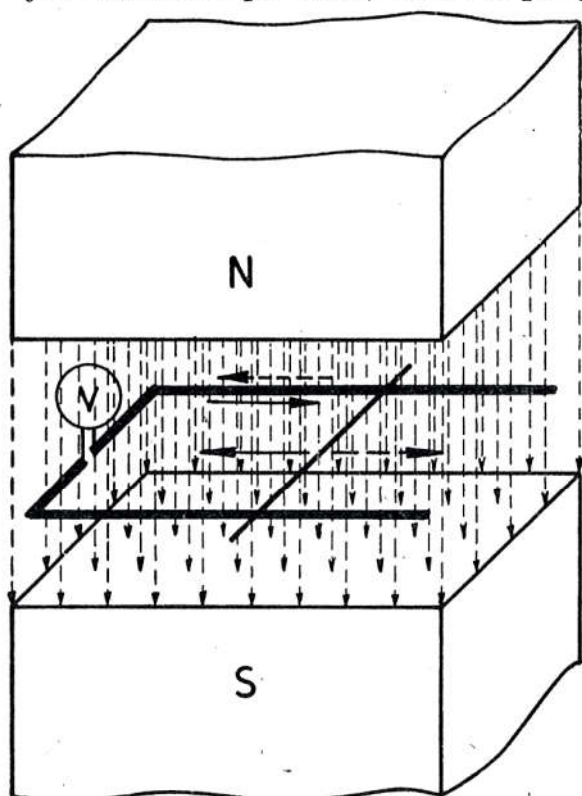
Sl. 114. Uz zadatak 144.

Zadatak 144. Na slici 114. prikazan je elektromagnet. Zbog struje, koja teče njegovim zavojima, nastaje u njemu magnetski tok. Treba izračunati, kolika je struja potrebna za stvaranje magnetskog toka 1 300 000 (2 520 000; 375 000) M uz ove uvjete:

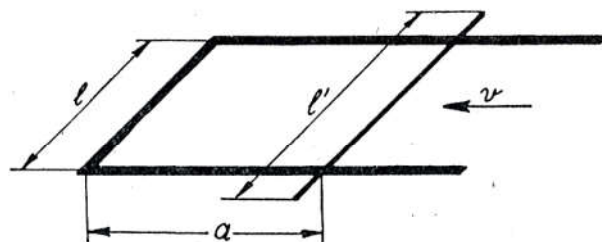
- magnet je od dinamo-čelika;
- prema slici 114. iznosi srednja duljina magnetskih linija u čeliku 120 (170; 76) cm, a zračni raspor 2 (1; 0,1) cm;
- presjek magneta je svagdje jednak te iznosi 100 (180; 25) cm²;
- na magnetu je namotano 1000 (2500; 800) zavoja.

8.13. ELEKTROMAGNETSKA INDUKCIJA SJEČENJEM MAGNETSKIH LINIJA

Uzmimo kao na slici 115. 2 žice, koje su s jedne strane spojene na voltmetar. Strujni krug, koji čine ove 2 žice i voltmetar, neka je zatvoren pomoću treće žice, koja može kliziti po prvim dvjema. Na taj način dobijemo metalni okvir, neku zatvorenu petlju, pa tu petlju stavimo između polova magneta. Između polova postoji magnetski tok, koji prolazi kroz petlju. Ako sada pomičemo pomičnu žicu po drugim dvjema žicama u jednom ili u drugom smjeru, povećat će se ili umanjiti magnetski tok, koji prolazi kroz petlju. A znamo već otprije, da svaka promjena toka, koji prolazi kroz bilo koju petlju, izaziva u toj petlji postanek, induciranje elektromotorne sile. Voltmetar će nam svojim otklonom pokazati, da se u petlji doista inducira elektromotorna sila.



Sl. 115. Elektromotorna sila inducira se u vodiču samo onda, kad taj vodič siječe magnetske linije.



Induciranje ove elektromotorne sile možemo promatrati i s drugog stajališta. Kad pomična žica klizi po drugim dvjema žicama, da li se još nešto događa osim toga, što se povećava ili smanjuje magnetski tok, koji prolazi kroz petlju? Pomična žica pri svom gibanju siječe magnetske linije, kojima zorno prikazujemo magnetski tok, a to znači, da siječe i sam magnetski tok. Što se žica brže giba, to će se brže mijenjati magnetski tok kroz petlju, a time će i inducirana elektromotorna sila biti veća. Što se žica brže giba, to će presjeći u jednoj sekundi veći broj magnetskih linija. Možemo stoga reći: *Inducirana elektromotorna sila bit će to veća, što žica presiječe veći broj magnetskih linija u jednoj sekundi.*

Može se čak pokazati, da je ovo sječenje magnetskih linija bitno za induciranje elektromotorne sile, i da inducirana elektromotorna sila nastaje samo u vodiču, koji na bilo koji način siječe magnetske linije. U našoj petlji sa slike 115. ne će se elektromotorna sila inducirati u svim stranicama petlje, kao što bi se možda moglo očekivati, već samo u žici, koja se giba.

Općenito, veličina elektromotorne sile, inducirane u nekom vodiču, koji na bilo koji način siječe magnetske linije, ovisi o broju linija presječenih u jednoj sekundi. Ovaj broj presječenih linija ovisi:

1. o magnetskoj indukciji, jer što je magnetska indukcija veća, to veći broj magnetskih linija otpada na 1 cm^2 ;

2. o brzini vodiča, jer što se vodič brže giba, to će više magnetskih linija presjeći u jednoj sekundi;

3. o duljini vodiča, koja se nalazi u magnetskom polju.

Treba naglasiti, da je pojava elektromagnetske indukcije jedna i sama jedna. Možemo je samo tumačiti bilo kao posljedicu promjene magnetskog toka kroz petlju, bilo kao posljedicu sječenja magnetskih linija. Naravno, brožani rezultati dobiveni na temelju jednog i drugog načina promatranja moraju biti posve jednaki.

Prema onomu, što smo naučili na strani 106., inducirana elektromotorna sila zbog promjene toka kroz petlju pri jednolikom mijenjanju toka iznosi:

$$E = \frac{\Phi}{t} \text{ volta.}$$

Žica, koja klizi, neka za vrijeme t dođe u krajnji položaj tako, da tok ϕ spadne na nulu. Ako znamo početni tok ϕ i vrijeme t , možemo iz gornje formule izračunati induciranu elektromotornu silu. No tu elektromotornu silu možemo izračunati i na drugi način. Ako se žica giba brzinom v m/s, ona će put a metara preći za vrijeme

$$t = \frac{a}{v} \text{ sekunda.}$$

Magnetski tok ϕ jednak je umnošku magnetske indukcije i presjeka, kroz koji on prolazi: $\phi = BS = Bla$. Ako ove izraze za ϕ i t uvrstimo u gornju formulu, dobijemo:

$$E = \frac{Bla}{\frac{a}{v}} = Blv \text{ volta.}$$

(Pazi: U ove formule treba uvrstiti ϕ u veberima, B u teslama, a i l u metrima, S u m^2 , a v u m/s.)

Potonja nam formula izrazuje matematički ono isto, što smo prije opisali riječima, t. j. da veličina inducirane elektromotorne sile ovisi o magnetskoj indukciji, o duljini vodiča, koji siječe magnetske linije, i o brzini gibanja, odnosno sječenja tih linija. Ova je formula matematički izraz za ovaj drugi način promatranja pojave elektromagnetske indukcije (sječenjem magnetskih linija). Izveli smo je iz formule, koja je matematički izraz za prvi način promatranja (promjenom toka kroz petlju). Odatle je jasno, da su to dva različita načina promatranja, koji dovode do istih rezultata.

U posljednju smo formulu stavili duljinu l , a ne cijelu duljinu l' žice, koja se giba. Ako se cijela duljina žice nalazi u magnetskom polju, induciirat će se elektromotorna sila po cijeloj njezinoj duljini l' . No u strujni krug, u koji je uključen voltmetar, uključena je samo duljina l žice, pa će voltmetar pokazati napon, koji odgovara elektromotornoj sili induciranoj samo na duljini l žice.

32. primjer. Duljina vodiča u magnetskom polju nekog generatora iznosi $l = 0,60 \text{ m}$, a njihova brzina $v = 40 \text{ m/s}$. Koliko će se volta inducirati u nekom vodiču namota toga generatora u trenutku, kad se taj vodič nalazi u magnetskom polju indukcije $B = 1,5 \text{ T}$.

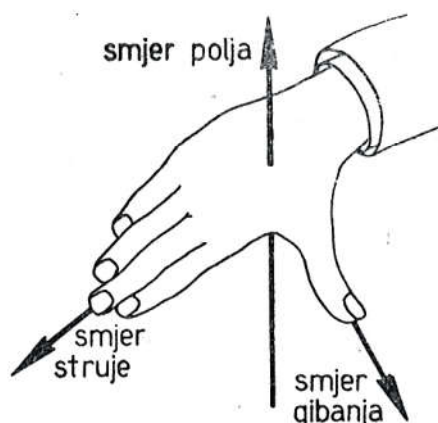
Rješenje:

$$E = Blv = 1,5 \cdot 0,60 \cdot 40 = 36 \text{ V.}$$

8.14 SMJER INDUCIRANE ELEKTROMOTORNE SILE

Dosada smo govorili o onim faktorima, koji utječu na veličinu inducirane elektromotorne sile, ali nismo rekli ništa o njezinu smjeru i o tome, kako se taj smjer može odrediti.

Kod vodiča, koji se giba, smjer se može vrlo jednostavno odrediti po pravilu desne ruke: Postavimo (slika 116.) desnu ruku tako, da silnice ulaze u njezin dlan, a palac da pokazuje smjer gibanja, pa će nam prsti pokazivati smjer inducirane elektromotorne sile. Na pr. na slici 115. neka se pomična žica giba nalijevo, inducirana elektromotorna sila imat će takav smjer, da će u strujnom krugu izazvati struju u smjeru kazaljke na satu.



Sl. 116. Smjer inducirane elektromotorne sile određuje se po pravilu desne ruke.

No u petlji na slici 115. može se elektromotorna sila inducirati ne samo zbog gibanja pomične žice, već i zbog svake promjene magnetskog toka, koji prolazi kroz petlju, nastala ta promjena na bilo koji način. A ta se promjena magnetskog toka kroz petlju daje izazvati i tako, da se cijela petlja naprosto ukloni između magnetskih polova, ili pak tako, da se ojača ili oslabi magnetsko polje pojačanjem ili oslabljenjem struje magnetiziranja. U ovim slučajevima ne da se tako lako odrediti smjer inducirane elektromotorne sile pomoću pravila desne ruke. Ali zato postoji još općenitije pravilo, prema kojemu se smjer inducirane elektromotorne sile može uvijek odrediti. To pravilo* glasi: *Smjer inducirane elektromotorne sile uvijek*

je takav, da bi proizvedena struja svojim magnetskim poljem nastojala spriječiti promjenu, koju je izazvala. Inducirana elektromotorna sila može, dakako, proizvesti struju samo onda, ako je strujni krug zatvoren. No o tome ne ovisi ni njezina veličina, ni njezin smjer.

Nastojmo na primjerima malo bolje osvijetliti značenje ovog pravila. Ako se pomična žica na slici 115. giba nadesno, povećat će se magnetski tok kroz petlju. To povećanje magnetskog toka kroz petlju je dakle ona promjena, koja izaziva inducirane elektromotorne sile. Struja, koju će elektromotorna sila proizvesti u petlji, nastojat će tu promjenu spriječiti, t. j. nastojat će, da magnetski tok kroz petlju ostane isti kao i dosada, da se ne poveća. Kako? Tako, što i inducirana struja stvara svoj magnetski tok (kao i svaka struja), a taj će tok biti protivnog smjera od magnetskog toka magneta, nastojat će ga oslabiti, t. j. spriječiti njegovo povećanje. Već smo na strani 99. naučili, kako se odnose smjer struje i smjer magnetskog toka kod svitka ili kod petlje, i da se to jednostavno daje prikazati desnom rukom (slika 100.). Ako smjer magnetskog toka inducirane struje treba da bude protivan smjeru toka magneta, lako je ustanoviti, da smjer struje u ovom našem strujnom krugu treba da bude obratan od smjera kazaljke na satu. Ako bi pak elektromotorna sila nastala kao posljedica smanjenja magnetskog toka kroz petlju, na pr. zbog slabljenja struje magnetiziranja magneta, lako bi bilo na isti način ustanoviti, da bi se smjer struje u strujnom krugu podudarao sa smjerom kazaljke na satu.

Treba primijetiti, da će inducirana elektromotorna sila izazvati struju samo onda, ako je strujni krug zatvoren. No smjer inducirane elektromotorne sile može se uvijek odrediti pomoću pravila, koje je netom opisano.

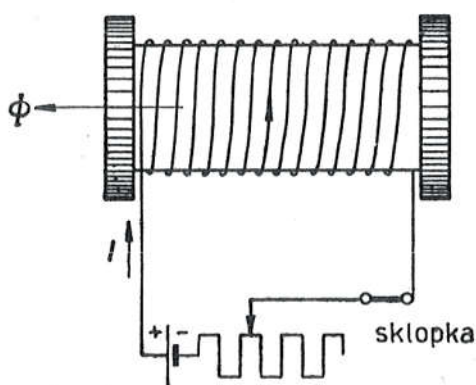
* To je pravilo poznato pod imenom Lenzov (čitaj Lencov) zakon.

8.15. SAMOINDUKCIJA

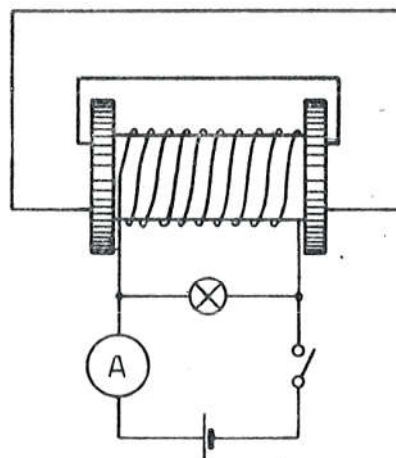
Priključimo svitak na izvor struje kao na slici 117. Promotrimo, što će se dogoditi, kad strujni krug pomoću sklopke zatvorimo ili prekinemo. Uzmimo najprije, da je strujni krug zatvoren, dakle da kroz svitak teče struja, pa da tu struju prekinemo isklapanjem sklopke.

Dok struja teče kroz svitak, ona stvara magnetsko polje, pa kroz sve zavoje svitka prolazi magnetski tok. Kad struja ne teče, toga toka dakako nema. Kod naglog prekida struje magnetski bi se tok morao dakle promijeniti gotovo trenutno od neke vrijednosti na nulu. Međutim svaka promjena magnetskog toka kroz petlju izaziva u toj petlji induciranje elektromotorne sile, bez obzira na to, što je uzrok toj promjeni toka. No svaki zavoj svitka nije ustvari drugo nego jedna petlja. Stoga se pri svakoj promjeni struje u svitku, a naročito pri isklapanju i uklapanju, inducira u zavojima svitka elektromotorna sila. Ova se pojava naziva *samoindukcija*.

Samoindukcija je pojava, koja se očituje u tome, da se u nekom dijelu strujnoga kruga (na pr. svitku) inducira elektromotorna sila zbog promjene toka izazvane promjenom vlastite struje.



Sl. 117. Samoindukcija: Svaka promjena struje izaziva promjenu magnetskog toka kroz zavoje svitka, a svaka promjena toka izaziva induciranje elektromotorne sile samoindukcije. Najjače su promjene toka kod uklapanja i isklapanja.



Sl. 118. Kod prekida strujnog kruga inducira se zbog nagle promjene magnetskog toka velika elektromotorna sila samoindukcije. Žarulja naglo zasvijetli, a može i pregorjeti.

Koji je smjer te elektromotorne sile samoindukcije? I opet takav, da ona nastoji spriječiti promjenu, koja ju je izazvala. Kad se struja prekida, nastaje elektromotorna sila takvog smjera, da bi htjela struju održati. Ona će dakle biti jednakog smjera kao i dotadašnji narinuti napon, koji je dotada podržavao struju u tom strujnom krugu. Kad se strujni krug uklapa, ona nastoji spriječiti struju, koja bi potekla. Njezin je dakle smjer u tom slučaju protivan narinutom naponu. Slično je, kad se smanjuje ili povećava struja u strujnom krugu.

Veličina inducirane elektromotorne sile ovisi o brzini promjene toka. Pri isklapanju trebalo bi, da se tok gotovo trenutno promijeni od izvjesnog iznosa na nulu. No takva brza promjena toka izaziva tako veliku elektromo-

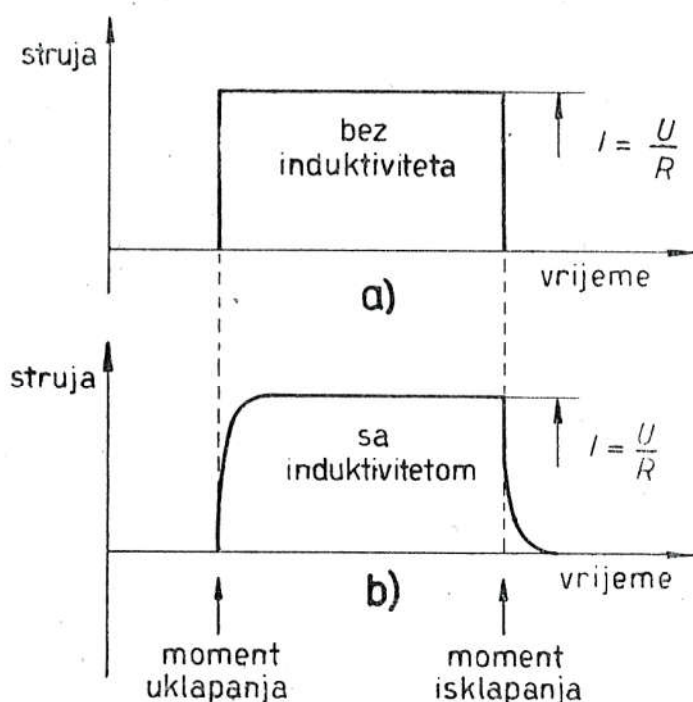
tornu silu samoindukcije, da se strujni krug ne da trenutno prekinuti, već na mjestu prekida nastaje iskra, odnosno luk, koji još neko, vrlo kratko, vrijeme podržava struju u strujnom krugu.

O tome, da pri prekidu struje nastaje velika elektromotorna sila samoindukcije, možemo se uvjeriti pokusom prema slici 118. Na izvor istosmjernje struje spojeni su paralelno žarulja i induktivni svitak. Pri prekidu strujnog kruga žarulja zbog elektromotorne sile samoindukcije inducirane u svitku naglo zasvijetli, mnogo jače nego dotada, uslijed čega može čak i pregorjeti.

Pri uklapanju struja ne će momentano dosegnuti svoju konačnu vrijednost, već će zbog protivljenja elektromotorne sile samoindukcije za to biti potrebno neko vrijeme.

Ovo svojstvo nekog dijela strujnog kruga, na pr. našega svitka, da se elektromotornom silom samoindukcije odupire promjenama struje, koja kroza nj teče, naziva se *induktivitet*. Induktivitet znači izvjesnu tromost prema promjenama struje. Ona je to veća, što je magnetski tok veći. Prema tome je

Sl. 119. Kod uklapanja strujnih krugova s induktivitetom struja ne može trenutno narasti na konačnu vrijednost, a niti može kod isklapanja trenutno spasti na nulu.



induktivitet svitka to veći, što je veći broj zavoja (jer je time veća i elektromotorna sila, a s njom i magnetski tok) te što je manji magnetski otpor. Induktivitet svitka bi se povećao, ako bismo mu povećali broj zavoja ili ako bismo u nj stavili komad čelika.

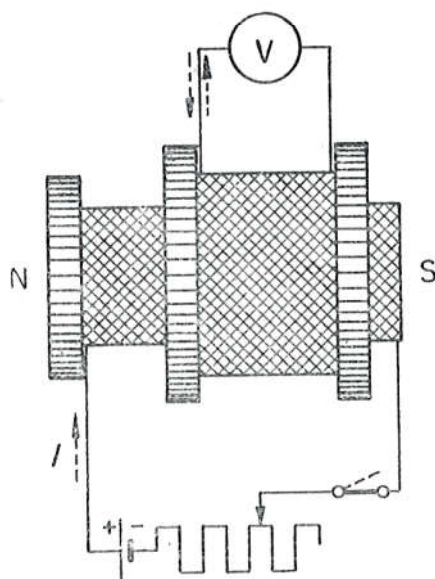
Kod strujnih krugova bez induktiviteta naraste struja prema slici 119.a pri uklapanju trenutno na svoju konačnu vrijednost, određenu prema Ohmovu zakonu narinutim naponom i otporom strujnoga kruga, a pri isklapanju spadne trenutno na nulu. Kod strujnih krugova s induktivitetom potrebno je za to neko vrijeme, kako to pokazuje slika 119.b.

Jedinica induktiviteta je *henri** (oznaka H). Svitak ima induktivitet 1 H, ako u njemu jednolika promjena struje od 1 A u jednoj sekundi izaziva elektromotornu silu samoindukcije 1 V.

* Po američkom fizičaru Henry-u.

8.16. MEĐUSOBNA INDUKCIJA

Stavimo oko svitka, koji je priključen na izvor struje, drugi svitak, na koji priključimo voltmetar (slika 120.). Ako sad pomoću otpornika uključimo



Sl. 120. Međusobna indukcija: Između dva svitka sa zajedničkim magnetskim tokom postoji uska veza. Svaka promjena struje u jednom svitku izaziva induciranje elektromotorne sile u drugom svitku.

nog u strujni krug prvog svitka mijenjamo jakost struje kroz taj svitak, te će promjene struje izazvati promjene magnetskog toka kroz oba svitka. U prvom svitku te promjene izazivaju induciranje elektromotorne sile samoindukcije. No i u drugom svitku te promjene izazivaju induciranje elektromotorne sile upravo tako kao i u prvom svitku, jer svaka promjena magnetskog toka kroz neku petlju izaziva u toj petlji induciranje elektromotorne sile.

Jedan svitak utječe dakle na drugi, ako su oni međusobno magnetski spojeni, a to znači, ako im je magnetski tok ili jedan njegov dio zajednički. Između dva strujna kruga može dakle postojati veza i onda, ako oni nisu metalno spojeni. Ta veza postoji preko magnetskog polja, a dolazi do izražaja samo onda, kad se mijenja struja u jednome od strujnih krugova.

Ovo uzajamno djelovanje dvaju ili više strujnih krugova, koji su međusobno vezani zajedničkim magnetskim tokom, naziva se međusobna indukcija.

Ona je izvanredno važna kod izmjenične struje, pa ćemo se na nju još vratiti.

8.17. DJELOVANJE MAGNETSKOG POLJA NA VODIČ, KOJIM TEČE STRUJA

Objesimo metalni štap kao na slici 121. pomoću metalnih žica između polova elektromagneta. Metalni štap i žice, na koje je on obješen, spojeni su tako, da kroz taj štap možemo pustiti struju i u jednom i u drugom smjeru. I kroz elektromagnet možemo pustiti struju u oba smjera tako, da možemo po volji mijenjati polarnost elektromagneta.

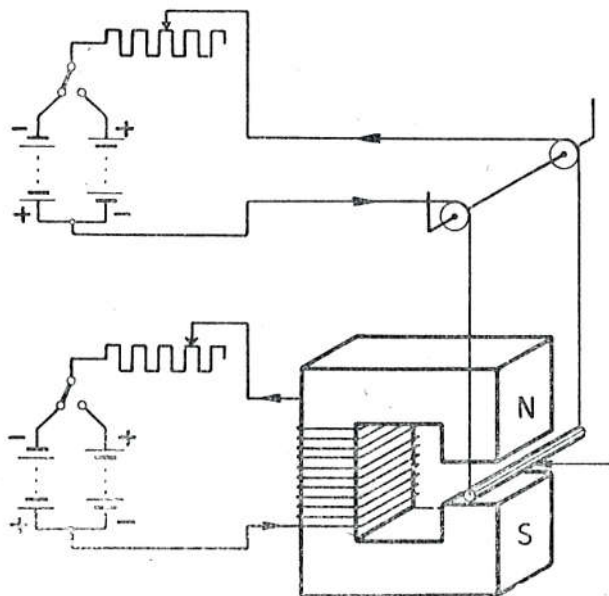
Dok kroz metalni štap ne teče struja, dotle on visi između polova elektromagneta. No čim kroza nj pustimo struju, on se otklanja — očito pod utjecajem magnetskog polja: *Magnetsko polje djeluje na vodič, kojim teče struja tako, da ga nastoji otkloniti u izvjesnom smjeru.* Mijenjanjem smjera i jakosti struje* kroz metalni štap i kroz namot magneta možemo ustanoviti ovo:

1. Ako promijenimo smjer struje bilo kroz metalni štap bilo kroz magnet, štap će se otkloniti na protivnu stranu. Odatle proizlazi, da smjer otklona vodiča u magnetskom polju ovisi i o smjeru struje kroz taj vodič i o smjeru magnetskog polja.

* Jakost struje mijenjamo, kao što je pokazano na slici 121., pomoću promjenljivih otpornika. Struja je to slabija, što je veći otpor uključen u strujni krug, i obratno.

2. Ako promijenimo smjer struje i kroz metalni štap i kroz magnet istovremeno, štap će ostati otklonjen na istu stranu kao i dotada. To je jasno, jer imamo dvostruku promjenu, a svaka od ovih promjena za sebe izazvala bi otklanjanje štapa u protivnom smjeru.

3. Ako pojačamo struju kroz štap, on će se otkloniti jače; ako struju oslabimo, njegov će otklon biti manji. Magnetsko polje djeluje na vodič to jače, što je struja kroz vodič jača.



Sl. 121. Magnetsko polje djeluje na vodič, kojim teče struja, silom, koja je to jača, što je magnetsko polje jače i što je struja jača.

4. Ako pojačamo struju kroz namot magneta, pojačat će se i magnetsko polje magneta, a s njim će se povećati i otklon štapa. Ako struju oslabimo, dogodit će se obratno. Magnetsko polje djeluje dakle na vodič to jače, što je samo polje jače, odnosno što je magnetska indukcija veća.

5. Možemo zamisliti, da na svaki cm štapa, kad se on nalazi u magnetskom polju, a kroz nj teče struja, djeluje izvjesna sila. Ako je štap dvaput dulji, imat će dvaput više centimetara, pa će na nj djelovati dvaput veća sila. Općenito, što je dulji štap, to će na nj uz inače iste okolnosti magnetsko polje djelovati većom silom.

To dakako vrijedi uz uvjet, da se cijeli štap nalazi u magnetskom polju, jer na one dijelove štapa, koji su izvan magnetskog polja, ne djeluje nikakva sila.

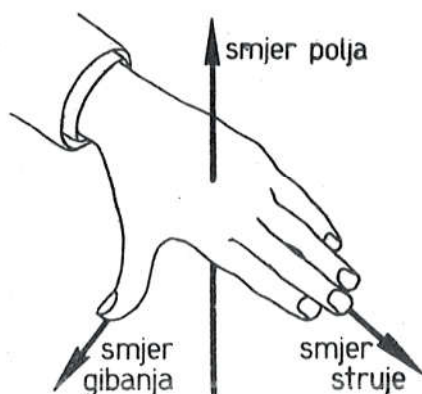
6. Promatranjem smjera otklona štapa kod različitih smjerova struje kroz štap i kroz namot magneta može se utvrditi, da za taj otklon vrijedi ovo pravilo, koje se naziva *pravilo lijeve ruke*: Postavimo dlan lijeve ruke (slika 122.) tako, da magnetske linije ulaze u dlan, a prsti da pokazuju u smjeru struje kroz štap; tada palac pokazuje smjer otklona štapa, odnosno smjer sile, kojom magnetsko polje djeluje na štap.

Pomoću ovog pravila lijeve ruke možemo lako odrediti smjer otklona vodiča, na pr. i na slikama 9. i 121.

Silu, kojom magnetsko polje djeluje na vodič protjecan strujom, možemo izraziti i ovom jednostavnom matematičkom formulom:

$$F = 0,102 B l I \text{ kilograma } (= 0,102 B l I \text{ kiloponda} = B l I \text{ njutona}).$$

B je magnetska indukcija u veberima, l je duljina vodiča u magn. polju u metrima, I je jakost struje, koja teče kroz vodič, u amperima, a F je sila, kojom magnetsko polje djeluje na vodič. I iz ove se formule vidi, da je sila F to veća, što je B veće (t. j. što je magnetska indukcija jača), što je l veće (t. j. što je veća duljina vodiča u magn. polju) te što je I veće (t. j. što je jača struja, koja teče kroz vodič).



Sl. 122. Smjer djelovanja magnetskog polja na vodič određuje se po pravilu lijeve ruke.

33. *primjer.* Vodič, kojim teče struja 36 A, nalazi se u magnetskom polju 0,7 T. Kolikom će silom djelovati magnetsko polje na taj vodič, ako je njegova duljina u tom polju 45 cm?

Rješenje. $B = 0,7 \text{ T}$, $l = 45 \text{ cm} = 0,45 \text{ m}$,

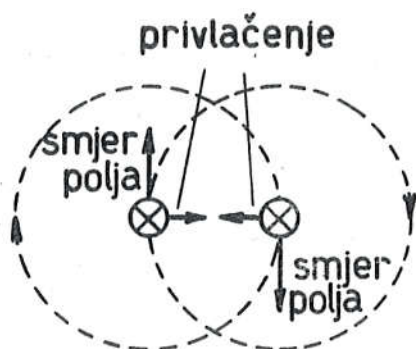
$$F = 0,102 B l I = 0,102 \cdot 0,7 \cdot 0,45 \cdot 36 = 1,16 \text{ kg}.$$

Kao što je rečeno već na početku ove knjige, ova pojava djelovanja magnetskog polja na vodič, kojim teče struja, izvanredno je važna, jer se na njoj osnivaju svi elektromotori i golemo mnoštvo najrazličitijih aparata.

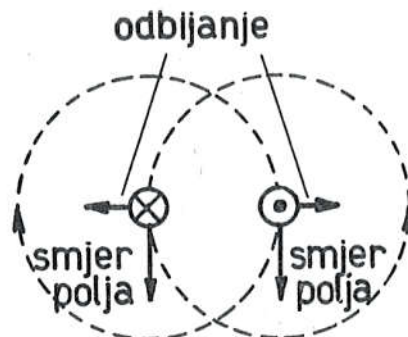
Zadatak 145. Kojom silom djeluje magnetsko polje od 1,2 (1,0; 0,85) T, na vodič duljine 50 (30; 80) cm, kad kroz vodič protječe struja 60 (25; 70) A?

8.18. UZAJAMNO DJELOVANJE DVIJU STRUJA

Već na početku ove knjige, na strani 12., utvrdili smo na osnovi pokusa prema slikama 7. i 8., da dva vodiča, kojima teče struja, djeluju jedan na drugi nekom silom. *Dva vodiča, kojima teče struja u istom smjeru, privlače se međusobno.* Da objasnimo, zašto je tome tako.



Sl. 123. Dva vodiča, u kojima struja teče u istom smjeru, međusobno se privlače.

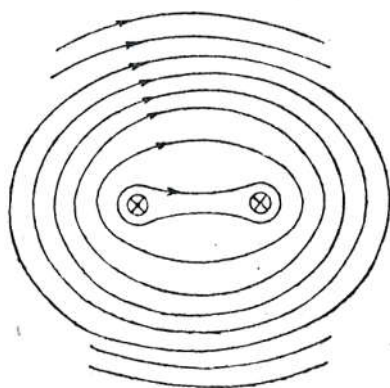


Sl. 124. Dva vodiča, u kojima je smjer struje različit, međusobno se odbijaju.

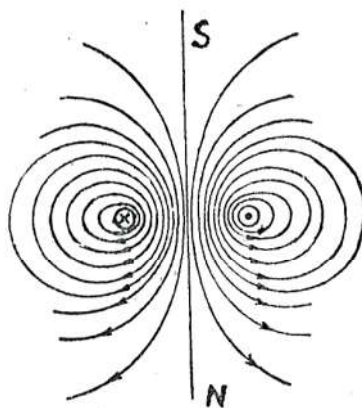
Uzmimo dva vodiča A i B na slici 123., koji su okomiti na ravninu slike, a u kojima struja teče u istom smjeru. Jedan se vodič nalazi u magnetskom polju drugoga vodiča. Polje oko vodiča je kružno, magnetske su silnice kružnice. Od svih magnetskih linija, koje okružuju vodič, nacrtajmo samo po jednu, i to onu, koja prolazi kroz os drugog vodiča. Smjer magnetskih linija možemo lako odrediti prema pravilu desne ruke, kao na slici 93. A prema pravilu lijeve ruke (koje vrijedi za djelovanje magnetskog polja na vodič, sl. 122.) možemo lako odrediti smjer, u kojem bi to magnetsko polje htjelo vodič pomaknuti. Taj je smjer na slici 123. određen strelicama. Kako se vidi, ova se dva vodiča privlače.

Na sličan način možemo pomoću slike 124. protumačiti pravilo o uzajamnom djelovanju vodiča, u kojima je smjer struje različit.

No kad smo crtali magnetske linije na slikama 123. i 124., nismo zapravo postupali pravilno. Magnetsko polje oko dva međusobno bliza vodiča nije više kružno. Polje jednoga vodiča utječe na polje drugoga, te se oba polja sastavljaju u ukupno, rezultantno* polje. Takvo ukupno, rezultantno polje nacrtano je na slici 125. za vodiče, u kojima struja teče u istom smjeru, u kojima struja teče u istom smjeru,



Sl. 125. Magnetsko polje dvaju vodiča, u kojima struja teče u istom smjeru. Vodiči se privlače.



Sl. 126. Magnetsko polje dvaju vodiča, u kojima struja teče u suprotnim smjerovima. Vodiči se odbijaju.

a na slici 126. za vodiče, u kojima je smjer struje različit. (Slika 126. odgovara slici 97.) Ako magnetske linije zamislimo kao elastične napete niti, koje nastoje, da se što više stegnu i skrate, nalazimo i u ovim slikama objašnjenje za naše pravilo o uzajamnom djelovanju vodiča, kojima teče struja.

34. primjer. U postrojenju visokog napona dva su vodiča međusobno udaljena $a = 23$ cm. Vodiči su pričvršćeni na potporne izolatore u razmaku $l = 140$ cm. Kod kratkog spoja nastaje struja 30 000 A. Kolikom silom djeluju ova dva vodiča jedan na drugi između potporišta u času kratkog spoja?

Rješenje. Prema formuli na strani 105. iznosi magnetska indukcija u udaljenosti $a = 23$ cm = 0,23 m od vodiča:

$$B = \frac{2I}{10\,000\,000\,a} = \frac{2 \cdot 30\,000}{10\,000\,000 \cdot 0,23} = 0,0261 \text{ T.}$$

Magnetsko polje jednog vodiča djeluje na drugi vodič silom, koju možemo izračunati pomoću formule na strani 119.:

$$F = 0,102 B l I = 0,102 \cdot 0,0261 \cdot 1,40 \cdot 30\,000 = 109 \text{ kg.}$$

Zadatak 146. U postrojenju visokog napona od 3000 (10 000; 20 000) V vodiči su međusobno udaljeni 15 (20; 25) cm. Kolkom se silom privlače ti vodiči između 2 potporišta u času kratkog spoja, ako je struja kratkog spoja 15 (15; 43) kA, a međusobna udaljenost potporišta iznosi 150 (120; 100) cm?

* Riječ »rezultantni« znači ukupni. Na pr. rezultantna sila ili rezultanta je ukupna sila, koja nastaje istovremenim djelovanjem dviju ili više sila.

Zadatak 147. Vodiči nadzemnog voda niskog napona udaljeni su međusobno 50 (55; 60) cm. Kod kratkog spoja poteče struja 5000 (4000; 7000) A. Kolikom će silom djelovati vodiči jedan na drugi između dva stupa, ako je raspon 35 (35; 45) m?

Zadatak 148. Vodiči nadzemnog voda od 35 kV udaljeni su međusobno 2,5 (2,2; 2) m. Kod kratkog spoja poteče struja 4000 (3000; 5000) A. Kolikom će silom djelovati vodiči jedan na drugi između dva stupa, ako je raspon 140 (120; 100) m?

8.19. NAČELO ENERGIJE KOD ELEKTROMAGNETSKE INDUKCIJE

Kad se pomična žica na slici 115. giba nadesno, nastaje u petlji — kako smo vidjeli — elektromotorna sila smjera protivnog kazaljci na satu. Budući da je strujni krug zatvoren, izaziva ona u petlji struju istoga smjera. Ta struja teče i kroz žicu, koja se giba. No mi znamo, da na vodič, kojim teče struja, magnetsko polje djeluje nekom silom nastojeći ga otkloniti u smjeru, koji možemo lako odrediti pravilom lijeve ruke. Ako to pravilo primijenimo na pomičnu žicu naše petlje, vidjet ćemo, da je smjer sile, kojom magnetsko polje djeluje na tu žicu, upravo protivan smjeru gibanja. Za pomicanje ove žice potrebna je prema tome neka sila, koja će biti veća, što struja u žici bude veća.

Da mora biti tako, proizlazi iz zakona o održanju energije. Čim u našoj petlji teče električna struja, troši se u njezinu otporu električna energija. Ta energija ne može nastati ni iz čega, jer je to po zakonu o održanju energije nemoguće. Ta se električna energija stvara iz mehaničke energije, koja se troši na gibanje pomične žice protiv sile magnetskog polja. Što mi žicu brže gibamo, inducirana će struja biti jača, ali će za gibanje žice biti potrebna i veća snaga. A što je otpor strujnog kruga manji, inducirana će struja opet biti veća, ali će zbog te veće struje biti veća i sila, kojom magnetsko polje djeluje na žicu, pa će za njezino gibanje biti opet potrebna veća snaga.

Nešto se vrlo slično događa i kod električnih generatora. Što je opterećenje veće, t. j. što generator daje jaču struju, treba veća snaga za njegovo okretanje. Kad je generator potpuno neopterećen, treba za njegovo okretanje samo razmjerno mala snaga, i to za svladavanje trenja, otpora zraka i nekih drugih gubitaka.

8.20. ZBOG ČEGA JE ŽELJEZO MAGNETIČNO?

Sasvim na početku ove knjige rekli smo, da se materija sastoji od atoma, čestica, koje se nikakvim kemijskim ni mehaničkim postupkom ne daju dalje dijeliti. Pa ipak, vidjeli smo, da se i ti atomi sastoje od jezgre, oko koje

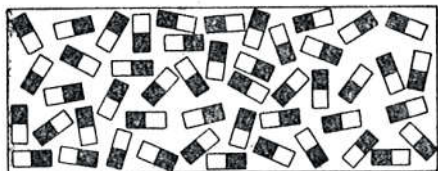


Sl. 127. Elektron, koji kruži oko atomske jezgre, tvori najsitniji magneti.

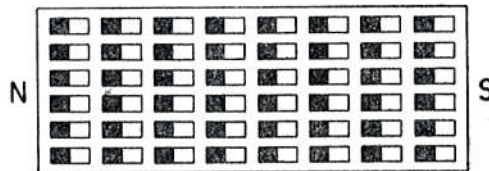
kruži veći ili manji broj elektrona, najsitnijih čestica elektrike. Ovo kruženje elektrona predstavlja vrlo sitnu električnu struju, jer električna struja nije drugo nego gibanje elektrona. A svaka struja stvara magnetsko polje, pa i kružno gibanje elektrona uzrokuje neko magnetsko polje (slika 127.), slično kao kod običnog svitka. Svaki elektron stvara dakle neko magnetsko polje, pa ako je kruženje pojedinih elektrona nekoga atoma takvo, da se njihova magnetska polja ne poništavaju, bit će takav atom u magnetskom pogledu sićušan magneti.

Kod molekule željeza (čelika; lijevanog željeza) tome je doista tako, pa su njihove molekule sićušni magneti. No obično su ti magneti okrenuti na različite strane, kako to možemo predstaviti pomoću slike 128., pa se djelovanja tih sitnih magneti međusobno poništavaju: željezo nije magneti. Kad međutim željezo dođe u dovoljno jako magnetsko polje, ti se sićušni ili (kako ih često nazivaju) elementarni magneti poredaju kao na slici 129., pa se njihova magnetska djelovanja zbrajaju: željezo se magnetizira, ono postaje magnet.

Kod slabog magnetskog polja tek se mali broj elementarnih magnetića usmjeri. S pojačavanjem magnetskog polja magnetiziranje željeza postaje, kao što otprije znamo, sve jače, a to znači, da se sve više elementarnih magnetića usmjeruje prema djelovanju toga polja. Sad je jasno, zašto nastaje i zasićenje. Kad se većina magnetića već usmjeri, daljnjim pojačavanjem magnet-



Sl. 128. Elementarni magneti u željezu (čeliku) poredani su kakogod, njihova se djelovanja poništavaju: željezo (čelik) nije magnetično.



Sl. 129. Elementarni magneti poredali su se pod utjecajem magnetskog polja, njihovi se učinci zbrajaju: željezo (čelik) je magnetizirano.

skog polja može se usmjeriti sve manji i manji broj još preostalih neusmjerenih magnetića, pa se magnetiziranje, a s njim i magnetska indukcija sve manje i manje povećava. Potpuno zasićenje nastaje kod dinamo-čelika i dinamo-lima tek kod izvanredno jakog polja od 160 000 A/m, kod čega magnetska indukcija iznosi oko 2,25 tesla. Potpuno zasićenje znači, da su svi elementarni magneti usmjereni.

Dosad smo uvijek govorili o mekom čeliku kod elektromagneta. I doista se za elektromagnete upotrebljava meki čelik. Tvrdi čelik se vrlo teško magnetizira. Ali se zato tvrdi čelik i vrlo teško razmagnetizira. Mek je čelik magnetičan samo dotle, dok na nj djeluje magnetsko polje, a čim toga polja nestane, odmah se razmagnetizira. Tvrdi čelik, jednom namagnetiziran, ostaje i dalje magnetičan. Takvi magneti od tvrdog čelika nazivaju se stoga trajni ili *permanentni magneti*. Oni se mnogo upotrebljavaju kod različitih električnih instrumenata i aparata.

Kod trajnih magneta elementarni magneti se vrlo teško usmjeruju, ali ostaju u svom položaju, kad smo ih jednom usmjerili.

Slika 129. objašnjava nam ujedno, kako to, da nema i ne može biti magnet, koji bi imao samo sjeverni ili samo južni pol. Kakogod razrezali magnet na slici 129., uvijek će na jednoj strani biti sjeverni, a na drugoj južni pol. Ima pozitivnih i negativnih električnih naboja, ali nema »sjevernih« i »južnih« magnetskih naboja ili magnetskih masa, kako su ih nekad zvali, dok se još smatralo, da je magnetizam nešto posebno, što nema veze s elektrikom. Međutim, magnetizam je samo posljedica električnih strujanja.

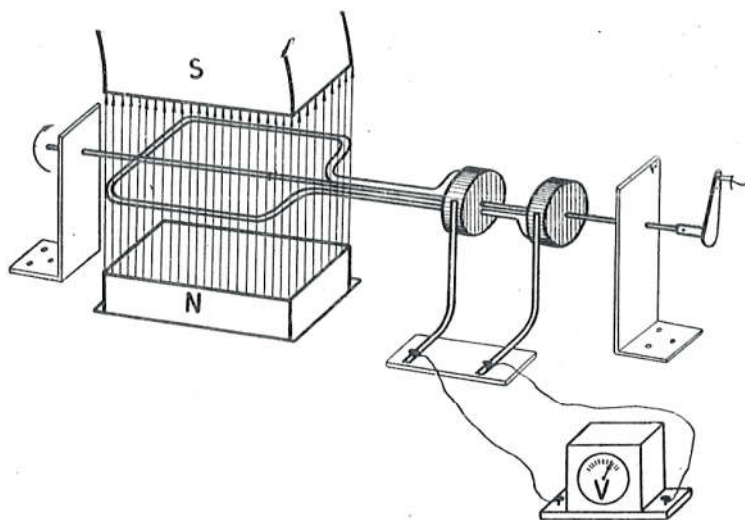
9. IZMJENIČNA STRUJA

9.1 POSTANAK I PRIKAZIVANJE IZMJENIČNE STRUJE

Uzmimo četvorouglatu metalnu petlju kao na slici 130., nasadimo je na osovinu i smjestimo je u jednoliko magnetsko polje između dva magneta. Krajevi te petlje neka su spojeni sa dva metalna prstena, po kojima se kliza po jedna plosnata opruga. Kao što se iz slike vidi, osovina se zajedno s metalnom petljom može po volji okretati u magnetskom polju.

Već znamo, ako ručku, a s njom i petlju, zakrenemo za četvrt okretaja, da će se u petlji inducirati elektromotorna sila, jer se promijenio magnetski tok, što je dotle prolazio kroz petlju. Ta će elektromotorna sila biti vrlo kratkotrajna, jer će ona postojati samo dotle, dok se magnetski tok kroz petlju mijenja. Promatrajmo međutim sada, što će biti, ako petlju pomoću ručke neprestano okrećemo jednolikom brzinom.

Promotrimo u tu svrhu petlju za vrijeme jednog njezinog okretaja. Na slici 131.a prikazani su pojedini položaji petlje za vrijeme njezina okretanja, a ispod toga je na slici 131.b grafički prikazana veličina inducirane elektromotorne sile. Dok se petlja zakreće iz horizontalnog položaja (položaj 1 na slici 131.), ne će u prvom trenutku njezini vodiči sjeći nikakve magnetske linije: u tom trenutku ne će se u petlji inducirati nikakva elektromotorna sila. No što se petlja više zakreće prema vertikalnom položaju, njezini vodiči sijeku magnetske linije sve brže: inducirana elektromotorna sila sve više raste. U položaju 2 njezina je veličina prikazana dužinom 2—2' na slici 131.b. Naj-

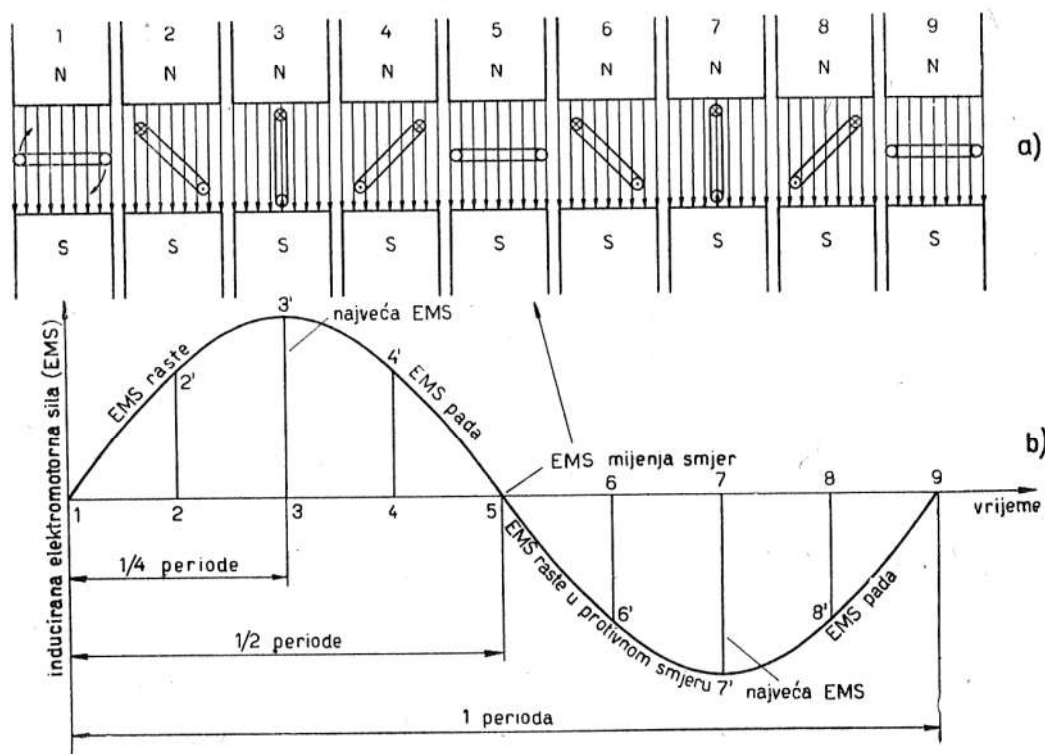


Sl. 130. Najprimitivniji generator izmjenične struje. Frekvencija iznosi toliko perioda u sekundi, koliko puta u sekundi okrećemo petlju.

veća elektromotorna sila bit će inducirana u položaju 3, jer u tom trenutku vodiči petlje sijeku magnetske linije okomito, pa će ih sjeći najbrže. Ta najveća, maksimalna elektromotorna sila prikazana je dužinom 3—3'. Kod daljnjeg zakretanja petlje počinje inducirana elektromotorna sila opadati iz istih razloga, iz kojih je dotada rasla. U horizontalnom će položaju (položaj 5) ona opet biti jednaka nuli. Kad se petlja zakreće dalje iz položaja 5, očekujemo, da će se zbivati ono isto, što se je zbivalo kod zakretanja petlje iz početnog položaja 1. To će doista i biti tako, ali ne baš sasvim u svemu. Razlika će biti u smjeru: inducirana elektromotorna sila ne će više imati jednaki smjer.

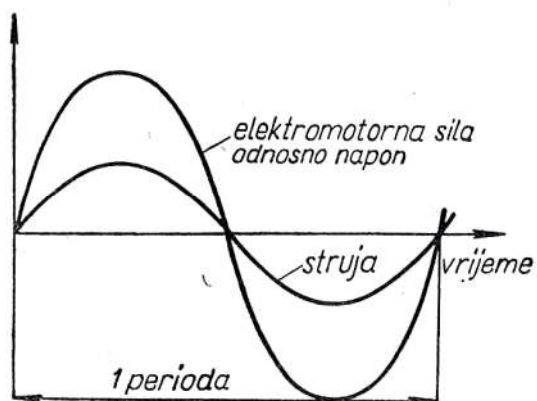
Po pravilu desne ruke možemo lako ustanoviti smjer inducirane elektromotorne sile, na pr. u položaju 2. Taj smjer je na našoj slici naznačen poznatim znakovima, križićem i točkom unutar presjeka vodiča. Ako isto tako, po pravilu desne ruke, odredimo smjer inducirane elektromotorne sile u položaju 6, vidjet ćemo, da je taj smjer protivan onome u položaju 2. Pa ako smo veličine inducirane elektromotorne sile između položaja 1 i 5 crtali prema gore od horizontalne osi, moramo inducirane elektromotorne sile između položaja 5 i 9 crtati prema dolje, da naznačimo promjenu smjera. Inače, po svojoj veličini, inducirana elektromotorna sila između položaja 5 i 9 bit će potpuno jednaka kao i između položaja 1 i 5. Ako spojimo 1' —2' —3' —4' i t. d. krivu-

ljom, ta će nam krivulja prikazivati veličinu i smjer inducirane elektromotorne sile u svakom pojedinom trenutku. Takva krivulja naziva se u matematici sinusoida.



Sl. 131. Izmjenična elektromotorna sila nastaje jednolikim okretanjem petlje ili svitka u magnetskom polju.

Pri jednolikom zakretanju petlje u magnetskom polju inducira se dakle promjenljiva elektromotorna sila, koja ne samo da mijenja svoju veličinu, već mijenja i svoj smjer. Za vrijeme jednoga okretaja ta elektromotorna sila najprije raste, postiže najveću vrijednost, opada do nule, mijenja zatim svoj smjer, opet raste u tom protivnom smjeru, postizava opet onu istu najveću vrijednost, zatim opada do nule, pa opet mijenja smjer i t. d. Takva elektromotorna sila naziva se izmjenična elektromotorna sila, a struja koju ona proizvodi, ako je strujni krug zatvoren, izmjenična struja.



Sl. 132. Izmjenična struja kroz žarulje mijenja se jednako kao i izmjenični napon, koji im je narinut.

sila, odnosno kao i izmjenični napon na stezaljkama naprave na slici 130. To se razabire iz slike 132., na kojoj je, osim krivulje napona, prikazana i krivulja struje. Za koliko postotaka za neko vrijeme poraste odnosno spadne napon, za toliko postotaka za to isto vrijeme poraste odnosno spadne struja.

9.2. PERIODA, FREKVENCIJA

Ako petlju kao na slici 130. okrećemo u magnetskom polju, inducirat će se u njoj izmjenična elektromotorna sila. Veličinu te elektromotorne sile možemo izmjeriti voltmetrom priključenim na oprugu, koja klizi po kliznim kolutima. Ako na stezaljke priključimo trošilo električne struje, na pr. žarulju, teći će kroz tu žarulju izmjenična struja. A to je, kako smo vidjeli, takva struja, koja mijenja neprestano ne samo svoju veličinu nego i svoj smjer. Za vrijeme jednog okretaja elektromotorna sila, a s njom i struja, izvršit će onaj niz promjena, koji je predložen na slici 131.b. Takav se niz promjena naziva jedna perioda*.

Okrećemo li petlju takvom brzinom, da ona napravi 3 potpuna okretaja u sekundi, u petlji će nastati izmjenična struja od 3 periode po sekundi. Ovaj broj perioda po sekundi naziva se *frekvencija* izmjenične struje. Jedinica za frekvenciju je *1 perioda po sekundi* (kratica 1 per/s). Ova je jedinica prozvana *herc*** (krativa Hz).

Za javnu opskrbu električnom energijom danas se u Evropi, uključivo SSSR, upotrebljava izmjenična struja od 50 Hz. U Americi se upotrebljava izmjenična struja od 60 Hz. Izuzetno se još i u Evropi i u Americi upotrebljavaju i druge frekvencije, no one pomalo iščezavaju: prelazi se na normalnu frekvenciju 50 Hz u Evropi i 60 Hz u Americi. U Italiji su se još donedavna mnogo upotrebljavale frekvencije 42 i 45 Hz. Kod nas su donedavna cijela Istra i Slovensko Primorje bili opskrbljivani strujom od 42 Hz, ali je postepeno izvršen prijelaz na 50 Hz, tako da se danas u cijeloj našoj zemlji za opskrbu električnom energijom upotrebljava samo normalna frekvencija 50 Hz.

Zadatak 149. Koliko je vrijeme potrebno kod frekvencije 50 Hz, da struja poraste od 0 do svoje maksimalne jakosti?

Zadatak 150. Koliko traje jedna perioda kod frekvencije 42 ($60 \cdot \frac{16}{3}$) Hz?

Zadatak 151. Kolika je frekvencija struje, koju proizvodi dvopolni generator izmjenične struje, ako se okreće sa 3600 (1000; 2520) okretaja u minuti?

9.3. IZVEDBA GENERATORA IZMJENIČNE STRUJE

Mala, jednostavna naprava na slici 130. nije drugo, nego najjednostavniji stroj za proizvodnju izmjenične struje, najprimitivniji generator izmjenične struje. U praksi su generatori dakako sasvim drugačiji, ali svi oni rade na istom principu kao i onaj sa slike 130.

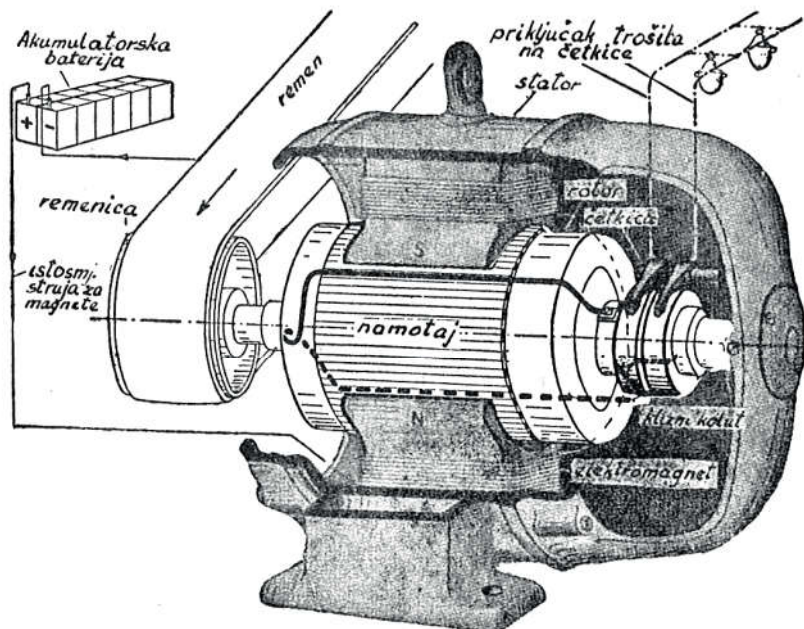
Praktičnu izvedbu malog, jednostavnog generatora prikazuje slika 133. Kao magnet služi uvijek elektromagnet, koji kod izvedbe prema slici 133. dobiva struju iz akumulatorske baterije. Magnet je nepomičan te čini nepomični dio stroja, koji se naziva *stator*. Dio stroja, koji se okreće, naziva se *rotor*. On je od dinamo-limova, a na njemu se nalazi namot, od kojega je nacrta tana samo jedna petlja. Zagonski stroj tjera rotor preko remena i remenice, tako da se namot rotora okreće u magnetskom polju magneta. U tome se namotu inducira izmjenična elektromotorna sila, koja preko kliznih koluta i četkica*** može dati struju u vanjski strujni krug.

* Ovakvo značenje riječi perioda uobičajeno je kod nas prema njemačkoj praksi. U drugim zemljama ono, što mi nazivamo perioda, zovu ciklus, a periodom nazivaju trajanje jednoga ciklusa.

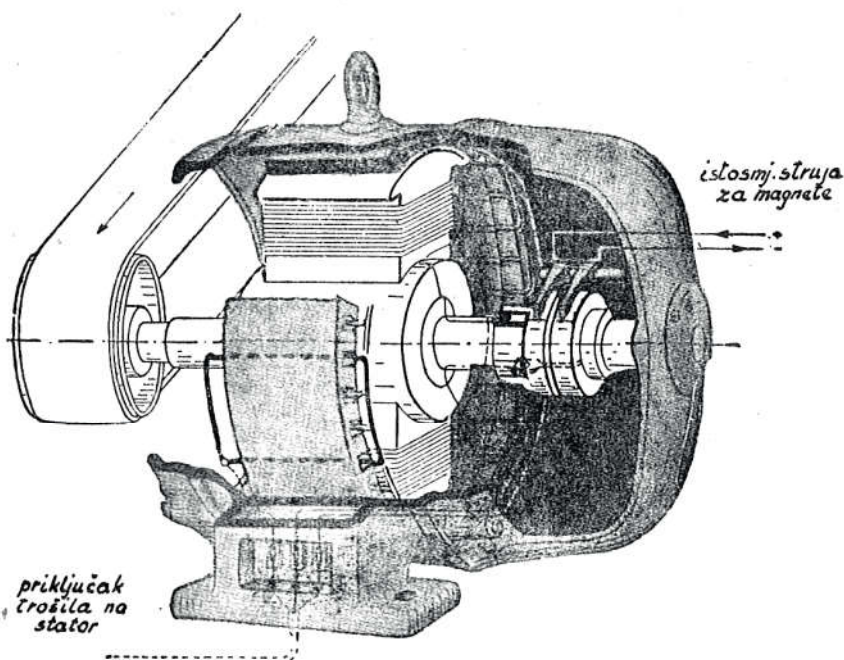
** Prema njemačkom fizičaru Hertzu (čitaj Herc).

*** Četkice su ugljeni, grafitni ili metalno-grafitni blokovi, koji klizu po kliznim kolutima.

Za proizvodnju izmjenične struje potrebno je, da namot u kojemu se inducira elektromotorna sila, siječe magnetske linije magneta. U tu svrhu može magnet biti nepomičan, a namot da se okreće između njegovih polova, kao na slici 133. No može biti i obratno. Može, kao na slici 134., namot biti smješten na statoru, dakle nepomično, a magnet na rotoru. U tom slučaju



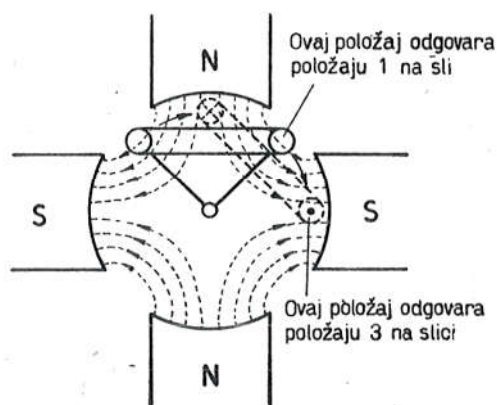
← Sl. 133. Generator izmjenične struje s magnetima na statoru.



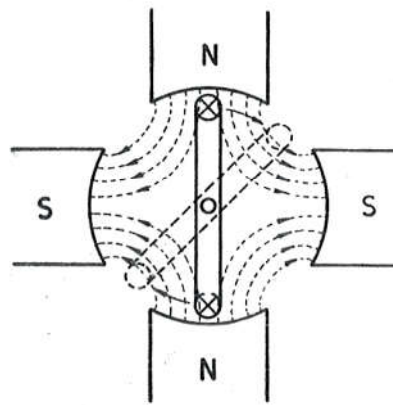
Sl. 134. Generator izmjenične struje s magnetima na rotoru →

magnet dobiva struju preko kliznih koluta, na pr. od neke akumulatorske baterije. Izvedbe prema slikama 133. i 134. u električnom su pogledu posve jednake. No iz konstruktivnih razloga znatno je povoljnija izvedba prema slici 134. Stoga se danas svi veći generatori izvedu uvijek tako, da magnet rotira, a glavni namot da je nepomičan.

Ako bismo htjeli iz našeg »generatora« na slici 130. dobiti izmjeničnu struju od 50 Hz, morali bismo ga okretati brzinom od 50 okretaja u sekundi, odnosno 3000 okretaja u minuti. Ako bismo, međutim, umjesto 2 pola imali 4 pola, kao na slici 135., imali bismo jednu periodu već za vrijeme pola okretaja petlje, jer bi već za to vrijeme petlja došla u sve one položaje prema magnetskom toku, koji su prikazani na slici 131. Uz 4 pola morala bi dakle petlja izvršiti 1500 okretaja u minuti, uz 6 polova samo 1000 i t. d. Veliki generatori, gonjeni parnim turbinama, imaju samo 2 pola, pa se okreću s 3000 okretaja u minuti. Kod generatora, koje gona vodne turbine ili stapni strojevi (eksplozivni, parni), tako velike brzine nisu moguće, pa takvi generatori imaju veći, a kadšto i vrlo veliki broj polova, da bi mogli proizvoditi struju od 50 Hz.



Sl. 135. Četvoropolni stroj: Dok je jedna strana zavoja pod N-polom, druga mora biti pod S-polom. Za istu frekvenciju potrebna je dvaput manja brzina nego kod dvopolnog stroja.



Sl. 136. Četvoropolni stroj: Ovako ne bismo dobili ništa. U obje strane petlje inducirale bi se jednake i protivne elektromotorne sile, pa bi se poništavale.

Petlja ne može uz 4 pola ili još više polova biti takva, kao što je nacrtano na slici 136. Tada bi se naime u obje njezine strane inducirale jednake i protivne elektromotorne sile, pa bi se one poništavale. To se lako razabire iz navedene slike. Višepolni električni strojevi namataju se na različite načine, ali je pravilo uvijek to, da jedna strana zavoja mora biti pod jednim polom, a druga strana istovremeno pod protivnim polom.

9.4. MOGUĆNOST UPOTREBE IZMJENIČNE STRUJE

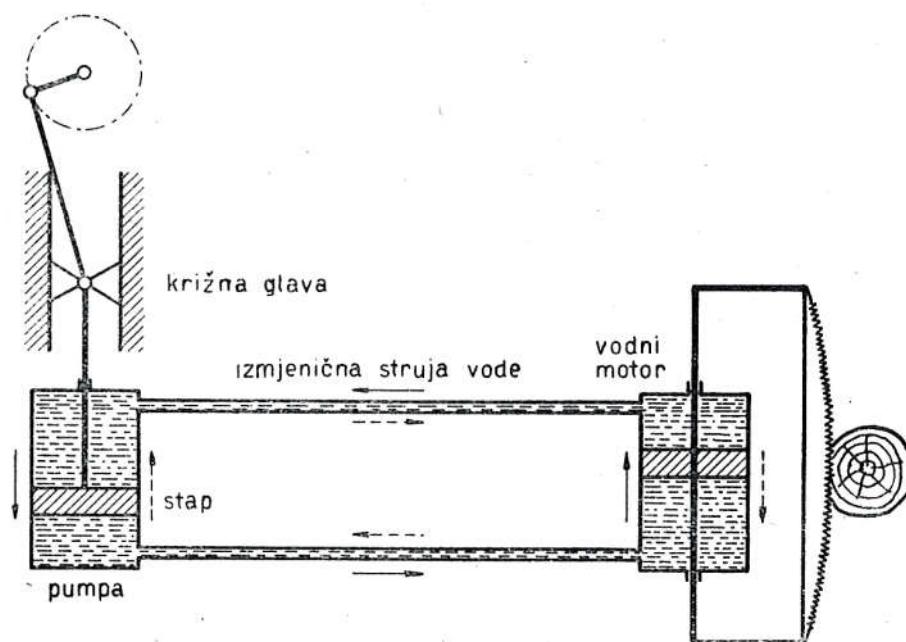
Izmjenična struja kao da je neka čudna struja, koja teče čas amo — čas tamo, čas naprijed — čas natrag. Kod 50 Hz ona 50 puta u sekundi teče u jednom smjeru, a 50 puta u sekundi u drugom smjeru. S pravom se, čini se, možemo zapitati, kako i zašto takvu struju možemo upotrebiti. A ako je već i možemo za nešto upotrebiti, zašto bismo odustali od istosmjerne struje, koja je — tako se barem čini — jednostavnija i prikladnija. Pa ipak, činjenica je, da se istosmjerna struja upotrebljava danas samo u specijalne svrhe, dok se proizvodnja, prijenos i razdioba električne energije, jednom riječju javna opskrba električnom energijom, vrše kod svih modernih postrojenja izmjeničnom strujom, t. j. točnije, jednom njezinom vrstom, trofaznom strujom. Treba dakle objasniti, koji su tome razlozi.

Vidjeli smo, da struja grije metalne vodiče, kad kroz njih teče. Ona ih grije to jače, što je sama struja jača, a ovo stvaranje topline posve je neovisno

o smjeru struje. Ma kako mi mijenjali smjer struje, stvarat će se toplina, koja u svakom trenutku ovisi o jakosti struje, ali ne o njezinu smjeru. I izmjenična struja proizvodi u metalnim vodičima isto tako toplinu kao i istosmjerna struja.

Odatle proizlazi, da se izmjenična struja dađe jednako dobro upotrebiti kao i istosmjerna struja, kad god hoćemo iz električne energije dobiti toplinsku, a to je kod svih elektrotoplinskih aparata (različite peći, kuhala, glačala, aparati za svarivanje, bojleri i t. d.). Pa čak smo i za naše obične žarulje ustanovili, da nisu drugo, nego elektrotoplinski aparati, jer električna struja služi samo za usijavanje tanke metalne niti u žarulji. Za neke druge vrste električnih izvora svjetlosti, koje se danas sve više upotrebljavaju, izmjenična je struja znatno povoljnija od istosmjerne. Prema tome za dva ogromna i izvanredno važna područja elektrotehničke primjene, elektrotoplinu i električnu rasvjetu, izmjenična struja je isto tako upotrebljiva kao i istosmjerna.

Što se tiče motornih pogona, pokazalo se, da su motori trofazne struje, jedne vrste izmjenične struje, za većinu različitih upotreba prikladniji, sigurniji, jednostavniji, a prema tome i jeftiniji od motora istosmjerne struje. U pogledu proizvodnje električne energije, generatori trofazne struje znatno su prikladniji od generatora istosmjerne struje.



Sl. 137. Vodni motor, koji radi na »izmjeničnu struju« vode. Voda teče čas amo, čas tamo, ali energija struji samo od pumpe k motoru.

No ipak na jednom području elektrotehničke primjene izmjenična struja ne može konkurirati istosmjernoj, u elektrokemiji. Za elektrokemijske procese neophodno je potrebno, da struja teče uvijek u istom smjeru, pa se za izvođenje takvih procesa može upotrebiti samo istosmjerna struja.

Izmjenična, odnosno trofazna struja, ima dakle pred istosmjernom strujom prednost na području elektromotornih pogona i električne rasvjete, obje su vrste struje jednake u pogledu elektrotopline, dok je na području elektrokemije istosmjerna struja nezamjenljiva. No izmjenična struja ima još jednu bitnu prednost pred istosmjernom, prednost, koja je bila odlučna za njezinu potpunu pobjedu kod javne opskrbe električnom energijom. Ta se prednost

sastoji u tome, što se izmjenična struja može vrlo jednostavno pretvoriti ili — kako se to u elektrotehnici kaže — transformirati od jednog napona na drugi napon. Kako smo vidjeli, za prijenos iole većih električnih snaga na iole veće daljine potreban je visoki napon. Taj napon treba biti to viši, što se radi o većoj snazi i o većoj daljini prijenosa. U našim kućama, međutim, napon ne smije prijeći izvjesne granice, jer bi to bilo opasno po život. Potrebno je dakle transformirati električnu energiju od jednog napona na drugi napon, a ta je transformacija vrlo jednostavna za izmjeničnu struju, a razmjerno vrlo komplicirana i skupa za istosmjernu struju.

Još nešto treba objasniti kod izmjenične struje, što se čini čudnovatim. Znamo, da se električna energija proizvodi u elektranama, pa da se vodovima prenosi do potrošača. No kako ta energija dolazi do potrošača, kad izmjenična struja teče čas amo, čas tamo? Da to objasnimo, napravimo malu usporedbu s vodom. Zamislimo uređaj kao na slici 137. Stapna pumpa tjera vodu u cijevima čas amo, čas tamo. Ta voda tjera stap vodnog motora gore — dolje, a s tim stapom i pilu, koja je s njim spojena. Takvom se pilom u praksi doista ne ćemo služiti, no dade se zamisliti, da bi i ona mogla piliti: Ona bi vršila neki mehanički rad, na koji bi se trošila energija, što bi je dobavljala stapna pumpa. U cijevima bi tekla »izmjenična struja« vode, a ipak bi energija strujila uvijek u istom smjeru: od pumpe prema stapnom motoru. Ovo, prevedeno na elektriku, znači: kod izmjenične struje struja teče čas amo, čas tamo, no energija struji od mjesta proizvodnje do mjesta potrošnje.

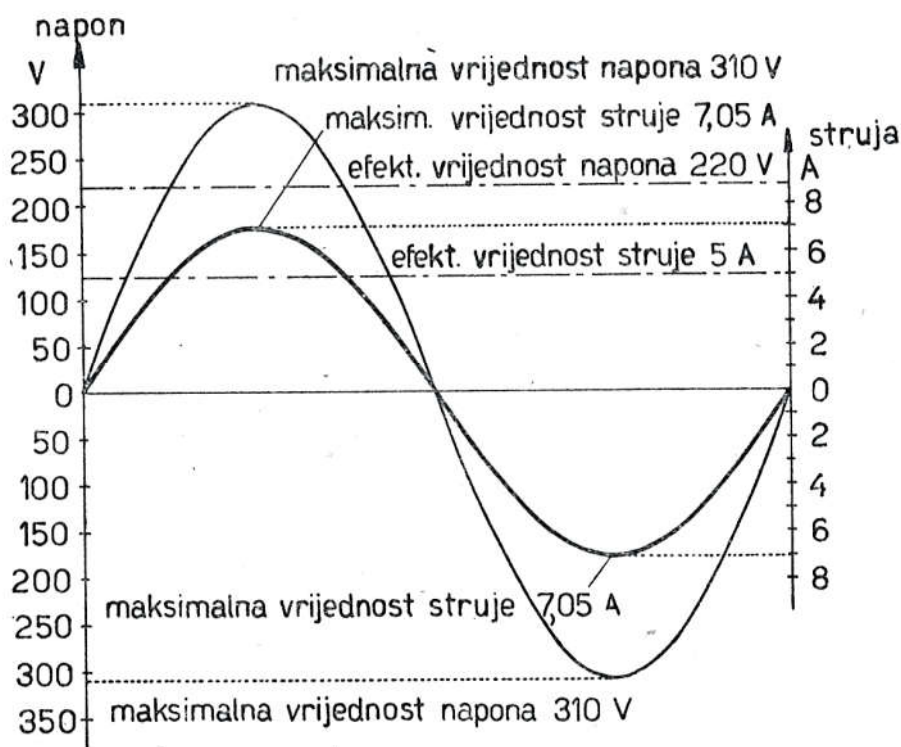
9.5. MAKSIMALNA I EFEKTIVNA VRIJEDNOST STRUJE I NAPONA

Kad za istosmjernu struju kažemo, da joj je jakost na pr. 5 A, onda je jasno, što to znači. No što znači jakost struje 5 A kod izmjenične struje? Da li je to maksimalna vrijednost ili, možda, neka srednja vrijednost? S maksimalnom jakosti struje nema smisla da računamo, jer je to jakost struje samo u nekom trenutku. Obična srednja vrijednost izmjenične struje jednaka je nuli, jer struja za vrijeme pola periode teče u jednom smjeru, a za druge polovice periode u drugom smjeru. Pa ipak, kad se kaže struja 5 A, to znači nešto i kod izmjenične struje. *Jakost 5 A ima ona izmjenična struja, koja u vodiču u 1 sekundi proizvede jednaku količinu topline kao i istosmjerna struja od 5 A.* Kad bismo takvu izmjeničnu struju pustili da teče kroz ampermetar na slici 11. (pa i kroz onaj na slici 12.), njegova bi kazaljka pokazala 5 A upravo tako, kao da kroza nj teče istosmjerna struja od 5 A. Tako određena vrijednost izmjenične struje naziva se *efektivna vrijednost struje*. Ona je manja od maksimalne vrijednosti struje, kako to pokazuje omjer:

$$\frac{\text{maksimalna vrijednost}}{\text{efektivna vrijednost}} = 1,41.$$

Izmjenična struja od 5 A, 50 Hz takva je dakle struja (slika 138.), koja 50 puta u sekundi raste od nule do maksimalne vrijednosti $1,41 \times 5 = 7,05$ A, zatim opada do nule, mijenja smjer, raste do jednake maksimalne vrijednosti u protivnom smjeru, pa opet opada do nule i t. d.

I napon je kod izmjenične struje promjenljiva veličina. I za napon vrijedi isti omjer između maksimalne i efektivne vrijednosti kao i za struju. Ako je efektivna vrijednost napona 220 V, maksimalna vrijednost je $1,41 \times 220 = 310$ V.



Sl. 138. Izmjenični napon i izmjenična struja označuju se efektivnim vrijednostima. Maksimalne vrijednosti su 1,41 puta veće od efektivnih.

Kod izmjenične se struje i jakost struje i visina napona navode u efektivnim vrijednostima. Kad god se kod izmjenične struje navode jakost struje ili visina napona, uvijek se pritom misli na efektivne vrijednosti. I svi su naši mjerni instrumenti baždareni za efektivne vrijednosti, pa voltmetri i ampermetri ne mjere nikada maksimalnu vrijednost napona odn. struje, već uvijek njihove efektivne vrijednosti.

Zadatak 152. Koliki je maksimalni napon između vodiča, ako je vod pod naponom od 10 000 (35 000; 220) V?

Zadatak 153. Izmjenična struja, koje je maksimalna vrijednost 10 (2; 5) A, teče kroz otpor 10 (100; 20) Ω . Koliku toplinu proizvede ona u tom otporu za vrijeme jednog sata (15 min; 1 dana)?

9.6. INDUKTIVITET U KRUGU IZMJENIČNE STRUJE

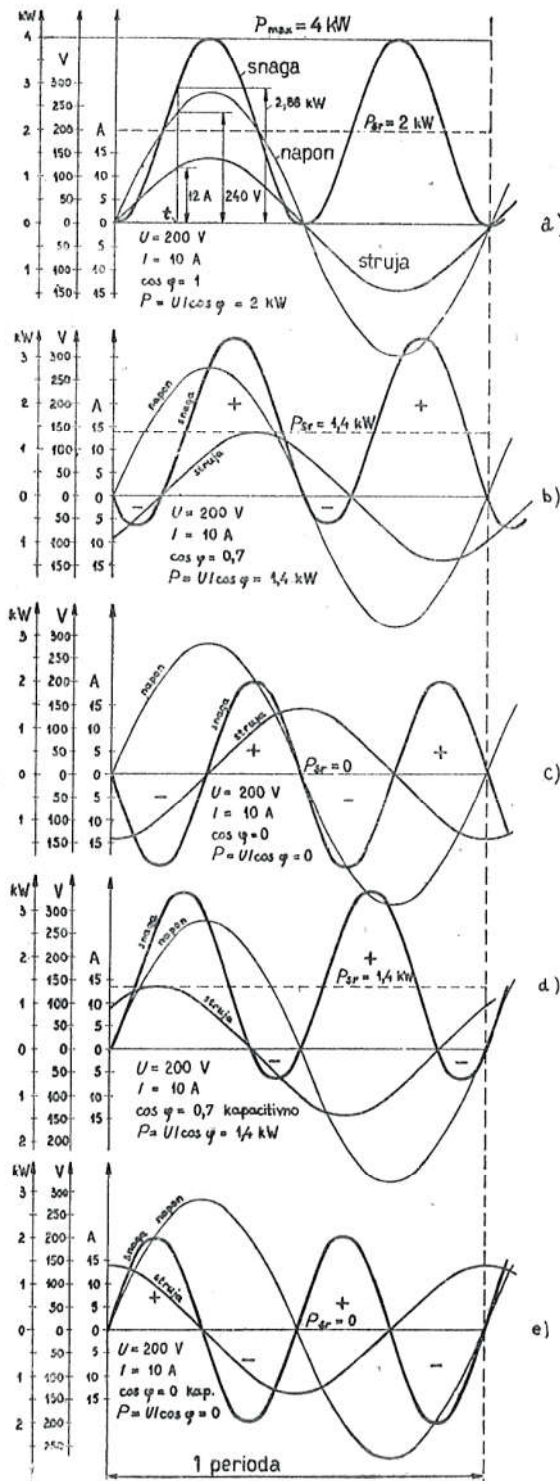
Strujni krugovi s induktivitetom ili — kako ih još nazivaju — induktivni strujni krugovi jesu takvi, kod kojih kod promjene struje nastaje značajnija elektromotorna sila zbog samoindukcije ili međusobne indukcije.

Ako na izvor istosmjernje struje priključimo strujni krug s induktivite-
tom, struja ne će trenutno narasti na
zakonu odgovarala narinutom naponu

on u vrijednost, koja bi prema Ohmovu
i otporu, već će zbog protivljenja elek-
tromotorne sile samoindukcije biti zato
potrebno neko vrijeme. To je vrijeme
vrlo kratko, ono iznosi tek djelić se-
kunde. Uzmimo strujni krug takav, da
to vrijeme iznosi 1/100 (jednu stotinku)
sekunde pa ga priključimo na izvor
izmjenične struje. Razmotrimo, što će
se dogoditi.

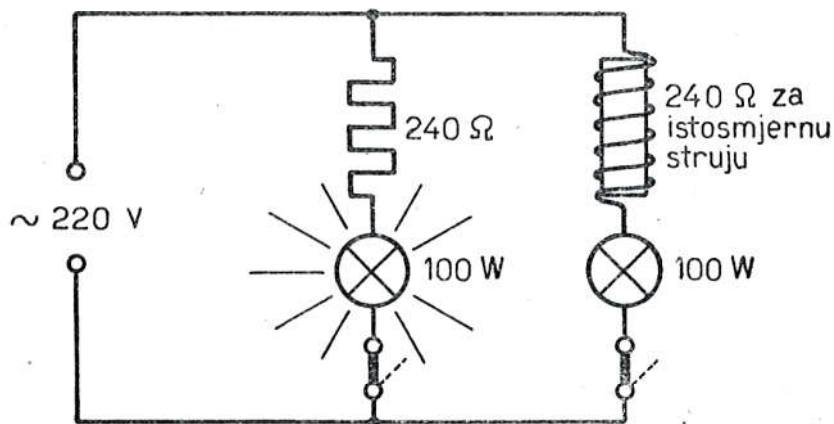
Kad ne bi bilo induktiviteta, stru-
ja bi u svakom momentu bila raz-
mjerna s naponom, kako to prikazuju
slike 138. i 139.a. Za koliko bi posto-
taka za neko vrijeme porastao odnosno
opao napon, za točno isto toliko po-
stotaka bi za isto vrijeme porasla od-
nosno opala struja. No ako u strujnom
krugu ima induktiviteta, onda se sva-
koj promjeni struje opire elektromo-
torna sila samoindukcije. Struja ne će
moći slijediti napon onako, kao kad ne-
ma induktiviteta. Izmjenična struja
raste u jednoj četvrtini periode, a u
druvoj četvrtini periode već opada. Kod
frekvencije 50 Hz jedna četvrtina peri-
ode iznosi tek 1/200 sekunde. Ako u na-
šem strujnom krugu struja zbog induk-
tiviteta treba 1/100 sekunde, da postigne
svoju konačnu vrijednost, onda će za
1/200 s postići tek približno polovinu
te vrijednosti, a napon već počinje opa-
dati. Struja dakle ne će nikada moći
postići onu jakost, koju bi postigla, kad
ne bi bilo induktiviteta. Induktivitet u
strujnom krugu djeluje kao povećanje
otpora. Strujni krug s induktivitetom
ima prividno veći otpor za izmjeničnu
nego za istosmjernu struju. Taj otpor
nazivamo stoga *prividni otpor*.

To se povećanje otpora lijepo ra-
zabire iz ovoga pokusa (slika 140.): 2
žarulje po 100 W priključimo paralelno
na napon 220 V, ali preko predotpor-
nika otpora 240 Ω tako, da svaka ža-
rulja dobije 110 V. Lijevi predotpornik



Sl. 139. Napon i struja nisu uvijek u fazi. a) Omsko opterećenje: napon i struja su u fazi, $\cos \varphi = 1$. b) Induktivno opterećenje: struja zaostaje za naponom, $\cos \varphi = 0,7$. c) Posve induktivno opterećenje: struja zaostaje za naponom za $1/4$ periode, $\cos \varphi = 0$. d) Kapacitivno opterećenje: struja prethodi naponu, $\cos \varphi = 0,7$. e) Posve kapaci-
tivno opterećenje: struja prethodi naponu za $1/4$ periode, $\cos \varphi = 0$.

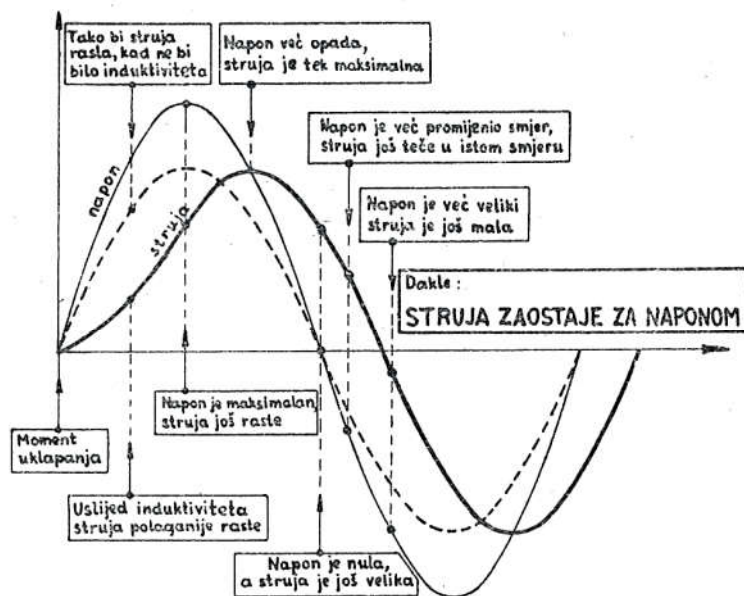
građen je tako, da nema praktički nikakva induktiviteta, a desni je svitak sa željezom, pa ima prema tome veliki induktivitet. Priključene na istosmjernu struju obje žarulje gore posve jednako, tek kod paljenja desna žarulja treba trenutak dulje da zasvijetli, a kod gašenja ona trenutak dulje svijetli. Kod priključka na izmjeničnu struju lijeva žarulja svijetli kao i kod istosmjerne



Sl. 140. Svitak ima zbog induktiviteta znatno veći otpor za izmjeničnu nego za istosmjernu struju. Kroz desnu sijalicu teče tako mala struja, da ona ni ne svijetli:

struje, dok desna ostaje posve tamna. Zbog velike elektromotorne sile samo-indukcije svitka sa željezom njegov je prividni otpor za izmjeničnu struju tako velik, da svitak propušta samo neznatnu struju, premalu, a da bi užarila nit žarulje.

Induktivitet u krugu izmjenične struje uzrokuje ne samo smanjenje struje, već i još jednu ne manje važnu pojavu. Zbog djelovanja elektromotorne sile samoidukcije struja ne raste i ne opada istovremeno s naponom, njezine promjene zaostaju za promjenama napona, kako pokazuje sl. 141. Struja sporije raste nego napon, pa postizava svoju najveću vri-



Sl. 141. Kod induktivnih strujnih krugova, odnosno induktivnog opterećenja, struja zaostaje za naponom.

jednost tek onda, kad napon već opada. Kad je napon već spao na nulu, struja još uvijek teče, jer je sada (kao što smo vidjeli prije kod isklapanja istosmjerne struje) podržava elektromotorna sila samoindukcije. Kad napon postigne maksimum u protivnom smjeru, struja još nije narasla na maksimalnu vrijednost nego tek trenutak nakon toga, a kad napon spadne na nulu, struja još

uvijek teče. Promjene struje zaostaju dakle za promjenama napona, pa kažemo, da u strujnim krugovima s induktivitetom struja zaostaje za naponom. To zaostajanje struje za naponom postoji, dokle god se prilike u strujnom krugu ne promijene, i ono ovisi samo i jedino o osobinama dotičnog strujnog kruga.

Strujni krugovi s induktivitetom nazivaju se često i kraće *induktivni strujni krugovi*, a oni koji su praktički bez induktiviteta, *neinduktivni strujni krugovi*.

Kod induktivnih strujnih krugova struja se mijenja zajedno s naponom, struja je u svakom trenutku razmjerna s naponom (slika 139.a). Kažemo, da je struja u fazi s naponom.

»U fazi« kažemo skraćeno, umjesto da kažemo »u istoj fazi«, a to znači, da se promjene vrše istovremeno. Da su struja i napon u fazi znači dakle, da imaju u istom trenutku najveću, maksimalnu vrijednost, da im je u istom trenutku vrijednost jednaka nuli, da istovremeno jednako rastu i padaju. I kod gradnje vodova, na pr., razlikujemo nekoliko faza: iskop jama, razvoz stupova, pričvršćivanje izolatora, podizanje stupova, natezanje vodiča. Dva su voda »u istoj fazi«, ako je rad kod obadva podjednako poodmakao.

Kod induktivnih strujnih krugova struja i napon nisu u fazi, između njih postoji *fazni pomak*. Taj je fazni pomak to veći, što je veća elektromotorna sila samoindukcije, a ona je to veća, što je veći induktivitet strujnoga kruga te što je veća frekvencija. Kod veće frekvencije promjene napona i struje su brže, a znamo da baš o brzini mijenjanja struje ovisi veličina inducirane elektromotorne sile samoindukcije. Odatle proizlazi, da je *prividni otpor induktivnog strujnog kruga to veći, što je frekvencija struje veća*.

Porast faznog pomaka između napona i struje zbog sve većeg utjecaja samoindukcije prikazuju slike 139.b. i 139.c. Slika 139.c odgovara takvom strujnom krugu, kod kojega je otpor prema istosmjernoj struji neznatan. Kad takav strujni krug priključimo na izmjenični napon, struja ovisi samo o induktivitetu strujnoga kruga. U takvom ekstremnom slučaju ona zaostaje za naponom za $1/4$ periode. Kad je napon najveći, struja je jednaka nuli, i obratno, kad je struja najveća, napon je jednak nuli.

9.7. VELIČINA INDUCIRANE ELEKTROMOTORNE SILE KOD PRIKLJUČKA SVITKA NA IZMJENIČNU STRUJU

Iz pokusa na slici 140. vidjeli smo, da svitak sa čelikom predstavlja veliki otpor za izmjeničnu struju. Tom je otporu uzrok elektromotorna sila samoindukcije, koja se u svitku inducira zbog mijenjanja magnetskog toka. Ona ovisi o ovim faktorima:

a) Elektromotorna sila samoindukcije to je veća, što je veći promjenljivi magnetski tok, koji je uzrokuje.

b) Ona je to veća, što se taj magnetski tok brže mijenja, t. j. što je veća frekvencija struje.

c) Ona je to veća, što je veći broj zavoja svitka; promjenljivi magnetski tok inducira elektromotornu silu samoindukcije u svakom zavoju svitka, kroz koji on prolazi, pa je ukupna elektromotorna sila jednaka zbroju elektromotornih sila u pojedinim zavojima.

Sve, što je rečeno, dade se izraziti i pomoću formule:

$$E = 4,44 \Phi_{\max} f N \text{ volta}^*,$$

gdje je: E - efektivna vrijednost elektromotorne sile u voltima, $\Phi_{\max}$ - maksimalni magnetski tok u veberima (max je kratica od maksimalan, a to znači najveći), f - frekvencija u hercima, N - broj zavoja.

35. *primjer.* Priključimo svitak sa 20 zavoja na izmjenični napon 10 V i 50 Hz. Svitak je namotan na prstan, koji je sastavljen od tankih dinamo-limova. Prsten ima srednji promjer 20 cm i presjek 20 cm². Žica svitka je tako debela, da joj je otpor neznatan.

- Koliki je maksimalni magnetski tok kroz svitak?
- Kolika je pripadna magnetska indukcija?
- Kolika je jakost magnetskog polja?
- Kolika je efektivna jakost struje kroz svitak?

Rješenje:

a) Budući da je otpor žice svitka neznatan, možemo ga kod računa zanemariti. U tom slučaju mora inducirana elektromotorna sila samoindukcije biti jednaka naponu 10 V. Tu elektromotornu silu samoindukcije proizvodi magnetski tok Φ , kojega maksimalnu vrijednost $\Phi_{\max}$ možemo izračunati iz formule:

$$E = 4,44 \Phi_{\max} f N.$$

Odavle je:

$$\Phi_{\max} = \frac{E}{4,44 f N} = \frac{10}{4,44 \cdot 50 \cdot 20} = 0,00225 \text{ Wb.}$$

$$\text{b) } B_{\max} = \frac{\Phi_{\max}}{S} = \frac{0,00225}{0,002} = 1,125 \text{ T} \quad (20 \text{ cm}^2 = 0,002 \text{ m}^2).$$

c) Pripadnu jakost magnetskog polja dobijemo iz slike 111:

$$H_{\max} = 350 \text{ A/m.}$$

d) Jakost struje kroz svitak dobijemo iz formule na strani 101.:

$$H = \frac{I N}{l}.$$

Odavle je:

$$I_{\max} = \frac{H_{\max} l}{N} = \frac{350 \cdot 0,628}{20} = 11,0 \text{ A.}$$

Umjesto maksimalne jakosti struje redovno računamo s efektivnom vrijednošću, koja je 1,41 - puta manja, t. j.

$$I = 11,0 : 1,41 = 7,8 \text{ A.}$$

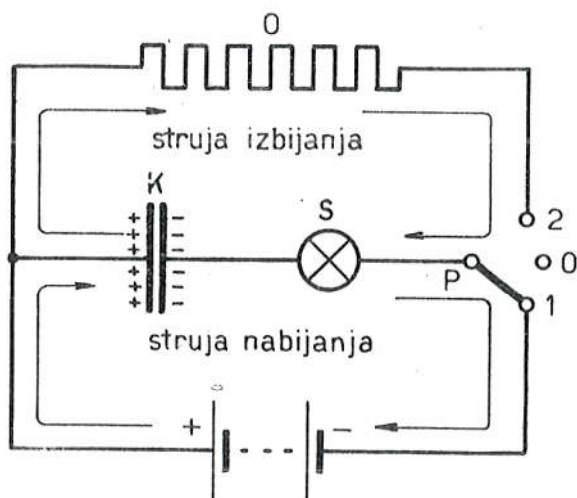
9.8. UKLAPANJE I ISKLAPANJE KONDENZATORA

Uzmimo, da je kondenzator spojen prema slici 142. u seriju sa žaruljom te da je priključen preko preklopke P na izvor istosmjerne struje. Pomoću preklopke P mogu se kondenzator i žarulja preklopiti u drugi strujni krug, u kojem nema nikakvog izvora struje.

* Ako magnetski tok mjerimo u meksvelima, ova formula glasi:

$$E = \frac{4,44 \Phi_{\max} f N}{10^8} = 4,44 \Phi_{\max} f N \cdot 10^{-8} \text{ volta.}$$

Kad preklopku iz položaja 0 prelopimo u položaj 1, kondenzator je priključen na izvor istosmjerne struje. Elektromotorna sila izvora struje potjera elektrone tako, da se na pločama kondenzatora skuplja električni naboj: kondenzator se nabija. Ta struja nabijanja vrlo je kratkotrajna; ona teče tek mali dio sekunde, jer je kondenzator u tili čas nabijen. Ta struja teče nainavno i kroz žarulju, koja je spojena u seriju s kondenzatorom, pa žarulja načas zasvijetli.



Sl. 142. I kod nabijanja i kod izbijanja kondenzatora teče struja. Kod preklapanja preklopke žarulja svaki put zasvijetli.

K - kondenzator, S - sijalica (žarulja), P - preklopka.
O - otpornik.

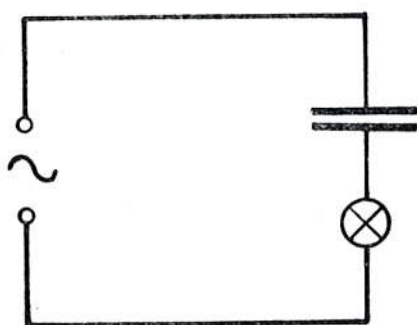
Preklopimo sad preklopku iz položaja 1 u položaj 2. Naboj, koji je skupljen na pločama kondenzatora, može se sada izjednačiti preko otpornika O: kondenzator se izbija. Zbog struje izbijanja, koja je također kratkotrajna kao i struja nabijanja, žarulja opet na trenutak zasvijetli.

Kad bismo brzo vršili preklapanje preklopke, recimo 2—3 puta u sekundi, žarulja bi neprestano svijetlila, samo što bi njezina svjetlost jako treptala. Kad bismo još ubrzali preklapanje tako, da bismo umjesto obične preklopke uzeli nekakvu motornu preklopku, koja bi mogla vršiti 50 do 100 preklapanja u sekundi, žarulja bi trajno svijetlila, kao da je direktno priključena na izvor istosmjerne struje. Kroz nju bi čas tekla struja nabijanja, a čas, u protivnom smjeru, struja izbijanja kondenzatora. Prekidi struje bili bi tako kratkotrajni, da se nit žarulje ne bi dospjela skoro nimalo ohladiti, pa se ne bi primjećivalo nikakvo treptanje.

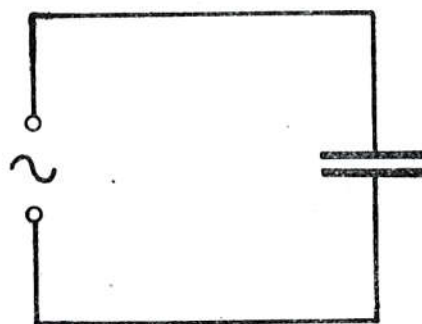
9.9. KAPACITET U KRUGU IZMJENIČNE STRUJE

Ako kondenzator priključimo na izvor izmjenične struje, što će se dogoditi? Događat će se nešto vrlo slično onome, što smo vidjeli kod pokusa prema slici 142. Kondenzator će se nabijati, čas zatim izbijati, pa opet nabijati, samo u drugom smjeru, te opet izbijati i t. d. A sve to toliko puta u sekundi, kolika je frekvencija izmjenične struje. U strujnom krugu teći će izmjenična struja, pa se čini, kao da izmjenična struja teče kroz kondenzator. Dok kod istosmjerne struje kondenzator predstavlja prekid strujnoga kruga, jer njegove ploče nisu međusobno spojene, dotle on na izmjeničnu struju djeluje samo kao neki »otpor«. Veći kondenzator, t. j. kondenzator većeg kapaciteta, može uz isti napon primiti veći naboj, pa će struja biti veća: »Otpor« kondenzatora je to manji, što je kondenzator veći.

Za vrijeme svake periode kondenzator će se nabijati i izbijati dvaput: jedamput u jednom, drugi put u drugom smjeru, jer struja teče u prvoj polovici periode u jednom, a u drugoj u protivnom smjeru. Ona količina elektrike, koju kondenzator može primiti kao električni naboj, teći će prema tome kao izmjenična struja toliko puta u sekundi amo — tamo, koliko iznosi frekvencija izmjenične struje. Na pr. kod frekvencije 50 Hz ta određena količina elektrike (koja ovisi samo o kapacitetu kondenzatora i o visini narinutog napona) proteći će svake sekunde kroz bilo koji presjek strujnog kruga 50 puta u jednom i 50 puta u drugom smjeru. Kod frekvencije 100 Hz ta će ista količina elektrike proteći kroz bilo koji presjek strujnog kruga 100 puta u jednom i 100 puta u drugom smjeru. A kako struja nije drugo već ona količina elektrike, koja u jednoj sekundi proteče kroz neki presjek strujnog kruga, bit će struja u drugom slučaju dvaput jača nego u prvom. Općenito, *uz jednako visoki narinuti napon struja, koja teče kroz neki kondenzator, to je jača, što je frekvencija narinutog napona viša.*



Sl. 143. Kapacitivno opterećenje: strujni krug s kondenzatorom i žaruljom. Struja prethodi naponu.



Sl. 144. Posve kapacitivno opterećenje: strujni krug sa samim kondenzatorom. Struja prethodi naponu za $\frac{1}{4}$ periode.

Razmatrajući induktivitet u krugu izmjenične struje ustanovili smo, da struja i napon nisu u fazi, već da struja zaostaje za naponom to više, što je veći utjecaj elektromotorne sile samoindukcije. Pa ni kod kapaciteta u krugu izmjenične struje nisu struja i napon u fazi. No *kod kapacitivnih strujnih krugova struja prethodi naponu*, kako to prikazuju slike 139.d i 139.e. Kod toga slika 139.d odgovara na pr. spoju prema slici 143., a slika 139.e spoju prema slici 144., gdje je na izvor izmjenične struje spojen samo kondenzator. Ako u krugu izmjenične struje imamo samo kondenzator, t. j. samo kapacitet, onda struja najviše prethodi naponu, i to za $\frac{1}{4}$ periode.

Kako to, da kod kapacitivnih strujnih krugova struja prethodi naponu? Promatrajući uklapanja i isklapanja kondenzatora prema slici 142. ustanovili smo, da pri uklapanju kondenzatora nastaje kratkotrajna struja, koja dovodi na ploče kondenzatora izvjesnu količinu elektrike, zbog čega između tih ploča nastaje električni napon. Obratno, pri isklapanju opet teče kratkotrajna struja, kojom se naboji ploča izjednačuju: napona nestaje. Postanak i nestanak električnog napona između ploča kondenzatora *posljedica* je električne struje. Prema tome mora ovdje struja doista i prethoditi naponu.

9.10. SNAGA IZMJENIČNE STRUJE

Vidjeli smo, da je snaga struje jednaka umnošku napona i struje. To vrijedi ne samo za istosmjernu struju, već i za bilo kakvu struju, no s malom ali bitnom nadopunom: *trenutna vrijednost snage jednaka je umnošku tre-*

nutne vrijednosti napona i trenutne vrijednosti struje, gdje se pod trenutnim vrijednostima razumijevaju veličine snage, napona i struje u nekom trenutku.

Da to objasnimo, vratimo se ponovo na sliku 139. Pomnožiti trenutne vrijednosti napona i struje znači pomnožiti one vrijednosti, koje se nalaze jedna iznad druge na krivuljama napona i struje. U trenutku t na pr., koji je prikazan na slici 139.a, napon iznosi 240 V, a struja 12 A. Snaga dakle u tom trenutku iznosi $240 \times 12 = 2880 \text{ W} = 2,88 \text{ kW}$, što je također naznačeno na slici. Izračunavajući na taj način snagu točku po točku može se uvijek iz krivulja napona i struje dobiti krivulja snage.* Te su krivulje snage i nacrtane na svim slikama 139.

Sve slike 139. odnose se na takve strujne krugove, odnosno na takva trošila, na stezaljkama kojih je izmjenični napon $U = 200 \text{ V}$, a u kojima teče izmjenična struja $I = 10 \text{ A}$. No 200 V i 10 A jesu efektivne vrijednosti napona, odn. struje, dok su maksimalne vrijednosti 1,41 puta veće, t. j. 282 V i 14,1 A. Iz slika vidimo, da se snaga na jednaki način mijenja kao i napon i struja, samo da je frekvencija snage dvostruka. *Snaga izmjenične struje nije konstantna, već se mijenja s frekvencijom dvaput većom od frekvencije struje i napona.*

Slika 139.a odnosi se na trošila bez induktiviteta i kapaciteta. Snaga, koju uzima takvo trošilo (na pr. električna peć), mijenja se od nule do maksimalno 4 kW. Srednja snaga iznosi 2 kW, a samo ona je dakako mjerodavna za potrošak energije. Ova srednja snaga iznosi:

$$P = 2 \text{ kW} = 2000 \text{ W} = UI.$$

Kod trošila bez induktiviteta i kapaciteta snaga je dakle, kao i kod istosmjerne struje, jednaka umnošku napona i struje.

Drukčije je kod induktivnih strujnih krugova, odnosno kod trošila s induktivitetom, kod kojih napon i struja nisu u fazi (slike 139.b i 139.c). Ovdje uz efektivne vrijednosti napona i struje jednake kao i prije trenutna snaga nikada ne doseže 4 kW, a ona poprima čak i negativne vrijednosti, kako to pokazuje dio krivulje snage ispod horizontalne osi. Što to znači, da trenutna snaga poprima i negativne vrijednosti? To znači, da se za to vrijeme energija vraća od trošila prema izvoru struje. Dio one energije, dakle, što ju je trošilo u jednom dijelu periode primilo od izvora struje, vraća ono u drugom dijelu periode natrag izvoru struje.

Samo jedan dio električne energije ostaje u trošilu, t. j. troši se u njemu, dok se jedan dio energije »njiše« između izvora struje i trošila. Taj dio, koji se »njiše«, to je veći, što struja više zaostaje za naponom, t. j. što je veći utjecaj elektromotorne sile samoindukcije. U krajnjem slučaju, kad je na izvor struje priključeno trošilo velikog induktiviteta, a neznatnog otpora prema istosmjernoj struji, struja zaostaje za naponom, kao na slici 139.c, za $1/4$ periode. U tom je slučaju srednja snaga $P = 0$, jer svekoliku energiju, koju svitak u jednom dijelu periode povuče od izvora struje, svu tu energiju mu on u drugom dijelu periode vrati. Cjelokupna energija u tom slučaju njiše se između izvora struje i trošila.

U kapacitivnim strujnim krugovima, odnosno u trošilima s kapacitetom, događa se nešto slično. I ovdje je srednja snaga to manja,

* Kod toga treba uzeti u obzir, da je umnožak dviju pozitivnih ili dviju negativnih veličina pozitivna veličina, a umnožak jedne pozitivne i jedne negativne veličine negativna veličina.

što je fazni pomak veći. I ovdje se jedan dio energije njiše između izvora struje i trošila.

Kako smo već rekli, srednja snaga je ona, o kojoj ovisi potrošak energije kod izmjenične struje. Stoga mi obično ne kažemo srednja snaga, već naprosto snaga. A budući da kod izmjenične struje ima, kako ćemo još vidjeti, i drugih vrsta snage, nazivamo ovu srednju snagu kadšto i *djelatnom snagom*, jer je samo ona mjerodavna za izvršeni rad.

Djelatna snaga je najveća, kad su struja i napon u fazi, a jednaka nuli, kad fazni pomak između njih iznosi 1/4 periode. Najveća djelatna snaga, koja se može postići uz određeni napon i određenu struju, jednaka je umnošku napona i struje:

$$P_{\max} = UI.$$

Ova najveća djelatna snaga naziva se *prividna snaga*:

$$P_z = P_{\max} = UI$$

Djelatna snaga je dakle manja ili najviše jednaka prividnoj snazi. Omjer između djelatne snage i prividne snage naziva se *faktor snage ili kosinus fi*, a piše se $\cos \varphi$.

$$\frac{P}{P_z} = \cos \varphi \quad \text{ili} \quad \frac{P}{UI} = \cos \varphi.$$

Prema tome se snaga kod izmjenične struje može izračunati po formuli:

$$P = UI \cos \varphi$$

Kosinus fi je prema gornjim formulama uvijek manji od 1 ili najviše jednak 1. Što je fazni pomak veći, kosinus fi je manji i obratno.

Prividna je snaga jednaka umnošku napona i struje, umnošku volta i ampera. Jedinica, kojom se ona mjeri, naziva se zato *voltamper* (oznaka VA). Još se više upotrebljava veća jedinica *kilovoltamper* (oznaka kVA). Jasno je, da je 1 kVA = 1000 VA. Upotrebljava se i još veća jedinica *megavoltamper* (1 MVA = 1000 kVA = 1000 000 VA).

Snaga, koja se u otporu R troši na stvaranje topline, izračunava se po Jouleovu zakonu jednako kao kod istosmjerne struje:

$$P = I^2 R \text{ vata,}$$

gdje je I — struja u amperima, a R — otpor u omima. Ovakav otpor, u kojemu se stvara topline, zove se *djelatni ili omski otpor*.

Zadatak 154. Koliku snagu uzima iz mreže mali motor za 220 (110; 190) V, ako uzima struju 12 (15; 4,5) A uz $\cos \varphi = 0,72$ (0,68; 0,66)?

Zadatak 155. Kod nekog motora za pogon tokarskog stroja izmjerimo napon $U = 440$ (220; 220) V, struju $I = 7,6$ (22,9; 21,2) A i snagu, koju uzima iz mreže, $P = 2,1$ (3,27; 2,84) kW. Koliki je $\cos \varphi$?

Zadatak 156. Koliku struju uzima iz mreže kod potpunog opterećenja motor izmjenične struje od 4 (3; 2) KS, 220 (440; 110) V, s korisnošću od 80 (76; 74) % te faktorom snage 0,75 (0,72; 0,69)? Kolika je prividna snaga tog motora?

Zadatak 157. Priključimo neki svitak na izvor istosmjerne struje od 110 (220; 12) V. Kod toga svitak uzima struju 8,7 (10,0; 0,55) A. Ako taj isti svitak priključimo na izvor izmjenične struje, uzima on struju 2,7 (3,5; 0,082) A uz $\cos \varphi = 0,31$ (0,35; 0,15). Koliku snagu uzima svitak u jednom i u drugom slučaju?

* φ — grčko slovo »fi«. Izraz »kosinus fi« je izraz iz matematike, a predočuje izvjesnu matematičku zavisnost od faznog pomaka, koji se označuje sa φ .

Zadatak 158. Kod tvornice Rade Končar naručen je generator izmjenične struje za napon $U = 230$ V te struju $I = 50$ (30; 600) A uz $\cos \varphi = 0,7$ (0,75; 0,8). Koliku će prividnu snagu moći proizvoditi taj generator? Koliku će djelatnu snagu moći proizvoditi?

Zadatak 159. Generator izmjenične struje u staroj varaždinskoj elektrani bio je građen za napon 2000 (220; 440) V i za struju 82,5 (228; 18,2) A. Kolika je bila njegova prividna snaga? Koliku je on najveću djelatnu snagu mogao davati, ako je bio opterećen uz $\cos \varphi = 0,7$ (0,6; 0,8)? Koliku je djelatnu snagu mogao davati, ako je bio opterećen uz $\cos \varphi = 1$?

9.11. OHMOV ZAKON ZA IZMJENIČNU STRUJU

1. Priključimo neki otpor, na pr. žarulju, na izmjenični napon U . Ako je njezin otpor R , možemo izračunati struju, koja će teći kroz nju, po istoj formuli kao i kod istosmjerne struje:

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

Općenito, kod strujnih krugova bez induktiviteta i kapaciteta vrijedi Ohmov zakon točno u istom obliku kao i kod istosmjerne struje. Stoga se čisti otpor bez induktiviteta i kapaciteta naziva kod izmjenične struje *omski* ili *djelatni otpor*, a za trošila, koja imaju samo omski otpor, kažemo, da uzrokuju *omsko*, *djelatno* ili *vatno opterećenje*.

2. Ako međutim na izmjenični napon priključimo svitak, koji ima tako neznatni otpor prema istosmjernoj struji, da ga možemo zanemariti, ali koji zato ima induktivitet, teći će kroz taj svitak razmjerno mala struja, kako smo već vidjeli na strani 133. Narinutom naponu protivit će se inducirana elektromotorna sila samoindukcije. I svitak dakle predstavlja neki otpor za izmjeničnu struju. Taj otpor, obilježimo ga sa X_L , to je veći, što je induktivitet svitka veći, i što je frekvencija struje veća. Možemo ga izračunati po formuli:

$$X_L = 2\pi f L \text{ oma,}$$

gdje je $\pi = 3,14$, f — frekvencija u Hz, L — induktivitet u henrijima. I za ovakav *induktivni otpor* vrijedi Ohmov zakon, pa se struja može izračunati po formuli:

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

3. Priključimo li na izmjenični napon umjesto svitka kondenzator, i on će za protjecanje struje predstavljati neki otpor. No taj će otpor ovdje biti manji, što je kapacitet kondenzatora veći i što je frekvencija struje viša. Taj *kapacitivni otpor*, označimo ga sa X_C , iznosi:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \text{ oma.}$$

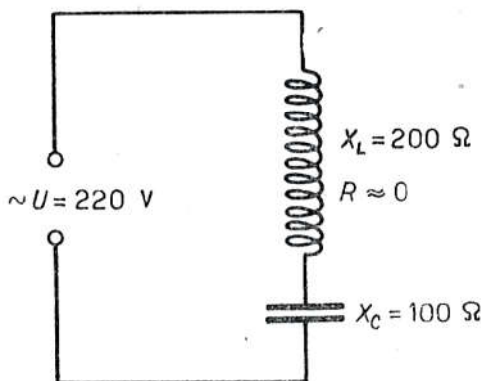
Struja se može izračunati jednako kao i prije:

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

Ni induktivni ni kapacitivni otpor nisu dakle stalne, konstantne veličine, već one ovise o frekvenciji. *Dok se induktivni otpor povećava s porastom frekvencije, dotle se kapacitivni otpor s porastom frekvencije smanjuje.*

4. Priključimo svitak induktivnog otpora $X_L = 200 \, \Omega$ i omskog otpora $R = 0$ u seriju s kondenzatorom otpora $X_C = 100 \, \Omega$ prema slici 145. na izmje-

Sl. 145. Serijski spoj svitka i kondenzatora. Svaki om induktivnog otpora poništava učinak svakog oma kapacitivnog otpora i obratno.



nični napon $U = 220 \, \text{V}$. Da izračunamo struju, moramo prije toga izračunati ukupni otpor. Iz poučka za istosmjernu struju znamo, da se serijski otpori zbrajaju, pa bismo mogli napisati: $X = X_L + X_C$. No kod izmjenične struje to ne vrijedi:

$$\cancel{X = X_L + X_C}$$

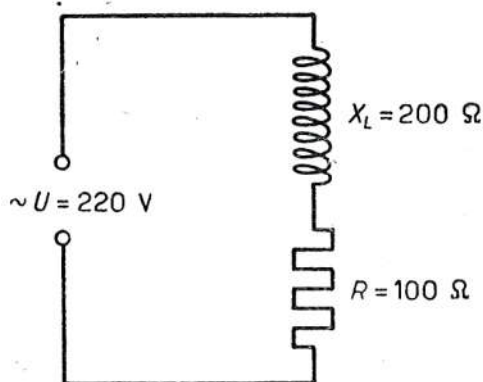
Kod izmjenične struje vrijedi naprotiv pravilo: *Ukupni otpor serijskog spoja induktivnog i kapacitivnog otpora dobije se tako, da se manji odbije od većega. Dakle:*

$$X = X_L - X_C = 200 - 100 = 100 \, \Omega,$$

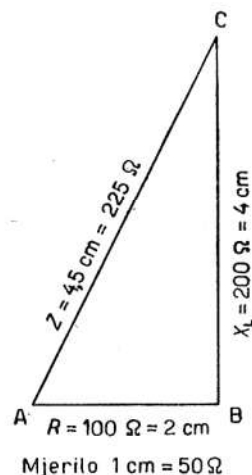
te:

$$I = \frac{U}{X} = \frac{220}{100} = 2,2 \, \text{A}.$$

5. Zamijenimo sad kondenzator u prošlom primjeru s otpornikom omskog otpora $R = 100 \, \Omega$ (slika 146.). Kako ćemo sada izračunati ukupni otpor? To



Sl. 146. Serijski spoj omskog i induktivnog otpora: Ukupni otpor je manji nego njihov zbroj.



Sl. 147. Serijski spoj omskog i induktivnog otpora: Grafičko računanje ukupnog otpora.

se može učiniti grafički, t. j. pomoću slike, i računski. Promotrimo najprije grafički način. Uzmimo, da dužina 1 cm predstavlja otpor 50 oma.

Tada treba da omski otpor $R = 100 \, \Omega$ nacrtamo kao vodoravnu dužinu $\overline{AB}$ od 2 cm (slika 147.) te da na njezinu kraju podignemo okomicu BC duljine 4 cm, koja predstavlja induktivni otpor $X_L = 200 \, \Omega$. Tada nam spojnica početne točke A i krajnje točke C po svojoj duljini predstavlja ukupni otpor. Mjerenjem dužine AC ustanovimo, da je $AC = 4,5$ cm. A kako svaki centimetar vrijedi $50 \, \Omega$, ukupni je otpor Z

$$Z = 4,5 \cdot 50 = 225 \, \Omega.$$

A struja je prema tome:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{225} = 0,92 \, \text{A}.$$

Ukupni otpor Z naziva se *prividni otpor*.

Računski možemo doći do istog rezultata pomoću Pitagorina poučka. Ako pogledamo sliku 147. vidimo, da otpori Z , R i X_L čine pravokutan trokut, u kojemu je Z hipotenuza, a R i X_L su katede. Prema Pitagorinu je poučku dakle

$$Z^2 = R^2 + X_L^2$$

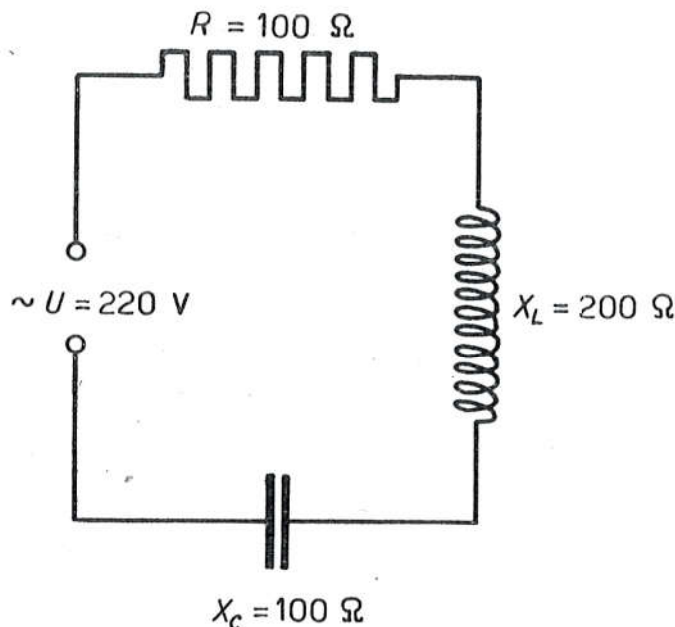
ili:

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

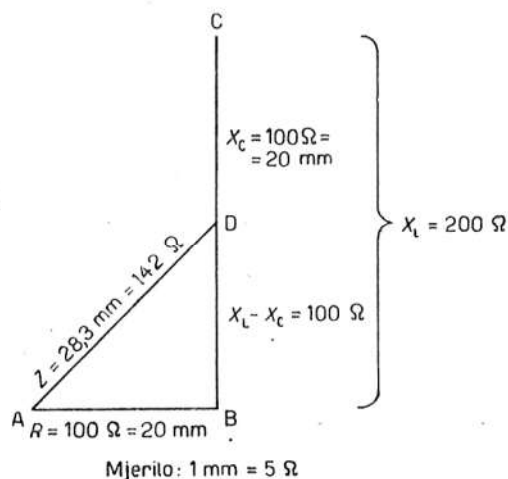
Uvrstimo vrijednosti za R i X_L :

$$Z = \sqrt{100^2 + 200^2} = \sqrt{50\,000} = 224 \, \Omega.$$

Grafičkim smo načinom dobili $225 \, \Omega$. Razlika je nastala zbog netočnosti crtanja. No i grafički je način kod većine praktičnih računa dovoljno točan.



Sl. 148. Serijski spoj omskog, induktivnog i kapacitivnog otpora.



Sl. 149. Serijski spoj omskog, induktivnog i kapacitivnog otpora: Grafičko računanje ukupnog otpora.

6. Spojimo prema slici 148. u seriju i omski otpor $R = 100 \, \Omega$, i induktivni otpor $X_L = 200 \, \Omega$, i kapacitivni otpor $X_C = 100 \, \Omega$. I ovdje se prividni

otpor može naći grafički i računski. Grafički to činimo prema slici 149. Nanesemo opet R kao vodoravnu dužinu $AB = 2 \text{ cm} = 20 \text{ mm}$, u točki B postavimo okomicu $BC = 4 \text{ cm} = 40 \text{ mm}$, koja odgovara otporu $X_L = 200 \Omega$, a zatim od točke C prema dolje nanesimo dužinu $CD = 2 \text{ cm} = 20 \text{ mm}$, koja odgovara kapacitivnom otporu $X_C = 100 \Omega$. Dužina $BD = BC - CD$ odgovara prema tome razlici induktivnog i kapacitivnog otpora, a već prije smo rekli, da se ta dva otpora odbijaju. Dužina $AD = 28,3 \text{ mm}$ odgovara dakle prividnom otporu Z , a kako je mjerilo $1 \text{ mm} = 5 \Omega$, to je:

$$Z = 28,3 \cdot 5 = 142 \Omega.$$

Struja u strujnom krugu iznosi:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{142} = 1,55 \text{ A}.$$

I ovdje možemo doći do rezultata i računski, pomoću Pitagorina poučka. Prividni otpor Z je hipotenuza trokuta, kojega su katete R i $X = X_L - X_C$. Sasvim općenito vrijedi:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}.$$

Uvrstimo $R = 100 \Omega$ i $X = X_L - X_C = 200 - 100 = 100 \Omega$:

$$Z = \sqrt{100^2 + 100^2} = \sqrt{20\,000} = 141 \Omega.$$

Razlika prema 142Ω , koliko smo dobili grafički, potječe opet od netočnog crtanja.

36. *primjer.* Spojimo u seriju, kao na slici 150., otpornik otpora $R = 200 \Omega$, svitak induktiviteta $L = 1,5 \text{ H}$ te kondenzator kapaciteta $C = 3 \mu\text{F}$, pa ih priključimo na izmjenični napon $U = 100 \text{ V}$, frekvencije $f = 50 \text{ Hz}$. Kolika će struja teći u ovakvom strujnom krugu? Koliki će biti napon na stezaljkama otpornika, svitka i kondenzatora?

Rješenje. Najprije treba izračunati induktivni i kapacitivni otpor:

$$X_L = 2\pi f L = 314 \cdot 1,5 = 471 \Omega^*,$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{314 \cdot 3} \cdot 1\,000\,000 = 1062 \Omega.$$

(Kapacitet C treba naime staviti u formulu u faradima, a ne u mikrofaradima. Budući da je $1 \text{ F} = 1\,000\,000 \mu\text{F}$, to je $3 \mu\text{F} = 3/1\,000\,000 \text{ F}$.) Prividni otpor možemo opet dobiti grafički i računski. Kod grafičkog načina postupamo prema slici 141., gdje je kao mjerilo uzeto $1 \text{ mm} = 20 \Omega$. Budući da kapacitivni otpor prevladava, dužina AD nagnuta je prema dolje. Iz slike dobijemo, da je $AD = 31,2 \text{ mm}$, pa je prema tome

$$Z = 31,2 \cdot 20 = 624 \Omega.$$

* Dobro je upamtiti, da kod normalne frekvencije $f = 50 \text{ Hz}$ $2\pi f$ iznosi 314, t. j. 100 puta toliko, koliko broj π . Naime $2f = 100$, a to pomnoženo s $\pi = 3,14$ daje 314.

Da prividni otpor dobijemo računski, moramo najprije izračunati ukupni otpor od induktivnog i kapacitivnog otpora:

$$X = X_C - X_L = 1062 - 471 = 591 \, \Omega.$$

Pomoću Pitagorina poučka dobijemo:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{200^2 + 591^2} = \sqrt{40\,000 + 349\,281} = \sqrt{389\,281} = 624 \, \Omega.$$

Struja prema tome iznosi:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{100}{624} = 0,160 \, \text{A}.$$

Da izračunamo napone na stezaljkama otpornika, svitka i kondenzatora, sjetimo se, da Ohmov zakon ne vrijedi samo za cijeli strujni krug, već i za svaki njegov dio. Napon na stezaljkama je uvijek jednak umnošku struje i otpora između tih stezaljki (slika 150.), dakle:

$$U_R = I R = 0,160 \cdot 200 = 32,0 \, \text{V}.$$

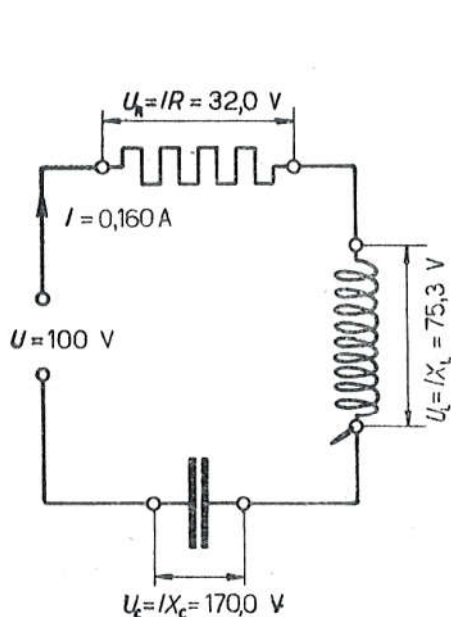
$$U_L = I X_L = 0,160 \cdot 471 = 75,3 \, \text{V},$$

$$U_C = I X_C = 0,160 \cdot 1062 = 170,0 \, \text{V}.$$

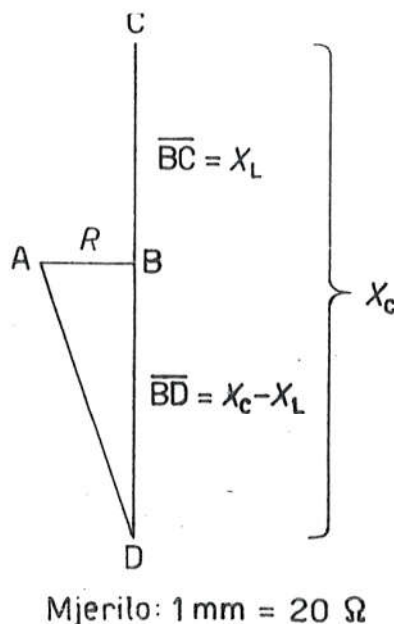
Ako bismo te napone zbrojili, dobili bismo

$$U_R + U_L + U_C = 277,3 \, \text{V},$$

dakle skoro trostruko više nego što iznosi narinuti napon. Pa čak sam napon na stezaljkama kondenzatora iznosi 170 V, dakle znatno više od narinutog



Sl. 150. Kod induktiviteta i kapaciteta u krugu izmjenične struje može napon između pojedinih točaka strujnog kruga biti znatno viši od narinutog napona.



Sl. 151. Grafičko računanje ukupnog otpora uz 36. primjer.

napona. To je moguće zato, što se kod izmjenične struje ni naponi kao ni otpori ne smiju naprosto zbrajati. U našem primjeru vidimo, da otpor kondenzatora iznosi $1062 \, \Omega$, dok je ukupni otpor samo $624 \, \Omega$. Naponi na stezalj-

kama otpornika, svitka i kondenzatora nisu međusobno u fazi. Dok je napon na stezaljkama otpornika u fazi sa strujom, dotle napon na stezaljkama svitka prethodi struji za $1/4$ periode, a napon na stezaljkama kondenzatora zaostaje za strujom za $1/4$ periode. Naponi, koji nisu u fazi, ne smiju se naprosto zbrajati. *Kod strujnih krugova s induktivitetom i kapacitetom može se dogoditi, da napon na jednom dijelu strujnog kruga bude viši, pa čak i znatno viši od narinutog napona.*

Zadatak 160. Na izvor izmjenične struje od 220 (110; 6) V priključimo otpornik bez induktiviteta i kapaciteta. Otpor iznosi 100 (200; 60) Ω . Kolika će struja teći kroz taj otpornik?

Zadatak 161. Kolika će struja teći kroz svitak induktiviteta $L=0,1$ (0,5; 0,08) H, ako ga priključimo na izmjenični napon 110 (220; 42) V, 50 Hz?

Zadatak 162. Kolika će struja teći kroz kondenzator od 8,1 (5,5; 0,8) μF , ako ga priključimo na izmjenični napon 110 (220; 42) V, 50 Hz?

Zadatak 163. Koliki napon nastaje između krajeva svitka induktiviteta 0,01 (0,02; 0,0004) H, kroz koji teče struja 90 (25; 100) A, 50 Hz?

Zadatak 164. Spojimo u seriju otpornik od 20 (10; 5) Ω i svitak od 0,1 (0,06; 0,035) H, pa ih priključimo na izmjenični napon 220 (110; 220) V, 50 Hz. Kolika će biti struja? Koliki će biti napon na stezaljkama otpornika, a koliki na stezaljkama svitka?

Zadatak 165. Spojimo u seriju otpornik od 350 (210; 140) Ω i kondenzator od 12 (5; 4,5) μF , pa ih priključimo na izmjenični napon 220 (110; 220) V, 50 Hz. Kolika će biti struja? Koliki će biti napon na stezaljkama otpornika? Koliki će biti napon na stezaljkama kondenzatora?

Zadatak 166. Spojimo u seriju otpornik od 200 (100; 30) Ω , svitak od 1,5 (2,3; 0,1) H i kondenzator od 10 (7,5; 15) μF , pa ih priključimo na napon 100 (42; 220) V, 50 Hz. Kolika će biti struja? Koliki će biti napon na stezaljkama a) otpornika, b) svitka, c) kondenzatora?

9.12. JALOVA STRUJA, JALOVI OTPOR, JALOVA SNAGA

Ako kondenzator ili svitak s neznatnim omskim otporom priključimo na izvor izmjenične struje, teći će neka struja i kroz kondenzator i kroz svitak. Kod kondenzatora ova struja prethodi naponu za $1/4$ periode, dok kod svitka ona isto toliko za njim zaostaje, kako se vidi iz slika 139.c i 139.e. Srednja snaga, kako se također vidi iz tih slika, jednaka je nuli. Niti u svitku niti u kondenzatoru ta struja ne vrši nikakav rad, pa se ona stoga naziva jalova struja.

Jalovu struju uzrokuje kapacitivni odnosno induktivni otpor. Stoga se jedan i drugi od ovih otpora ili njihova kombinacija nazivaju *jalovi otpor*.

Umnožak jalove struje i napona naziva se *jalova snaga*. Ta snaga posve je beskorisna, njom se ne vrši nikakav rad, ona je samo mjera za onu energiju, koja se »njiše«, koju jalovi otpor čas uzima, da je čas zatim opet vrati natrag. Jedinica za jalovu snagu je var (oznaka: Var), odnosno kilovar (oznaka: kVar)*, gdje je $1 \text{ kVar} = 1000 \text{ Var}$. Jalova snaga 1 Var je ona, kod koje napon iznosi 1 V, a jalova struja 1 A.

Kao što jalovi otpor može biti induktivni i kapacitivni, tako i jalova struja, a s njom i jalova snaga, mogu biti induktivne i kapacitivne. Mnoga električna trošila uzimaju iz električne mreže ne samo djelatnu već i jalovu

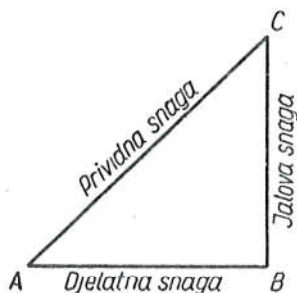
* Voltamper (kilovoltamper) i var (kilovar) u suštini su samo drugi nazivi za jedinicu vat (kilovat), a uvedeni su samo zato, da se i prema nazivu jedinica prividna odnosno jalova snaga razlikuju od djelatne snage. Postoji namjera, da se nazivi voltamper i var kao i njihove složenice izbace iz upotrebe te da se i jedinice prividne i jalove snage nazivaju vat (kilovat). Neki umjesto naziva var upotrebljavaju naziv voltamper reaktivni.

snagu. Samo djelatnu snagu uzimaju iz mreže ona trošila, koja iskorišćuju na bilo koji način toplinsko djelovanje struje (elektrotoplinske sprave, električne žarulje). Svi oni pak strojevi i aparati, kod kojih se iskorišćuje magnetsko polje struje, trebaju jalovu struju za stvaranje toga polja. Ovamo idu motori, transformatori, elektromagneti, svi mogući svici i t. d. Oni uzrokuju induktivno opterećenje električnih generatora, transformatora i ostalih dijelova postrojenja za opskrbu električnom energijom. Pa i vodovi koji služe za razdiobu električne energije, imaju neki induktivitet, pa i oni pridonose povećanju induktivnog opterećenja.

Umjesto naziva jalova struja, jalovi otpor, jalova snaga upotrebljavaju se i nazivi reaktivna struja, reaktivni otpor, reaktivna snaga. Reaktivni otpor naziva se još i reaktancija.

9.13. KOMPENZACIJA — POBOLJŠANJE FAKTORA SNAGE

Postrojenja za opskrbu električnom energijom redovito su induktivno opterećena. Električni generatori moraju zbog toga proizvoditi ne samo djelatnu već i jalovu snagu. No energija, koja odgovara toj jalovoj snazi, njiše



Sl. 152. Trokut snaga.

se, kako smo vidjeli, između generatora i trošila: ona ista energija, koju generator u nekom trenutku proizvede, vraća mu se u narednom trenutku natrag. Za proizvodnju jalove snage ne troši se dakle energija. Parna turbina, koja tjera generator, ne treba ništa više pare, za proizvodnju bilo kako velike jalove snage ne treba nikakav ugljen, nikakvo pogonsko sredstvo. Prema tome se čini, da jalova snaga, koja se »njiše« u vodovima, ako baš nije korisna, nije niti nimalo štetna. Pa ipak, tome nije tako. Jalova snaga, odnosno jalova struja nepoželjne su i neugodne usputne pojave stvaranja magnetskog polja, pojave, koje izazivaju i znatne troškove elektroprivrednim poduzećima, a i svima onima, koji imaju postrojenja, u kojima nastaju jalove struje. Zašto, odmah ćemo vidjeti.

Djelatna snaga i jalova snaga zajedno daju *prividnu snagu* upravo tako, kao što djelatni (omski) otpor i jalovi otpor zajedno daju prividni otpor. Ne doduše tako, da ih naprosto zbrojimo, ali pomoću jednostavne geometrijske konstrukcije prikazane na slici 152. Djelatnu snagu naneseemo kao vodoravnu dužinu AB, a u točki B naneseemo okomitu dužinu BC, koja predstavlja jalovu snagu. Dužina AC odgovara onda prividnoj snazi. Faktor snage dan je omjerom

$$\cos \varphi = \frac{\text{djelatna snaga}}{\text{prividna snaga}} = \frac{AB}{AC}.$$

I odnos između prividne, djelatne (vatne) i jalove snage može se prikazati Pitagorinim poučkom. Označimo s P djelatnu (vatnu) snagu, s P_z prividnu snagu, a s P_x jalovu snagu, pa prema slici 152. vrijedi odnos:

$$P_z^2 = P^2 + P_x^2.$$

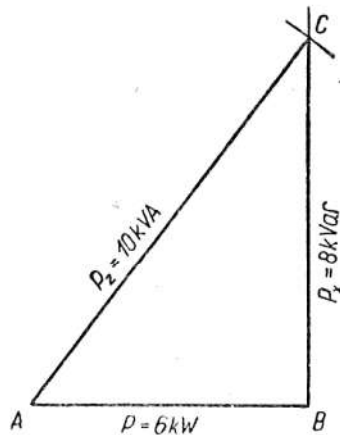
Najjasnije ćemo međutim pojedine odnose razabrati na konkretnim primjerima.

37. primjer. Na nekom transformatoru izvršena su ova mjerenja: napon $U = 200 \text{ V}$, struja $I = 50 \text{ A}$, snaga $P = 6 \text{ kW}$. Kolika je prividna snaga P_z , jalova snaga P_x , te $\cos \varphi$?

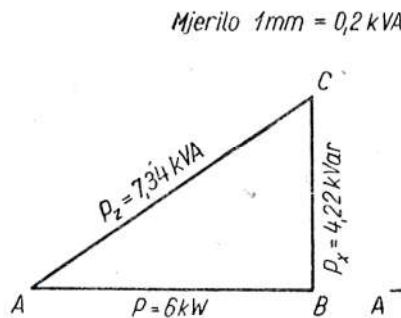
Rješenje. $P_z = UI = 200 \cdot 50 = 10\,000 \text{ VA} = 10 \text{ kVA}$,

$$\cos \varphi = \frac{P}{P_z} = \frac{6}{10} = 0,60.$$

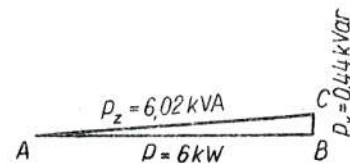
Da izračunamo jalovu snagu, poslužimo se geometrijskom konstrukcijom (slika 153.). Kao mjerilo za crtanje uzmimo $1 \text{ mm} = 0,2 \text{ kVA}$. Snagu $P = 6 \text{ kW} = 30 \text{ mm}$ nanesimo vodoravno kao dužinu $\overline{AB}$. U točki B povucimo prema gore okomiti pravac. Jalovu snagu ne znamo, pa prema tome ne možemo na taj pravac nanijeti pripadnu dužinu. Stoga uzmimo u šestar dužinu 50 mm , koja odgovara prividnoj snazi 10 kVA , pa tom dužinom povucimo iz točke A komadić kružnice, i to na mjestu, gdje ona siječe okomicu podignutu u točki B. Sjecište kružnice i ove okomice daje točku C, a dužina $BC = 40 \text{ mm}$ odgovara jalovoj snazi 8 kVar .



Sl. 153. Uz 37. primjer: Grafičko računanje jalove snage.



Sl. 154. Uz 38. primjer: Jalova se snaga smanjila zbog kompenzacije.



Sl. 155. Uz 39. primjer: Jalova je snaga još posve neznatna, kompenzacija je praktički potpuna.

Umjesto grafički, možemo jalovu snagu odrediti i računski pomoću Pitagorina poučka:

$$P_z^2 = P^2 + P_x^2; \quad \text{odavle} \quad P_x^2 = P_z^2 - P^2.$$

$$P_x = \sqrt{P_z^2 - P^2} = \sqrt{10^2 - 6^2} = \sqrt{64} = 8 \text{ kVar}.$$

38. primjer. Priključimo na transformator u 37. primjeru kondenzator od $C = 300 \mu\text{F}$ (slika 156.). Izračunajmo, kolika će sad biti jalova i prividna snaga, struja te $\cos \varphi$.

Rješenje. Jalova snaga kondenzatora:

$$P_{xc} = UI_c.$$

Struju izračunamo prema Ohmovu zakonu:

$$I_c = \frac{U}{X_c} = U \cdot 2\pi f C = 200 \cdot 314 \cdot \frac{300}{1\,000\,000} = 18,9 \text{ A.}$$

$$P_{xc} = 200 \cdot 18,9 = 3780 \text{ Var} = 3,78 \text{ kVar.}$$

Ovih 3,78 kVar je kapacitivna jalova snaga, pa je treba odbiti od induktivne jalove snage 8 kVar, koju uzimaju trošila, upravo tako, kao što smo prije činili s induktivnim i kapacitivnim otporom, kad smo računali ukupni jalovi otpor (usporedi sliku 151.):

$$P_x = 8 - 3,78 = 4,22 \text{ kVar.}$$

Na taj je način naš »trokut snaga« dobio oblik kao na slici 154. Sa smanjenjem jalove snage smanjila se i prividna snaga. Ona iznosi sada

$$P_z = 7,34 \text{ kVA.}$$

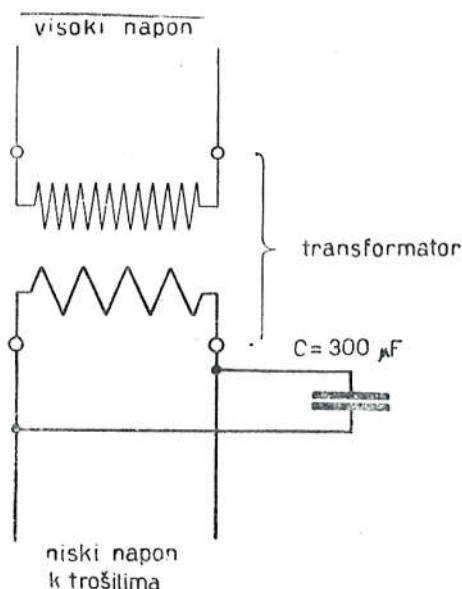
Struja se također smanjila:

$$I = \frac{P_z}{U} = \frac{7340}{200} = 36,7 \text{ A.}$$

Faktor snage se povećao (»poboljšao«):

$$\cos \varphi = \frac{P}{P_z} = \frac{6}{7,34} = 0,82.$$

39. primjer. Spojimo paralelno s kondenzatorom na slici 156. još jedan isto takav kondenzator, pa izračunajmo i sada jalovu i prividnu snagu, struju te $\cos \varphi$.



Sl. 156. Priključkom kondenzatora kompenziramo induktivnu jalovu snagu.

Rješenje. Sad imamo dva kondenzatora po 3,78 kVar. Ukupna jalova snaga bit će dakle

$$P_x = 8 - 2 \cdot 3,78 = 0,44 \text{ kVar.}$$

Prividnu snagu dobijemo iz slike 155. na jednaki način kao i prije.

$$P_z = 6,02 \text{ kVar}$$

$$I = \frac{P_z}{U} = \frac{6020}{200} = 30,1 \text{ A.}$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{P_z} = \frac{6}{6,02} = 0,998 \approx 1.$$

Kako se vidi iz gornjih primjera, priključkom kondenzatora smanjila se jalova snaga. Kapacitet kondenzatora poništio je djelomično utjecaj induktiviteta pojedinih trošila, motora i aparata, koji su priključeni na mrežu. Kažemo, da smo induktivitet mreže i trošila priključenih na nju kompenzirali priključkom kondenzatora. Kompenzacija je djelomična, ako smo samo smanjili jalovu snagu odnosno poboljšali $\cos \varphi$, a potpuna

ako je jalove snage potpuno nestalo, t. j. ako je $\cos \varphi$ poprimio vrijednost 1. Kompenzacija ne će gotovo nikada biti takva, da bi jalova snaga doista sasvim iščezla, ali, ako je preostala jalova snaga vrlo mala, već govorimo o praktički potpunoj kompenzaciji. Takva praktički potpuna kompenzacija je, na primjer, ona, koju imamo u 39. primjeru.

No još uvijek nismo spomenuli, čemu sve to, čemu kompenzacija, zašto se borimo protiv jalove snage, kad za njezinu proizvodnju ne trošimo nikakve energije.

Naši nam primjeri daju na to jasan odgovor, ako malo razmislimo o rezultatima, do kojih smo došli. U prvom redu treba još jedamput naglasiti, da je samo djelatna snaga ona, koja nam daje energiju: zbog koje svijetle sijalice, koja grije toplinske aparate, tjera motore i t. d. Jalova snaga je — jalova; ona je samo mjera za energiju, koja se »njiše«, koja »ide« amo — tamo. A djelatna snaga je u sva ta tri naša potonja primjera jednaka. Znači, transformator daje uvijek istu energiju. No u 37. primjeru, kod velike jalove snage, kroza nj je tekla struja 50 A, u 38. primjeru, kod djelomične kompenzacije, struja je iznosila samo 36,7 A, a u 39. primjeru kod praktički potpune kompenzacije, čak samo 30,1 A. Eto, ta veća struja, koja je uzrokovana jalovom snagom, razlog je, da je jalova snaga ne samo nepoželjna, nego da ona uzrokuje i znatne dodatne troškove. Iz Jouleova zakona znamo: jača struja — veće stvaranje topline; a veće stvaranje topline u transformatoru znači — veće gubitke. Čak, kako znamo, kod dvaput jače struje toplina je 4 puta veća, pa će gubici kod 50 A biti 2,76 puta tako veliki kao kod 30,1 A. A ti veći gubici ne nastaju samo u transformatoru, već i u vodovima visokog napona, na koje je transformator priključen, u svim daljnjim transformatorima, ako se električna energija više puta transformira, u generatorima — ukratko u svim dijelovima električnih postrojenja za proizvodnju i prijenos električne energije do mjesta, gdje je jalova snaga potrebna.

Povećani gubici — to je prvi izvor troškova, koje uzrokuje jalova snaga. Drugi, jednako važan, u tome je, što zbog veće struje treba transformatore, vodove, generatore i ostale dijelove električnih postrojenja znatno jače dimenzionirati.

Veličina transformatora, generatora, motora i ostalih električnih strojeva i aparata određena je njihovom prividnom snagom. Ustvari, ona je određena s jedne strane visinom napona, a s druge strane najvećom strujom opterećenja. Napon određuje jakost izolacije i veličinu magnetskog toka, a time i potrebne presjeke čelične jezgre transformatora i strojeva. Struja određuje potrebne presjeke njihovih vodiča. Umnožak struje i napona, a to je baš prividna snaga, mjera je dakle za njihovu veličinu.

U 37. primjeru, kod velike jalove snage, prividna snaga iznosi 10 kVA, a u 39. primjeru samo 6 kVA. Kako je djelatna snaga u jednom i u drugom slučaju 6 kW, potreban bi bio kod neinduktivnog opterećenja transformator od samo 6 kVA a kod induktivnog kao u 37. primjeru znatno veći, pa prema tome i skuplji transformator od 10 kVA. I svi drugi dijelovi postrojenja moraju kod induktivnog opterećenja biti znatno jače dimenzionirani, a to, daka-ko, iziskuje dodatne troškove.

Zadatak 167. Generator izmjenične struje daje djelatnu snagu 65 (18; 33) kW i jalovu snagu 60 (18; 37) kVar. Kolika je prividna snaga? Koliki je $\cos \varphi$? Kolika je struja, ako napon iznosi 440 (220; 440) V?

Kod kućnih instalacija, gdje su trošila samo žarulje i toplinske sprave, opterećenje je praktički posve neinduktivno, pa je $\cos \varphi \approx 1$. Kod takvih kućnih instalacija izračunava se prema tome gubitak napona posve jednako kao kod istosmjernje struje, t. j. prema formuli $u = IR$.

Kako se gubitak napona računa kod induktivnog opterećenja, najbolje ćemo razabrati na primjerima.

40. primjer: Jednofazni motor od 1,5 kW, 220 V, $\eta = 0,75$ i $\cos \varphi = 0,77$ treba da bude priključen izoliranim vodom položenim u cijevi, dugačkim 50 m. Koliko treba da iznosi presjek voda, ako je osiguranje provedeno pomoću tromih rastalnih osigurača, a gubitak napona ne smije iznositi više od 3%?

Rješenje: Motor uzima iz mreže snagu:

$$P = \frac{1,5}{0,75} = 2 \text{ kW.}$$

Struju možemo izračunati iz formule:

$$P = UI \cos \varphi,$$

odakle je

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi} = \frac{2000}{220 \cdot 0,77} = 11,8 \text{ A.}$$

Prema tablici na strani 38. treba uzeti osigurače za 15 A, a tome odgovaraju bakreni vodiči od 2,5 mm². Njihov otpor iznosi:

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,018 \cdot 2 \cdot 50}{2,5} = 0,72 \Omega.$$

Gubitak napona iznosi dakle

$$u = IR \cos \varphi = 11,8 \cdot 0,72 \cdot 0,77 = 6,54 \text{ V}$$

ili u postocima

$$u \% = \frac{u}{U} \cdot 100 = \frac{6,54}{220} \cdot 100 = 3,0 \%$$

Presjek odabran s obzirom na ugrijavanje odgovara dakle i s obzirom na gubitak napona.

Induktivni otpor nadzemnih vodova ne može se zanemariti, jer je razmak između vodiča već i kod vodova niskog napona toliki, da induktivni otpor utječe na gubitak napona. Račun je kod takvih vodova nešto kompliciraniji, ali se zato možemo poslužiti pomoćnom tablicom. Uz upotrebu ove tablice računamo upravo tako, kao da nema induktivnog otpora, a dobiveni gubitak napona treba samo pomnožiti s odnosnim brojem u tablici.

Tablica za proračun gubitka napona u nadzemnim vodovima niskog napona

Tablica uzima u obzir induktivni otpor voda, a izračunata je za srednji razmak vodiča 50 cm, ali vrijedi vrlo približno i za razmak vodiča 40—60 cm.

Presjek vodiča mm ²	cos φ = 0,9		cos φ = 0,8		cos φ = 0,7		cos φ = 0,6	
	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al	Cu	Al
6	1,06	—	1,10	—	1,13	—	1,17	—
10	1,10	—	1,15	—	1,21	—	1,27	—
16	1,15	1,09	1,23	1,14	1,31	1,20	1,41	1,26
25	1,22	1,14	1,34	1,21	1,46	1,29	1,60	1,37
35	1,30	1,18	1,46	1,29	1,63	1,39	1,82	1,51
50	1,41	1,26	1,64	1,40	1,87	1,54	2,14	1,71
70	1,54	1,34	1,84	1,52	2,14	1,71	2,49	1,92
95	1,73	1,45	2,13	1,70	2,53	1,96	3,00	2,25

41. primjer. Jednofazni motor iz 40. primjera treba da bude priključen nadzemnim vodom dugačkim 1 km. Koliki treba da bude presjek vodiča, ako je dozvoljeni gubitak napona 6%? Vodiči neka su od bakra.

Rješenje: Struja, kako smo izračunali već u 41. primjeru, iznosi $I = 11,8$ A. Presjek moramo za prvi račun uzeti po osjećanju. Uzmimo najmanji dozvoljeni presjek za nadzemni vod $S = 6$ mm². Otpor iznosi

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,018 \cdot 2 \cdot 1000}{6} = 6,0 \Omega.$$

Gubitak napona bez obzira na induktivitet voda iznosi

$$u' = IR \cos \varphi = 11,8 \cdot 6,0 \cdot 0,77 = 54,5 \text{ V.}$$

Iz tablice dobijemo za presjek 6 mm² i cos φ = 0,8 broj 1,10, a za cos φ = 0,7 broj 1,13. Kod cos φ = 0,77 bit će dakle približno 1,11. Tim brojem moramo pomnožiti izračunati gubitak napona, da uzmemo u obzir induktivni otpor voda:

$$u = 54,5 \cdot 1,11 = 60,5 \text{ V.}$$

To u postocima iznosi:

$$u \% = \frac{u}{U} \cdot 100 = \frac{60,5}{220} \cdot 100 = 27,5 \%.$$

Vodiči bi dakle bili suviše tanki, jer bi gubitak napona bio $27,5 : 6 = 4,6$ puta veći od dozvoljenog 4,6 puta veći presjek iznosio bi $4,6 \cdot 6 = 27,0$ mm². No ne smijemo uzeti najbliži presjek 25 mm², jer je kod njega, kako se vidi iz tablice, utjecaj induktivnog otpora veći nego kod 6 mm². Treba dakle uzeti presjek 35 mm², što daje:

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,018 \cdot 2 \cdot 1000}{35} = 1,03 \Omega.$$

$$u' = IR \cos \varphi = 11,8 \cdot 1,03 \cdot 0,77 = 9,3 \text{ V.}$$

Ako bismo uz napon 10 V na primarnom svitku htjeli dobiti na sekundarnom svitku napon 1000 V, morao bi sekundarni svitak imati 100 puta više zavoja nego primarni, jer to traži omjer $1000 : 10 = 100$.

Dok je na sekundarni svitak priključen samo voltmetar, primarnim će svitkom teći vrlo slaba struja, što možemo provjeriti ampermetrom.

Priključimo li na sekundarni svitak kod transformatora prema slici 157. žarulju za 100 V, ona će svijetliti. Ako kod 100 V uzima 100 W, izmjerit ćemo u sekundarnom svitku struju 1 A. No u strujnom krugu primarnoga svitka, gdje je napon 10 puta manji, izmjerit ćemo približno 10 puta jaču struju, t. j. približno 10 A. Snaga je u strujnom krugu sekundarnoga svitka $100 \text{ V} \times 1 \text{ A} = 100 \text{ W}$, a u strujnom krugu primarnoga svitka približno $10 \text{ V} \times 10 \text{ A} = 100 \text{ W}$.

Općenito, približno vrijedi:

$$I_1 : I_2 \approx U_2 : U_1,$$

$$P_1 \approx P_2.$$

Primarna snaga, t. j. snaga, koju transformator uzima iz mreže, ne može biti posve točno jednaka sekundarnoj snazi, t. j. snazi, koju transformator daje. U transformatoru se naime jedan dio privedene električne energije pretvara u toplinu, pa primarna snaga mora uvijek biti nešto veća od sekundarne. Ti gubici u transformatoru nisu veliki; oni iznose svega 1 do 5%: 1% kod vrlo velikih, 5% kod malih transformatora.

Još nešto možemo ustanoviti pokusom. Ako transformator jače opterećimo, t. j. ako na njegov sekundarni svitak priključimo jača trošila, smanji se napon na priključnicama sekundarnoga svitka. To smanjenje napona ne iznosi doduše mnogo, svega nekoliko postotaka. Ono je to veće, što je opterećenje veće. Transformator se dakle vlada kao i drugi izvori struje, kod kojih se kod opterećenja smanjuje napon na stezaljkama.

Omjer primarnog i sekundarnog napona neopterećenog transformatora naziva se prijenosni omjer.

Kako da objasnimo vladanje i rad transformatora, kako smo ih ustanovili pokusom? Sjetimo se prije svega onoga, što smo naučili u poglavlju 9.7. Ako svitak sa čelikom, koji ima mali omski otpor, priključimo na izmjenični napon, inducira se u njemu elektromotorna sila samoindukcije, koja je približno jednaka narinutom naponu. Ona je od narinutog napona manja samo za onaj mali gubitak napona što ga slaba struja, koju takav svitak uzima, stvara u otporu primarnoga svitka. Kolika je ta struja? Ona je upravo tolika, da može u čeliku proizvesti onaj magnetski tok, koji je potreban za induciranje one elektromotorne sile samoindukcije, koja drži ravnotežu narinutom naponu mreže. Ako, kao kod transformatora na slici 157., narinuti izmjenični napon iznosi 10 V, onda se u zavojima primarnoga svitka mora inducirati elektromotorna sila samoindukcije 10 V. Ova elektromotorna sila samoindukcije inducirać će se zbog magnetskog toka, koji prolazi kroz te zavojice. Budući da taj tok prolazi jednako kroz sve zavojice, inducirać će se u svakom zavoju jednaka elektromotorna sila. Kod 10 zavoja inducirać će se u svakom zavoju 1 V.

No isti magnetski tok, koji prolazi kroz primarni svitak transformatora, prolazi i kroz sekundarni svitak. U svakom zavoju sekundarnoga svitka proizvodi taj magnetski tok onu istu elektromotornu silu, koju proizvodi u svakom zavoju primarnoga svitka, dakle u našem primjeru 1 V. Kako sekundarni svitak ima 100 zavoja, bit će ukupna elektromotorna sila, koja se u njemu inducira, 100 V. Sad je jasno, zašto se naponi primarnoga i sekundarnoga svitka transformatora odnose kao brojevi njihovih zavoja.

Do istog rezultata možemo doći i pomoću matematike. Prema formuli na strani 135. iznosi elektromotorna sila, koju tok Φ frekvencije f inducira u N_1 zavoja primarnoga svitka:

$$E_1 = 4,44 \Phi_{\max} f N_1 \text{ volta.}$$

No taj isti magnetski tok Φ prolazi i kroz sekundarni svitak, pa i u njemu inducira elektromotornu silu:

$$E_2 = 4,44 \Phi_{\max} f N_2 \text{ volta.}$$

Podijelimo ove dvije jednačbe:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{4,44 \Phi_{\max} f N_1}{4,44 \Phi_{\max} f N_2},$$

pa dobijemo

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2},$$

jer se sve drugo u brojniku i nazivniku krati. U neopterećenom stanju (»praznom hodu«*) vrijedi vrlo približno $U_1 \approx E_1$, a budući da je sekundarna strana otvorena, točno je $U_2 = E_2$. Prema tome za prijenosni omjer dobijemo $U_1 : U_2 \approx N_1 : N_2$, t. j. ono, što smo ustanovili pokusom.

Kod opterećenja teče kroz transformator razmjerno jaka struja. Elektromotorna sila samoindukcije mora se kod opterećenja nešto smanjiti, da može poteći ova jača struja. Zajedno s elektromotornom silom u primarnom svitku umanjuje se i elektromotorna sila u sekundarnom svitku, jer ih proizvodi isti magnetski tok. Ali i u sekundarnom svitku nastaje gubitak napona, koji uzrokuje struja opterećenja. Napon na stezaljkama bit će dakle jednak elektromotornoj sili, induciranoj u tom sekundarnom svitku, umanjenoj za gubitak napona u tom svitku. Kod opterećenja ne bi dakle napon na stezaljkama sekundarnog svitka na slici 157. iznosio 100 V kao u neopterećenom stanju (praznom hodu), već samo oko 95 V.

Zadatak 178. Neki transformator ima primarno 10 000 (3000; 2500) zavoja, a sekundarno 110 (50; 55) zavoja. Koliki je sekundarni napon, ako je transformator priključen primarno na 20 (6; 5) kV?

Zadatak 179. Neki transformator mora transformirati od primarno 220 (100; 500) V na sekundarno 3000 (500; 1500) V. Koliko zavoja mora imati taj transformator sekundarno, ako primarno ima 100 (48; 235) zavoja?

Zadatak 180. Kolike su primarna i sekundarna struja transformatora od 10 (5; 20) kVA s prijenosnim omjerom 6000/230 (3000/115; 10000/220) V?

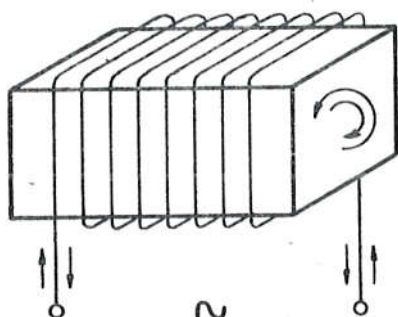
9.18. VRTLOŽNE STRUJE

Promjenljivi magnetski tok, koji prolazi kroz čelični okvir na slici 157., ne će inducirati elektromotorne sile samo u primarnom i sekundarnom namotu transformatora. Elektromotorne sile bit će isto tako inducirane i u samom čeličnom okviru, a kako je čelik, kao i svi metali, uglavnom dobar vodič elektrike, izazivaju te elektromotorne sile i vrlo jake struje. Ove se struje zatvaraju same u sebe, pa su donekle slične vrtlozima. Stoga se nazivaju vrtložne struje.

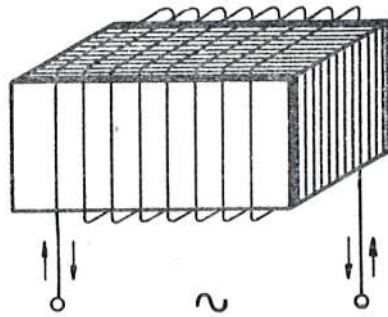
Kad bi čelični okvir, na koji se motaju namoti normalnih transformatora, bio od punog čelika (slika 158.), te bi struje bile tako jake, da bi potpuno usijale taj čelik i uništile namote. Stoga se nigdje, gdje nastaje promjenljivi magnetski tok (a to je ne samo kod svih transformatora, nego i kod svih električnih strojeva), ne upotrebljava puna čelična jezgra, već se ta jezgra sastoji od paketa tankih limova 0,3 do 1 mm debljine (slika 159.), koji su

* Neopterećeni rad strojeva, transformatora, usmjerivača, vodova i nekih drugih naprava nazivamo prazni hod.

međusobno izolirani tankim slojem papira ili nekim premazom. Osim toga im je otpor povećan na taj način, što to nisu obični čelični limovi, već im je dodan mali postotak silicija. Ovi su limovi naslagani tako, da je smjer struje, inducirane zbog promjenljivog magnetskog toka, okomit na površinu lima. Na taj način mogu nastati samo slabe struje, jer je otpor njihovog strujnog kruga sada vrlo velik. I te preostale vrtložne struje ipak dosta znatno griju



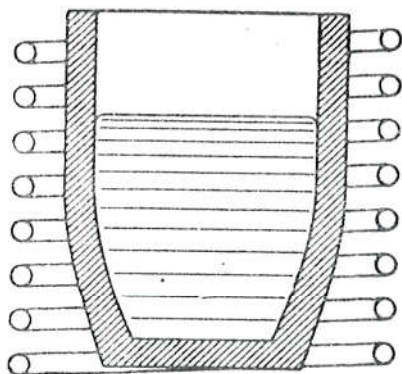
Sl. 158. Vrtložne struje: Kad bi jezgra transformatora bila od punog čelika, vrtložne bi struje bile tako jake, da bi se čelik usijao i rastalio.



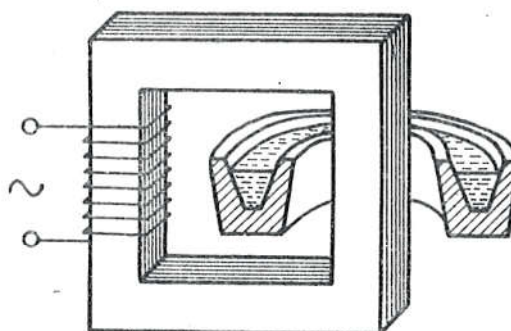
Sl. 159. Vrtložne struje: Jezgra transformatora izvodi se od tankih, međusobno izoliranih limova velikog specifičnog otpora, da bi vrtložne struje bile što manje.

čelične jezgre strojeva i transformatora, pa pri njihovom konstruiranju treba dobro paziti na odvod topline. Kako se za stvaranje te topline troši jedan dio električne energije, nastaju zbog vrtložnih struja izvjesni gubici, koji umanjuju korisnost (stupanj djelovanja) strojeva i transformatora.

Međutim, kakogod su vrtložne struje kod svih električnih strojeva i transformatora vrlo neugodne, ima primjena, kod kojih se njima služimo. Jedno takvo područje primjene jesu *visokofrekventne indukcione peći*, kod



Sl. 160. Visokofrekventna indukcionalna peć: Metal u peći se tali zbog vrtložnih struja, koje se u njemu induciraju.



Sl. 161. Niskofrekventna indukcionalna peć ili peć sa čeličnom jezgrom: Metal u peći nije drugo već kratko spojeni sekundarni zavoj transformatora.

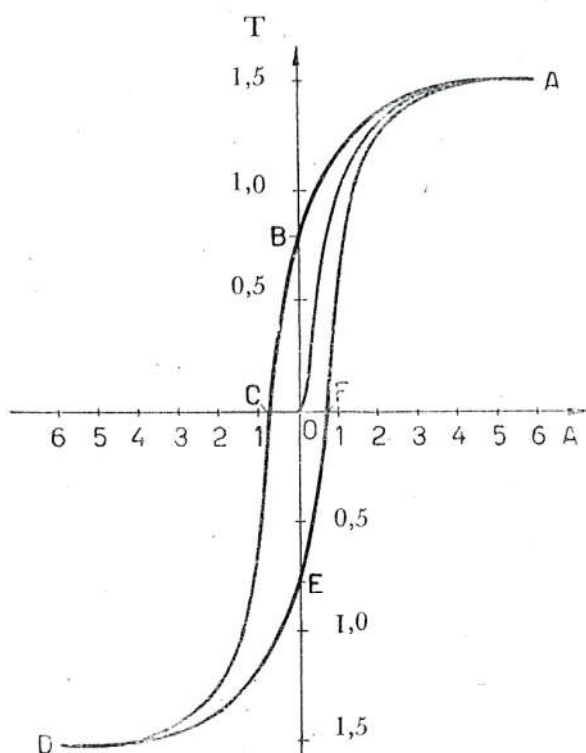
kojih pomoću tih struja talimo metale. Kod takvih je peći (slika 160.) oko tignja, koji mora biti dobro toplinski izoliran, namotan svitak, kroz koji prolazi struja razmjerno visoke frekvencije, obično oko 1000 Hz. Ova struja stvara kroz tiganj brzo promjenljivi magnetski tok, uslijed kojega nastaju u metalu u tignju tako jake vrtložne struje, da se metal rastali. Ima i takvih (uglavnom manjih) visokofrekventnih peći, koje rade s frekvencijom od nekoliko desetaka hiljada Hz.

No potpunosti radi treba spomenuti, da ima i takvih indukcionih peći, koje rade vrlo slično običnom transformatoru. To su *niskofrekventne indukcione peći ili peći sa čeličnom jezgrom*. Njihov je princip pokazan na slici 161. Takve peći rade s običnom frekvencijom 50 Hz, a metal u peći nije drugo nego sekundarni namot transformatora, koji je kratko spojen. Zbog toga nastaju kroz peć vrlo jake struje, koje metal u peći rastale.

Vrtložne struje sve se više upotrebljavaju u industriji za visokofrekventno ugrijavanje metala. Za to se upotrebljavaju struje od nekoliko hiljada do nekoliko milijuna Hz. Komad metala, koji želimo toplinski obraditi, stavimo unutar svitka, kojim teče visokofrekventna struja tako, da kroz taj komad metala prolazi visokofrekventno magnetsko polje. Na taj način može se unutar najkraćeg vremena (nekoliko desetinka sekunde do nekoliko sekunda) metal termički obraditi. Tako se mogu na pr. čelični dijelovi samo površinski ili samo mjestimično zakaliti, može se tvrdo i meko lemiti, i dr.

9.19. HISTEREZA, GUBICI ZBOG PREMAGNETIZIRANJA, GUBICI U ŽELJEZU

Namotajmo oko prstena od željeza, na pr. mekog čelika, nekoliko zavoja žice, pa magnetizirajmo taj čelik sve jačom i jačom istosmjernom strujom. Za pojedine jakosti struje izmjerimo magnetsku indukciju (a ima načina, pomoću kojih se ona daje jednostavno mjeriti). Ako izmjerene vrijednosti za struju



Sl. 162. Petlja histereze.

(na pr. od 1 do 6 A) i izmjerene pripadne vrijednosti za magnetsku indukciju nanesimo u dijagram kao na slici 162., dobijemo krivulju OA, koja nije ništa drugo, nego poznata nam već krivulja magnetiziranja. No ako sad pomalo smanjujemo struju od 6 A do nule, pa izmjerene vrijednosti za magnetsku indukciju opet unosimo u dijagram, dobijemo krivulju AB. Iz te krivulje vidimo, da je i onda, kad je struja jednaka nuli, čelik još uvijek zadržao neki magnetizam, koji odgovara dužini OB. Ako hoćemo potpuno poništiti taj magnetizam, moramo obrnuti smjer struje i pustiti kroz zavoje oko čelika struju izvjesne jakosti u tom obrnutom smjeru. Ako i dalje pojačavamo struju u tom obrnutom smjeru, dobit ćemo u dijagramu krivulju CD, a ako smanjujemo njezinu jakost natrag do nule, dobit ćemo krivulju DE. Vidimo, da je čelik

opet ostao magnetičan, samo u obratnom smjeru. Kad opet obrnemo smjer struje na prvotni smjer i struju pojačavamo opet od 0 do 6 A, najprije ćemo poništiti preostali magnetizam (krivulja EF), a nakon toga se čelik opet magnetizira prema krivulji FA. Kolikogod puta bismo ponovili isti pokus, uvijek bismo opet dobili krivulju ABCDEFA. Ova se krivulja naziva *petlja histereze*. Krivulju OA dobili smo samo kod prvog magnetiziranja.

Kako se vidi, uvijek je potrebna neka struja u protivnom smjeru, da se čelik razmagnetizira. Čelik kao da se opire premagnetiziranju. Kao što smo vidjeli na strani 123., magnetizam se tumači elementarnim magnetičima, koji se poredaju na neki način, kako je slikovito prikazano na slici 129. Kod premagnetiziranja treba te magnetiće okrenuti, a oni za to zaokretanje pokazuju neku tromost.

Ako naš svitak namotan na čelični prsten priključimo na izmjeničnu struju od 50 Hz, onda se to premagnetiziranje zbiva 50 puta u sekundi u jednom i 50 puta u sekundi u drugom smjeru. Elementarni se magnetiće moraju dakle 100 puta u sekundi zaokrenuti. Oni i prema takvom zaokretanju pokazuju sličan otpor kao i kod pokusa s istosmjernom strujom. Općenito, njihov se otpor prema premagnetiziranju naziva *histereza*. Histereza se može slikovito objasniti trenjem između pojedinih elementarnih magnetiće pri njihovom neprestanom zaokretanju. Pa kao što se kod svakog trenja razvija toplina, tako se ona razvija i kod ovakvog premagnetiziranja. A kao što i ona toplina, koja se razvija zbog vrtložnih struja, predstavlja gubitke električne energije, tako ni ova toplina, koja nastaje zbog premagnetiziranja, ne može (po zakonu o održanju energije) da se stvara sama od sebe. Kako premagnetiziranje nastaje uslijed električne struje, i ova se toplina razvija na račun gubitka električne energije. To su *gubici zbog premagnetiziranja*.

Ti gubici zbog premagnetiziranja jesu to veći, što je magnetska indukcija veća, što je frekvencija viša, te što se čelik daje teže premagnetizirati. Oni su vrlo veliki kod tvrdog čelika, a razmjerno mali kod mekog dinamo-čelika.

Kako i gubici zbog vrtložnih struja i gubici zbog premagnetiziranja nastaju u čeliku odnosno, općenitije, u željezu, nazivaju se obje ove vrste gubitaka jednim imenom *gubici u željezu*. Ovi su gubici vrlo važni kod svih električnih strojeva i transformatora, jer kod svih njih imamo naizmjenično magnetiziranje čelika.

9.20. ISTISKIVANJE STRUJE (SKIN-EFEKT)

Omski je otpor za izmjeničnu struju veći nego za istosmjernu. Ovo povećanje otpora nastaje zbog toga, što gustoća izmjenične struje nije jednaka po cijelom presjeku vodiča. Zbog magnetskog polja u vodiču, koje nastaje od vlastite struje, nastaje istiskivanje struje prema površini vodiča tako, da je gustoća struje najmanja u sredini vodiča, a najveća u njegovom površinskom sloju. Ova se pojava naziva *istiskivanje struje ili skin-efekt**

Zbog toga istiskivanja struje prema površini vodiča prividno se smanjuje presjek vodiča, kroz koji teče struja, pa se omski otpor tog vodiča prividno povećava.

Istiskivanje struje (a time i povećanje otpora prema otporu kod istosmjerne struje) to je veće, što je vodič deblji i što je frekvencija struje viša. Kod bakrenih i aluminijskih vodiča obične debljine i kod normalne frekvencije 50 Hz povećanje otpora je tako neznatno, da ga uopće ne zamjećujemo. Kod debele bakrene žice od 185 mm² i kod 50 Hz povećanje otpora prema istosmjernoj struji ne doseže ni 1%. Kod manjih presjeka to povećanje otpora je daleko manje. No kod presjeka od 185 mm², ali 1000 Hz otpor se već više nego udvostručuje. Kod frekvencije od nekoliko stotina hi-

* Skin je engleska riječ, a znači: koža, površinski sloj.

ljada Hz, koje se upotrebljavaju u visokofrekventnoj tehnici, istiskivanje struje je tako veliko, da struja teče praktički samo površinskim slojem vodiča. Kod tako visokih frekvencija povećanje otpora primjećuje se već i kod tankih žica, a kod debljih žica ono je vrlo veliko.

Kod čeličnih je vodiča istiskivanje struje daleko veće nego kod bakrenih i aluminijskih. Magnetska propustljivost željeza i čelika je nekoliko stotina do nekoliko hiljada puta veća nego kod bakra i aluminijskih. Zbog toga je i magnetsko polje u čeličnom vodiču (kao posljedica struje kroz vodič) znatno jače nego kod vodiča od bakra i aluminijskih. Na pr., već kod presjeka 25 mm^2 i frekvencije 50 Hz otpor je dvostruko do trostruko tako velik kao kod istosmjerne struje. Prema tome gubitak napona ili gubitak snage kod vodova sa čeličnim vodičima ne smijemo računati na temelju podataka o otporu tih vodiča za istosmjernu struju, jer bismo došli do posve krivih rezultata.

9.21. DIELEKTRIČKI GUBICI

Izolator u električnom polju nalazi se u izvjesnom napetom stanju, koje ovisi o veličini i smjeru tog polja. Ako je to polje izmjenično, to se napeto stanje ne prestano mijenja. Iskustvo i pokusi pokazuju, da izolatori prema tom izmjeničnom elektriziranju pokazuju izvjesnu tromost, formalno slično kao što željezo pokazuje tromost (histerezu) prema izmjeničnom magnetiziranju. Ta se tromost izolatora za izmjenično elektriziranje naziva *dielektrična histereza*, a gubici energije, koji pritom nastaju, *dielektrički gubici*.

Dielektrički gubici su osobito važni u kondenzatorima i kabelima, gdje se nastoji, da budu što manji. Naročito su nezgodni u visokofrekventnoj tehnici. U novije vrijeme, međutim, oni se u industriji i iskorištavaju, i to za *visokofrekventno zagrijavanje i sušenje*.

10. TROFAZNI SISTEM

10.1. POSTANAK TROFAZNOG SISTEMA

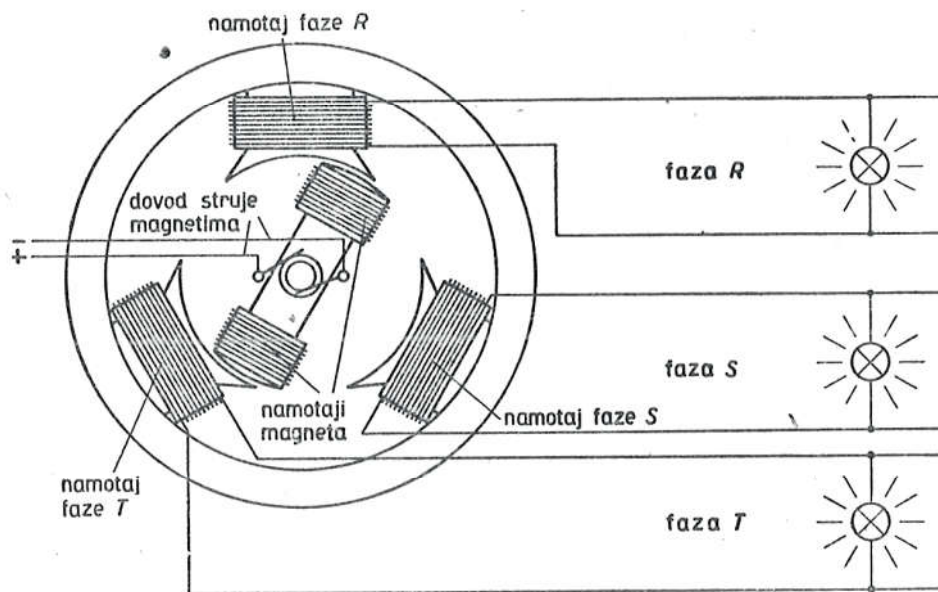
Rotor generatora prikazanog na slici 163. posve je jednak onome na slici 134. To je elektromagnet, tjeran od nekog zagonskog stroja. No na statoru su smještene tri posve nezavisna namota. Svaki od ovih namota ima svoj strujni krug, u koji mogu biti priključena pojedina trošila. Pri okretanju magnetu inducirat će se u svakom namotu izmjenična elektromotorna sila, pa će kroz trošila teći izmjenična struja.

Svaki od ova 3 namota zajedno s pripadnim strujnim krugom naziva se jedna faza. Generator prema slici 163. je generator s tri faze ili, kako se obično naziva, *trofazni generator*.

Ako je generator *simetrično* građen, t. j. ako svaka faza ima jednaki broj zavoja, i ti su zavoji na jednaki način namotani, inducirat će se u svakoj fazi jednake elektromotorne sile. A ako su na svaku fazu priključena posve jednaka trošila, teći će u svakoj fazi posve jednaka struja. Frekvencija struje ovisi o brzini vrtnje, t. j. o broju okretaja u sekundi. Jedna perioda odgovara jednom okretaju. Broj perioda u sekundi jednak je dakle broju okretaja u sekundi.

Izmjenična se struja predložuje grafički prema slikama 131., 132., 138. i 139. krivuljom, koja se naziva sinusoida. Budući da su struje u sve tri faze jednake i po veličini i po frekvenciji, bit će one predložene jednakim sinusoidama. No ipak se struje u te tri faze u nečem međusobno razlikuju. Ta je-

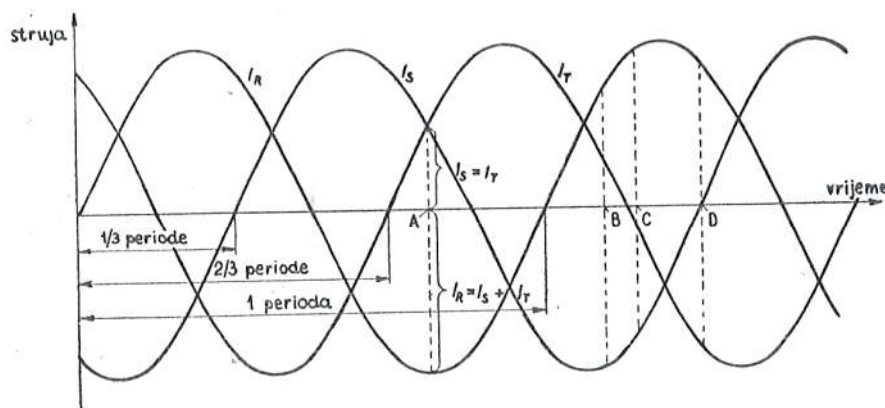
dina razlika između njih je u tome, što one nisu istovremene. Struja nije u sve tri faze u istom trenutku jednaka. U trenutku, kad je na pr. struja



Sl. 163. Trofazni generator s tri međusobno nezavisna namota. Svaki namot proizvodi izmjeničnu struju.

u fazi R maksimalna, ona to nije ni u fazi S, ni u fazi T. A kad je ona u fazi R jednaka nuli, ona to i opet nije ni u fazi S, ni u fazi T.

Da na pr. pol N magneta, koji se okreće, dođe od faze R do faze S, potrebna je $\frac{1}{3}$ okretaja, da dođe do faze T, potrebno je $\frac{2}{3}$ okretaja. Pol N magneta dolazi do faze S tek $\frac{1}{3}$ periode, a do faze T tek $\frac{2}{3}$ periode nakon faze R. Krivulja struje za fazu S mora dakle zaostajati za $\frac{1}{3}$ periode, a ona za fazu T za $\frac{2}{3}$ periode iza krivulje struje za fazu R. Te su krivulje struje za sve tri faze nacrtane na slici 164.

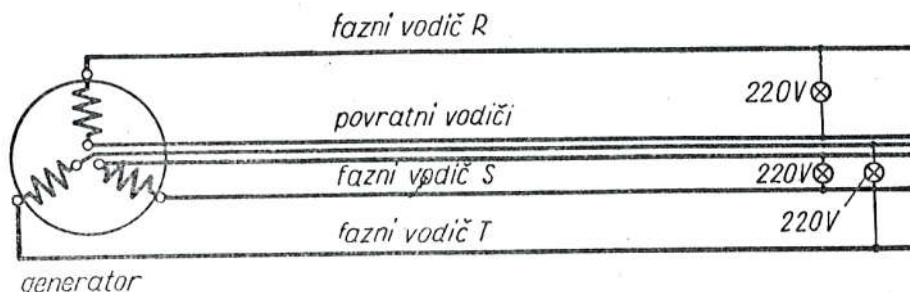


Sl. 164. Struje u 3 faze trofaznog sistema međusobno su pomaknute u fazi za $\frac{1}{3}$ periode. Kod simetričnog opterećenja njihov je zbroj jednak nuli.

Shematski se može spoj generatora na slici 163. prikazati tako, kako je to učinjeno na slici 165. Na toj slici prikazan je samo spoj statora (nepomičnog dijela generatora), dok spoj rotora (pomičnog dijela generatora) nije prikazan

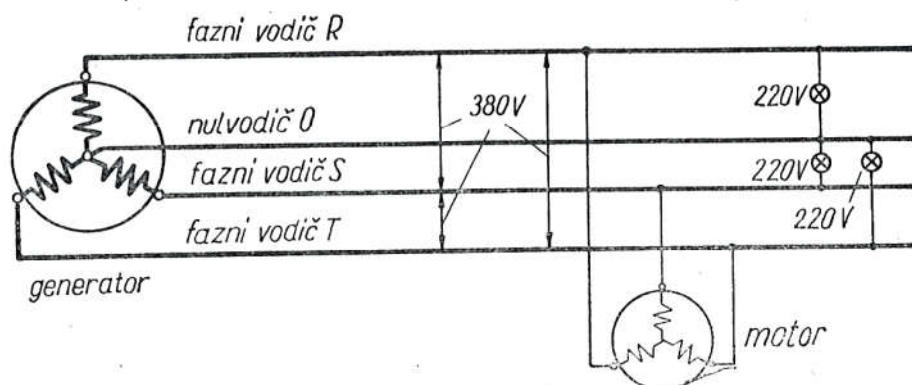
No što bi se dogodilo, ako bismo tri vodiča, koji su na slici 165. nacrtani zajedno, stopili zajedno, t. j. ako bismo ih zamijenili jednim vodičem, kako je to prikazano na slici 166? Na našem generatoru ne bismo opazili baš nikakve promjene, a isto tako ni na trošilima! Ako su ta trošila sija-

lice, one bi svijetlile isto tako dobro kao dotada. No najviše bismo se iznenadili, ako bismo u tom zajedničkom vodiču izmjerili struju. Ustanovili bismo naime, da u njemu ne teče uopće nikakva struja, iako sijalice svijetle i makar teče struja u vodičima R , S i T . Pita se, kako je to moguće? Kako dolazi do toga, da struja, koja iz vodiča R , S i T teče u zajednički vodič 0 , odjedamput nestane?



Sl. 165. Shema spoja statora trofaznog generatora prema slici 163. (Rotor nije nacrtan.)

Objašnjenje će nam dati slika 164., ako je dobro razmotrimo. Zajednički vodič 0 na slici 166. naziva se nulvodič ili neutralni vodič, a vodiči R , S i T nazivaju se fazni vodiči. Prema svemu, što dosada znamo, trebala bi struja u nulvodiču biti u svakom trenutku jednaka zbroju struja u faznim vodičima. Na slici 164. predočuju nam tri krivulje trenutne vrijednosti struje u fa-



Sl. 166. Trofazni sistem s nulvodičem: Tri vodiča na slici 165. stopljena su u jedan zajednički vodič, nulvodič.

znim vodičima. Za svaki pojedini trenutak možemo vrlo lako izračunati zbroj tih pojedinih trenutnih vrijednosti. Učinimo to na pr. za trenutke A, B, C i D na slici 164., uzimajući pritom u obzir i smjer struje, koji je označen time, da li je dotična krivulja za taj trenutak iznad ili ispod vodoravne osi. Rezultat, koji dobijemo za sva ova 4 trenutka, a i za bilo koji drugi trenutak, glasi: *Zbroj struja u faznim vodičima je kod simetričnog opterećenja* u svakom trenutku jednak nuli.* Sada je jasno, kako to, da kod simetričnog opterećenja u nulvodiču ne teče nikakva struja.

No ako u nulvodiču ne teče nikakva struja, onda ga možemo napraviti bilo kako tankim, a možemo ga napokon i posve ispustiti. I doista, *kod posve simetričnog opterećenja nulvodič nije potreban.*

* Simetrično opterećenje = opterećenje u sve tri faze jednako.

Spoj prema slici 166. naziva se *trofazni sistem*, a struja, koja u njemu teče, *trofazna struja*. Kako se vidi, trofazna struja nije nikakva posebna, nova vrst struje. To je sasvim obična izmjenična struja, kod koje je spoj načinjen na naročiti način.

Trofazni generatori se danas ne izrađuju nikada s tri nezavisna namota kao na slikama 163. i 165., već uvijek u spoju prema slici 166. I kod trofazne struje upotrebljava se danas općenito frekvencija 50 Hz, pa se trofazni generatori moraju okretati brzinom od 50 okretaja u sekundi, odnosno 3000 u minuti, ili moraju imati veći broj polova.

10.2. ROTACIONO POLJE, TROFAZNI ELEKTROMOTORI

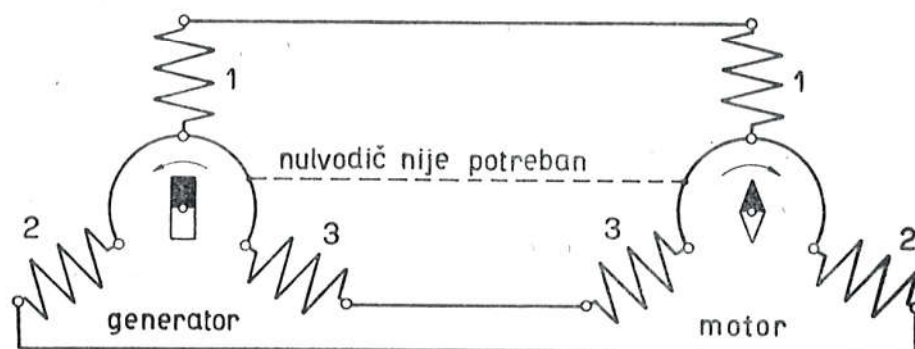


Sl. 167. Magnetsko polje rotira zajedno s magnetom. Takvo se polje, koje rotira, zove rotaciono polje.

Uzmimo prema slici 167. potkovičasti magnet obješen o komad konopca, pa ga okrećimo iznad magnetske igle. Magnetska će se igla okretati istom brzinom zajedno s magnetom.

Napravimo sad drugi pokus. Uzmimo dvaput po tri svitka, namotana radi pojačanja magnetskog toka na čelične jezgre, te ih smjestimo i spojimo, kako je to shematski prikazano na slici 168. Između desna tri svitka smjestimo onu istu magnetsku iglu sa slike 167., a između lijeva tri okrećimo ravni, jaki permanentni magnet. Okretanjem magnetu inducirat će se u lijevim svicima izmjenične elektromotorne sile, kao i kod uređaja na slici 163. A kako su strujni krugovi preko desnih svitaka zatvoreni, teći će kroz njih izmjenična struja, koja će proizvesti izmjenična magnetska polja. A magnetska će se igla pod utjecajem tih polja okretati upravo tako, kao na slici 167.! Istom brzinom kao i magnet i obilazeći istim redom

pojedine svitke 1—2—3. Pri rotiranju magnetu na slici 167. rotira i njegovo magnetsko polje. To se polje može prema tome nazvati rotacionim poljem.



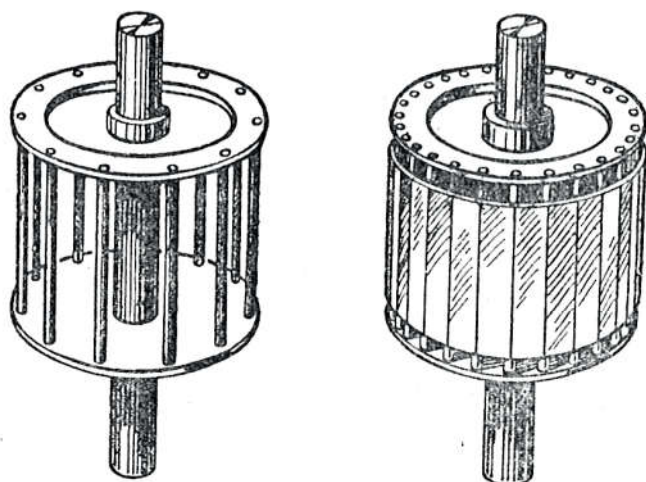
Sl. 168. Rotaciono polje proizvode i tri namota trofaznog sistema. Lijevo je »generator«: Magnet, koji rotira, inducira u namotima trofaznu struju. Desno je »motor«: Trofazna struja stvara rotaciono polje, uslijed kojega se okreće magnetska igla.

Takvo isto *rotaciono polje* može se postići i pomoću tri svitka, smještene kao na slici 168., kroz koje teče trofazna struja, a to je, kako smo naučili, izmje-

nična struja s određenim vremenskim rasporedom promjena struje u pojedinim fazama.

Trofazna struja može proizvesti rotaciono polje, i to je jedna od glavnih njezinih prednosti, jer se to dade vanredno dobro iskoristiti za gradnju motora. Brzina vrtnje rotacionog polja ovisi o frekvenciji trofazne struje. Što je frekvencija veća (ili, kako se često kaže, »viša«), to je i brzina rotacionog polja veća.

No kad bismo desna tri svitka na slici 168. priključili na izvor trofazne struje frekvencije 50 Hz, magnetska bi igla između tih svitaka samo podrhtavala, ali se ne bi okretala. Zašto sad opet to? Zato, što se magnetska igla mora okretati istom brzinom kao i rotaciono polje, t. j. sa 50 okretaja u sekundi, a na tu je brzinu treba najprije dovesti. Kod pokusa prema slici 168. brzina rotacionog polja bila je vrlo mala, pa ako magnetsku iglu malo gurnemo, ona će se dalje okretati zajedno s rotacionim poljem. Kod trofaznih motora, kakvi se upotrebljavaju u praksi, stavlja se između svitaka umjesto magnetske igle jaki elektromagnet. Kod takvih je motora brzina rotacionog polja vrlo velika, budući da se oni priključuju na mrežu frekvencije 50 Hz. Kod takvih



Sl. 169. Kavezni rotor indukcionog motora trofazne struje. Motori s ovakvim rotorom najjednostavniji su elektromotori uopće.

motora treba magnet najprije dovesti pomoću posebnog uređaja za pokretanje na brzinu rotacionog polja, da ga polje može uhvatiti »u korak« i okretati dalje. Takvi se motori, koji se okreću točno istom brzinom kao i rotaciono polje, nazivaju *sinhroni** motori, a ne upotrebljavaju se mnogo baš zbog toga, što trebaju poseban uređaj za pokretanje.

No ima motora s rotacionim poljem, kojima ne treba uređaja za pokretanje. Takvi se motori nazivaju *indukcioni* ili *asinhroni*** motori, a kod njih se rotor, t. j. onaj dio, koji se okreće, ne okreće istom brzinom kao rotaciono polje. Takav se rotor ne sastoji od magneta, već su na njemu smješteni vodiči, u kojima rotaciono polje inducira struje. Najjednostavniji takav rotor prikazan je na slici 169. Sastoji se od samih bakrenih štapova, koji su na oba kraja metalno spojeni bakrenim prstenom. Lijevo na slici 169. rotor je prikazan bez čelika, da se bakreni štapovi bolje uoče. No ti su štapovi ustvari uvijek smješteni u utore čeličnog bubnja***, pa rotor ima oblik kao na slici 169. desno. Kad se takav rotor smjesti u rotaciono polje, ono siječe njegove vodiče,

* *Sinhron* = istovremen, jer se motor okreće istovremeno, točno istom brzinom s rotacionim poljem.

** *Asinhron* = neistovremen, koji se ne okreće istom brzinom.

*** Taj je bubanj sastavljen od tankih, međusobno izoliranih čeličnih limova.

pa se u njima induciraju struje. Budući da polje djeluje na vodiče, kojima teče struja, ono će početi okretati rotor. On će se okretati sve to brže, ali nikad ne će moći postići brzinu rotacionog polja. Kad bi naime rotor postigao istu brzinu, koju ima rotaciono polje, ne bi ono više sjeklo njegove vodiče, u njemu se ne bi inducirale nikakve struje, pa ne bi ni na vodiče više djelovala nikakva sila: rotor ne bi više ništa tjeralo, pa bi se njegova brzina odmah smanjila. Zato se takvi indukcioni motori i zovu asinhroni motori.

Trofazni indukcioni motori, kojih dakako ima vrlo različite gradnje, najjednostavniji su, najjeftiniji i najsigurniji motori za većinu praktičnih potreba. A kako su i trofazni generatori znatno povoljniji od jednofaznih generatora, a i od generatora istosmjerne struje, i to je jedan od krupnih razloga, zašto se trofazni sistem danas općenito upotrebljava za proizvodnju, prijenos i razdiobu električne energije.

Još nešto valja spomenuti kod trofaznih motora. Namoti trofaznog motora posve su jednaki u sve tri faze, pa trofazni motor uzrokuje posve simetrično opterećenje trofaznog sistema. Prema tome *kod priključka trofaznog motora nije potreban nulvodič*, pa bi onaj, koji je crtkano naznačen na slici 168., bio suvišan.

10.3. FAZNI I LINIJSKI NAPON

Neka je generator (na pr. onaj prema slici 163.) građen tako, da se u namotu svake faze inducira elektromotorna sila 220 V. Ako je spoj izveden prema slici 165., svako će trošilo dobiti napon 220 V, umanjen za gubitak napona do tog trošila. No neka je taj gubitak napona malen, pa ga zanemarimo. Između vodiča svake faze postoji dakle napon 220 V. Kad tri vodiča zamijenimo jednim vodičem, nulvodičem, te spoj načinimo prema slici 166., kako se normalno radi kod trofaznog sistema, prilike se ne će nimalo promijeniti. Napon između svakog faznog vodiča i nulvodiča je jednak te iznosi 220 V:

$$U_R = U_S = U_T = U_f.$$

Taj napon U_f između bilo kojeg faznog vodiča i nulvodiča naziva se *fazni napon*.

Koliki je napon između pojedinih faznih vodiča? Na prvi pogled činilo bi se, da taj napon mora biti jednak dvostrukom faznom naponu, dakle u našem slučaju 440 V. Ta između svaka dva fazna vodiča nalaze se dva fazna namota, od kojih svaki proizvodi 220 V. Pa ipak taj napon između faznih vodiča, taj — kako ga zovemo — *linijski* napon* nije jednak dvostrukom faznom naponu. Da to nije ni moguće, uvidjet ćemo odmah, ako se sjetimo, da naponi, koji nastaju u namotima pojedinih faza, nisu istovremeni. Fazni naponi mogu se, kao i struje, prikazati krivuljama po obliku sasvim jednakim onima na slici 164. Te su krivulje međusobno pomaknute što znači, da na pr. maksimum napona u fazi R ne dolazi istovremeno s maksimumom napona u fazi S. O tome se možemo uvjeriti, ako dobro razmotrimo sliku 164. Stoga linijski napon nije jednak dvostrukom faznom naponu, već je od faznog napona veći samo 1,73 puta — i to baš toliko kod svih trofaznih sistema, bez obzira na visinu napona i frekvenciju:

$$U_{RS} = U_{ST} = U_{TR} = \boxed{U = 1,73 U_f}$$

* Kadšto ga nazivaju »međufazni napon«, ili »spojeni napon« ili »ulančani napon«.

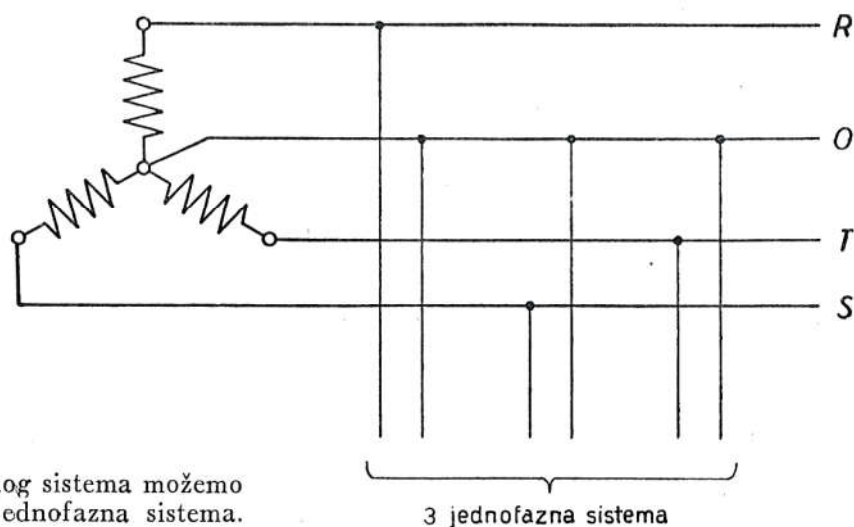
Kad se kod trofaznog sistema navodi napon, a ništa se ne spominje, da li se radi o faznom ili linijskom naponu, misli se uvijek na linijski napon. Napon trofaznog sistema označuje se linijskim naponom. Napon pojedinih faznih vodiča prema zemlji je u normalnom pogonu jednak faznom naponu. Kad, na pr., kažemo da je napon nekog voda 10 kV, onda to znači da linijski napon tog voda iznosi 10 kV, dok je napon vodiča tog voda prema zemlji 1,73 puta manji, t. j. iznosi 5,77 kV.

Zadatak 181. Koliki je napon prema zemlji trofaznog voda od 30 000 (20 000; 110 000) V?

Zadatak 182. Koliki je maksimalni napon između pojedinih vodiča kod voda u prethodnom zadatku?

10.4. PRIKLJUČAK TROŠILA, UPOTREBA NULVODIČA

Kod trofaznog sistema imamo na raspolaganju dva napona: linijski i fazni napon. Za normalnu razdiobu električne energije niskim naponom i za obične kućne instalacije upotrebljava se napon 380/220 V — tako se naime označuje, da je linijski napon 380 V, a fazni napon 220 V. Električna trošila mogu se priključiti bilo na linijski napon, t. j. između dva fazna vodiča, bilo na fazni napon, t. j. između jednog faznog vodiča i nulvodiča.



Sl. 170. Iz trofaznog sistema možemo uvijek dobiti 3 jednofazna sistema.

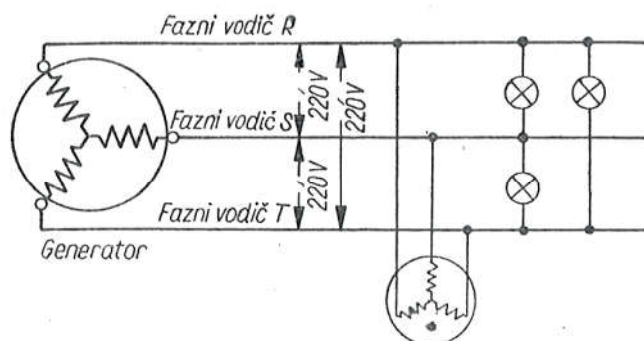
Redovito se sva manja trošila priključuju na fazni napon (slika 166.). Sijalice (osim za reklamnu rasvjetu i specijalne svrhe) čak nije dopušteno priključivati na napon viši od 220 V. Na linijski napon priključuju se uglavnom samo ona trošila, koja se priključuju trofazno. To su uglavnom motori i veći toplinski aparati.

Da se manja trošila mogu priključiti na fazni napon, potreban je nulvodič. On nije nikad posve bez struje, jer opterećenje nije nikad posve simetrično. Sve kad bi u nekoj mreži i bio priključen između pojedinih faznih vodiča i nulvodiča točno jednaki broj jednakih sijalica i drugih trošila, ne može se potrošačima propisivati, da oni trošila u isti trenutak uklapaju i isklapaju. Stoga je nulvodič obično tek nešto tanji od faznih vodiča.

Iz trofaznog sistema možemo uvijek lako dobiti tri jednofazna sistema, i to priključkom na po jedan fazni vodič i nulvodič (slika 170.). Kako kod

običnih kućnih instalacija većinom nema većih trošila, te se sva trošila priključuju na fazni napon, izvodi se većina kućnih instalacija jednofazno, t. j. u pojedine se stanove uvodi samo jedan fazni vodič i nulvodič.

Nulvodič je spojen na spojnu točku namota generatora ili transformatora (slika 166.), koja se naziva *zvjezdište* ili *nultočka*. Nultočka i nulvodič se uzemljuju, da ne bi napon faznih vodiča kod kvarova postao viši od 220 V prema zemlji. To bi bilo moguće, kad nulvodič ne bi bio uzemljen, a bilo bi opasno po ljude, koji dolaze u dodir s električnim instalacijama.



Sl. 171. Trofazni sistem bez nulvodiča za niski napon (ne upotrebljava se kod nas kod novih instalacija).

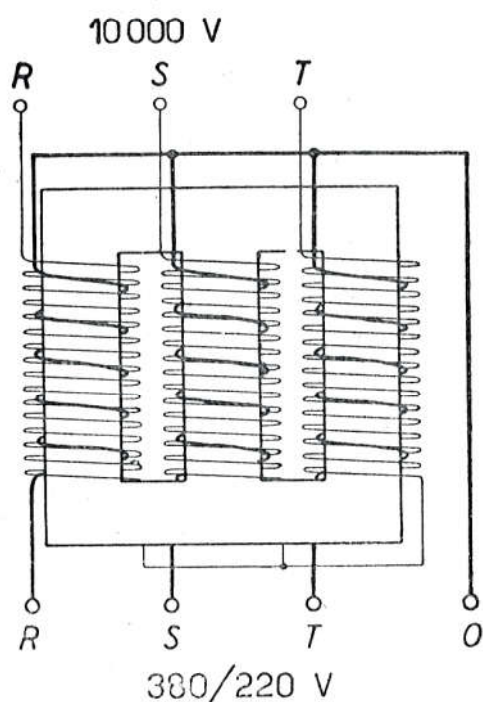
Razdioba električne energije niskim naponom može se provesti i trofaznim sistemom bez nulvodiča. Taj sistem kod nas uglavnom nije uobičajen, ali se ponegdje upotrebljava (na pr. u Rijeci i Istri). Trošila se tada priključuju prema slici 171. Jednofazna se trošila (na pr. sijalice) priključuju između dva fazna vodiča, između kojih treba tada da vlada napon 220 V (ili 110 V), a trofazna se trošila priključuju kao i kod trofaznog sistema s nulvodičem. Kod novih elektrifikacija taj se sistem kod nas normalno ne upotrebljava.

Kod visokog napona nulvodič se nikad ne upotrebljava, jer se na vodove visokog napona priključuju samo transformatori i — kadšto — motori, a jedni se i drugi priključuju trofazno te ne trebaju nulvodiča. Kod transformatora, u kojima se električna energija pretvara od visokog napona na niski, na pr. od 10 000 V na 380/220 V, izvodi se nultočka na njihovoj sekundarnoj strani, na strani niskog napona, kako je prikazano na slici 172. i, sasvim shematski, na slici 173.

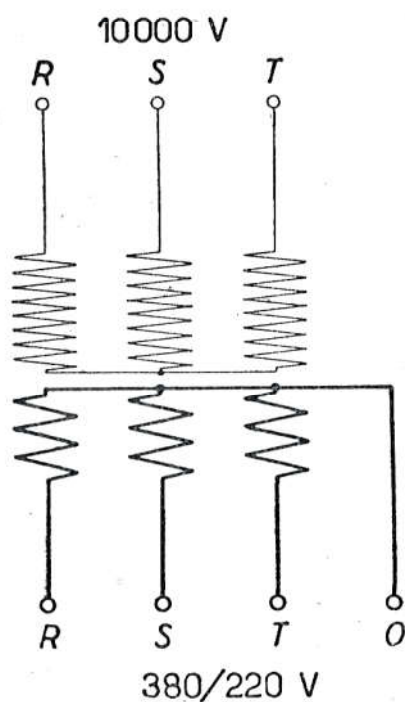
10.5. SPOJ U ZVIJEZDU I SPOJ U TROKUT

Spoj generatora kao na slikama 166. i 168., motora kao na slici 168. te transformatora kao na slikama 172. i 173. naziva se *spoj u zvijezdu*. Tako se zove zato, što u shemi spoja tri namota kao da tvore trokraku zvijezdu. Središte zvijezde naziva se, kako smo rekli, *zvjezdište* ili *nultočka*, i na nj se priključuje nulvodič. No ako nulvodič nije potreban (na pr. kod transformatora za visoki napon, kod motora, kod razdiobe prema slici 171.), može se kod trofaznog sistema upotrebiti i drugi spoj. Tri namota generatora mogu se spojiti i prema slici 174. Početak namota jedne faze spojen je s krajem namota druge faze. Ovakav se spoj za generator jasnije predložuje prema slici 175.,

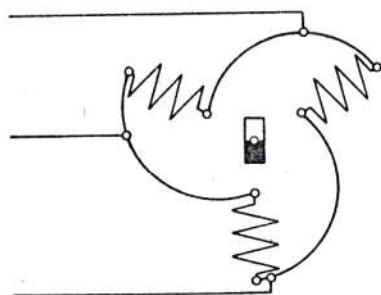
gdje su počeci i krajevi pojedinih namota doista kratko spojeni. Vodovi se priključuju kao i prije, i to je upravo takav trofazni sistem, kakav je prikazan na slici 166. — samo bez nulvodiča. Ovakav se spoj naziva *spoj u trokut*.



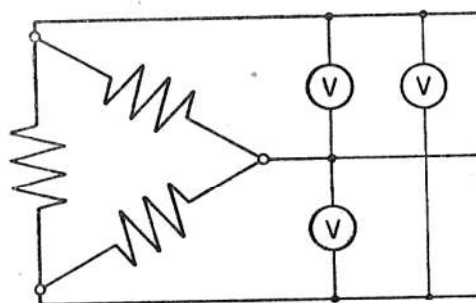
Sl. 172. Trofazni transformator. Na strani visokog napona nema nulvodiča. Na strani niskog napona izvodi se nulvodič, pa se na nj i na jedan fazni vodič priključuju manja trošila.



Sl. 173. Shematski spoj trofaznog transformatora prema slici 172.

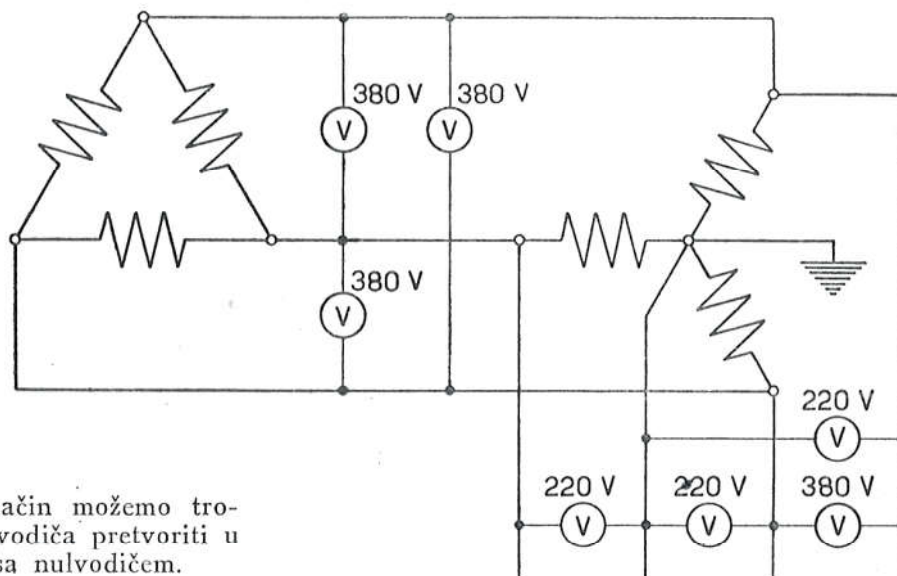


Sl. 174. Spoj u trokut. Početak namota jedne faze spojen je s krajem namota druge faze.

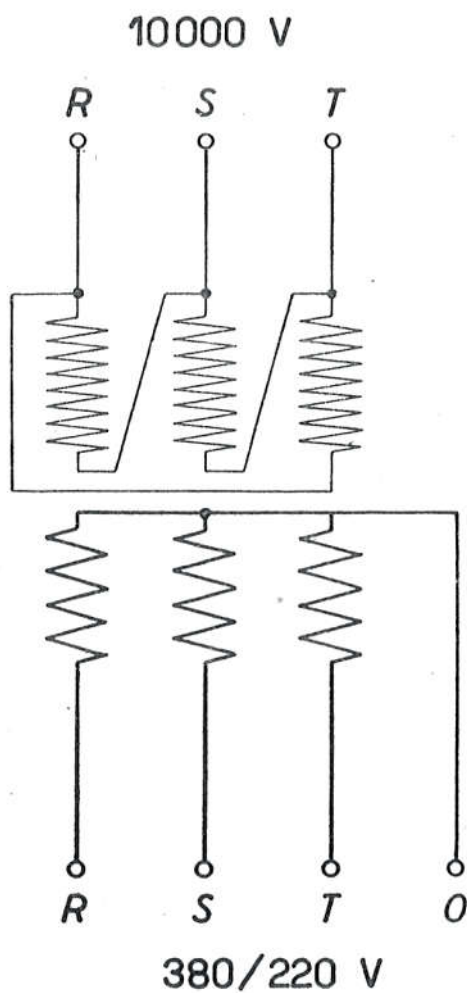


Sl. 175. Spoj u trokut obično se tako prikazuje, a ne kao na slici 174.

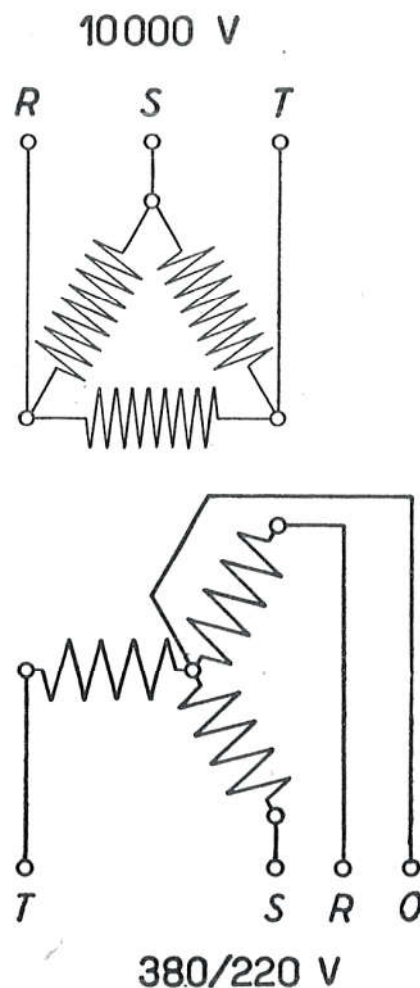
Ponekad se i u pogledu priključka jednofaznih trošila (na pr. sijalica) govori o spoju u zvijezdu ili u trokut. Spoj trošila prema slici 166. naziva se spoj u zvijezdu, jer su trošila spojena između faznih vodiča i nulvodiča, koji



Sl. 176. Na ovaj način možemo trofazni sistem bez nulvodiča pretvoriti u trofazni sistem sa nulvodičem.



Sl. 177. Transformator u spoju trokut-zvijezda. Namoti visokog napona spojeni su u trokut, a namoti niskog napona u zvijezdu.*



Sl. 178. Transformator u spoju trokut-zvijezda možemo prikazati i ovako.*

* Redovito je sekundarni napon 5% viši, t. j. 400/231 V.

je priključen na zvjezdište. Spoj trošila prema slici 171. naziva se spoj u trokut, jer su trošila spojena uvijek između dva fazna vodiča, pa tri ovako spojena jednofazna trošila daju sliku spoja u trokut.

Trofazni sistem bez nulvodiča možemo pretvoriti u trofazni sistem s nulvodičem, kako to prikazuje slika 176., odnosno kod transformatora slika 177. Spoj transformatora prema slici 177. može se predočiti i tako, kako je to pokazano na slici 178. Na toj se slici odmah vidi, da je transformator spojen u spoju trokut-zvijezda.

10.6. SNAGA TROFAZNE STRUJE

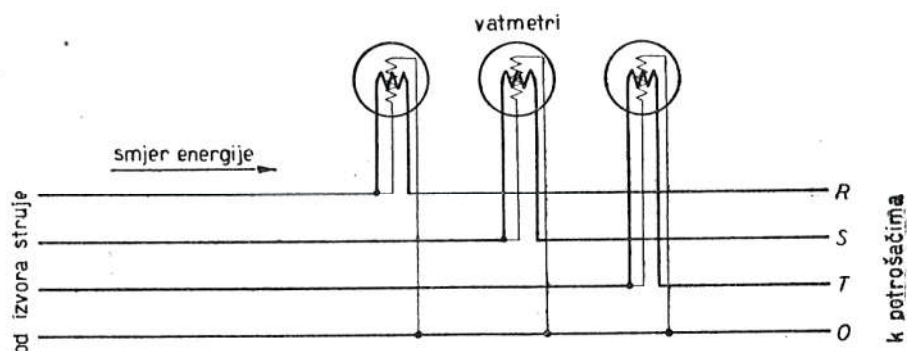
Trofazni sistem tvore tri jednofazna sistema, a trofaznu struju tri jednofazne izmjenične struje. Prema tome je snaga trofazne struje jednaka zbroju snaga jednofaznih izmjeničnih struja, od kojih se ona sastoji:

$$P = U_R I_R \cos \varphi_R + U_S I_S \cos \varphi_S + U_T I_T \cos \varphi_T.$$

43. primjer: Mjerimo snagu trofazne struje pomoću tri vatmetra kao na slici 179., pa prvim izmjerimo 2 kW, drugim 3 kW, a trećim 4 kW. Kolika je onda snaga trofazne struje?

Rješenje: $P = 2 + 3 + 4 = 9 \text{ kW}$.

Sl. 179. Snaga trofaznog sistema jednaka je zbroju snaga triju jednofaznih sistema, od kojih se trofazni sistem sastoji; mjeri se dakle pomoću 3 vatmetra.



Ako je trofazni sistem simetričan, t. j. ako su namoti u sve tri faze jednaki (što se uvijek nastoji postići), te ako je simetrično opterećen, t. j. ako su mu struja i $\cos \varphi$ u sve tri faze jednaki, onda je snaga:

$$P = 3 U_f I \cos \varphi.$$

No rekli smo, da napon trofaznog sistema izrazujemo redovito pomoću linijskog, a ne pomoću faznog napona. Kako je $U_f = U/1,73$, to je $3U_f = 3U/1,73 = 1,73U$, pa ako to uvrstimo u gornju formulu, dobijemo:

$$\boxed{P = 1,73 U I \cos \varphi} = \text{djelatna snaga}$$

Prividna snaga kod trofaznog sistema jednaka je također zbroju prividnih snaga triju jednofaznih sistema:

$$P_z = 3 U_f I = 3 \frac{U}{1,73} I = 1,73 U I.$$

A faktor snage potpuno je jednak kao kod jednofazne izmjenične struje:

$$\cos \varphi = \frac{P}{P_z}.$$

Zadatak 183. Koliku bi snagu uzimalo iz mreže kuhalo od 1000 W, 220 V, kad bi pomutnjom umjesto na jedan fazni vodič i nulvodič bilo priključeno na dva fazna vodiča mreže od 380/220 V?

Zadatak 184. Koliku snagu uzima iz mreže trofazni motor, koji kod 380 (500; 3000) V uzima struju 32 (28,6; 13,7) A uz $\cos \varphi = 0,86$ (0,87; 0,88)?

Zadatak 185. Koliku struju uzima iz mreže kod potpunog opterećenja trofazni motor od 5,5 (15; 50) kW, 380 (500; 3000) V, $\eta = 83$ (86,5; 90) %, $\cos \varphi = 0,82$ (0,85; 0,88)?

Zadatak 186. Kod trofaznog motora za pogon dizalice u rudniku Kreka (za pogon metalne pile u Brodogradilištu u Rijeci; za pogon stroja za prešanje opeka u ciglani u Bedekovčini) izmjerimo: snagu, koju uzima iz mreže, $P = 9,75$ (4,55; 7,2) kW, struju $I = 13,9$ (31,8; 14,1) A i linijski napon $U = 487$ (102; 365) V. Koliki je $\cos \varphi$?

Zadatak 187. Na neki trofazni transformator priključene su samo žarulje. One su priključene tako, da je opterećenje posve simetrično, te kroz svaki fazni vodič teče struja 23,4 (8,3; 17,2) A. Napon između faznih vodiča iznosi 383 (185; 394) V. S koliko je kilovata opterećen transformator? S koliko je kilovoltampera opterećen transformator?

Zadatak 188. Koliko kW može davati trofazni generator od 160 (75; 250) kVA kod $\cos \varphi = 0,7$ (0,8; 0,76)?

Zadatak 189. Koliku jalovu snagu uzima trofazni kondenzator, spojen u zvijezdu, ako ima 250 (320; 65) μF po fazi, a priključen je na napon 380 (500; 3000) V?

Zadatak 190. Trofaznim se vodom napona 10 (6; 5) kV prenosi snaga 330 (275; 180) kW uz $\cos \varphi = 0,75$ (0,72; 0,74). Kolika se prividna snaga prenosi tim vodom? Kolika je jalova snaga? Koliko bi μF po fazi trebalo da ima kondenzator, ako bismo jalovu snagu htjeli posve kompenzirati?

Zadatak 191. U nekom industrijskom poduzeću postavljena su za mjerenje električne energije dva brojila: brojilo djelatnog potroška i brojilo jalovog potroška. U nekom mjesecu je brojilo djelatnog potroška pokazalo potrošak 16 875 (7 543; 38 569) kWh, a brojilo jalovog potroška 12 998 (7 603; 13 451) kVarh. Koliki je bio prosječni faktor snage u tom mjesecu?

Zadatak 192. Trofazni transformator od 100 (200; 50) kVA, s prijenosnim omjerom 10 000/380/220 V (20 000/380/220 V; 6000/380/220 V), htjeli bismo bez ikakvog prespajanja upotrebiti za priključak na 5000 (10 000; 3000) V te za transformaciju na 190/110 V. Da li je to moguće? Ako jest, koliku snagu bi u tom slučaju mogao dati transformator?

Zadatak 193. Električna peć za trofazni priključak, za napon 380 (190; 380) V ima 3 u zvijezdu spojena otpornika od 30 (6,5; 40) Ω . Koliku snagu uzima ova peć?

Zadatak 194. Koliku bi snagu uzimala iz mreže peć iz prethodnog zadatka, ako bi njezini otpornici bili spojeni u trokut?

10.7. PRORAČUN VODOVA

Pad i gubitak napona računaju se na isti način kao i kod jednofazne izmjenične struje, uz neke promjene u formuli za izračunavanje. Taj se način može upotrebiti samo kod simetričkog ili približno simetričnog opterećenja. Kod nesimetričnog opterećenja proračun gubitka napona je kompliciran, i mi se u nj ovdje ne ćemo upuštati.

Gubitak napona se kod trofazne struje i simetričnog opterećenja računa po formuli:

$$u = 1,73 I R \cos \varphi$$

To vrijedi za vodove bez znatnijeg induktivnog otpora. Kod vodova, kod kojih treba uzeti u obzir induktivitet, treba dobiveni rezultat pomnožiti brojevima,

koji se dobiju iz tablice na strani 153. Procentualni gubitak napona računa se, kao i kod jednofazne struje, po formuli:

$$u\% = \frac{u}{U} \cdot 100,$$

gdje je U linijski napon.

Treba još na nešto upozoriti kod izračunavanja otpora R . On se i ovdje izračunava po formuli:

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

ali za l treba uvrstiti samo jednostruku duljinu, a ne kao kod jednofazne struje duljinu »tamo i natrag«. Naznačeni način izračunavanja vrijedi naime samo za simetrično opterećenje, a kod takvog opterećenja ne teče u nulvodiču (ako ga uopće ima) nikakva struja.

Gubitak snage je kod trofaznog sistema jednak zbroju gubitaka snage u tri jednofazna sistema, od kojih se ovaj trofazni sistem sastoji. Kod simetričnog opterećenja jest:

$$p = 3I^2R,$$

a u postocima:

$$p\% = \frac{p}{P} \cdot 100.$$

44. primjer: Trofazni motor za 380 V, 40 KS, $\eta = 88\%$, $\cos \varphi = 0,87$ treba priključiti na transformator pomoću nadzemnog voda dugačkog 300 m, ali tako, da gubitak napona ne prijeđe 6%.

Rješenje: Motor uzima snagu

$$P = \frac{P_{KS}}{1,36 \eta} = \frac{40}{1,36 \cdot 0,88} = 33,4 \text{ kW}.$$

Struju izračunamo iz formule:

$$P = 1,73 UI \cos \varphi,$$

$$I = \frac{P}{1,73 U \cos \varphi} = \frac{33\,400}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,87} = 58,4 \text{ A}.$$

Prema toj struji odaberimo presjek $S = 25 \text{ mm}^2 \text{ Cu}$. Otpor iznosi:

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,018 \cdot 300}{25} = 0,216 \Omega.$$

Gubitak napona:

$$u' = 1,73 IR \cos \varphi = 1,73 \cdot 58,4 \cdot 0,216 \cdot 0,87 = 19,0 \text{ V}.$$

Kako je motor priključen nadzemnim vodom, treba uzeti u obzir induktivni otpor pomoću tablice na strani 153. Iz tablice dobijemo

za $\cos \varphi = 0,80$	broj 1,34,
za $\cos \varphi = 0,90$	broj 1,22.

Za $\cos \varphi = 0,87$ iznositi će taj broj približno 1,26. Gubitak napona jest dakle:

$$u = 19,0 \cdot 1,26 = 23,9 \text{ V},$$

što iznosi u postocima:

$$u\% = \frac{u}{U} \cdot 100 = \frac{23,9}{380} \cdot 100 = 6,3\%.$$

Gotovo smo pogodili! Mogli bismo ostati kod odabranog presjeka, a mogli bismo uzeti i veći presjek, t. j. 35 mm².

45. *primjer*: Koliki treba da bude presjek vodiča nekog nadzemnog voda od 10 kV, ako njime treba prenijeti 100 kW na 10 km daljine uz $\cos \varphi = 0,8$, a gubitak snage ne smije biti veći od 7%? (Vodiči od bakra.)

Rješenje: Struju izračunamo iz formule:

$$P = 1,73 UI \cos \varphi,$$

$$I = \frac{P}{1,73 U \cos \varphi} = \frac{100\,000}{1,73 \cdot 10\,000 \cdot 0,8} = 7,23 \text{ A}.$$

Gubitak snage u vatima smije iznositi najviše

$$p = 0,07 P = 0,07 \cdot 100 = 7 \text{ kW}.$$

Gubitak snage izračunava se po formuli:

$$p = 3I^2R,$$

iz koje možemo izračunati R:

$$R = \frac{p}{3I^2} = \frac{7000}{3 \cdot 7,23^2} = 44,6 \, \Omega.$$

$$R = \frac{\rho l}{S}; \quad S = \frac{\rho l}{R} = \frac{0,018 \cdot 10\,000}{44,6} = 4,03 \text{ mm}^2.$$

No ipak treba iz razloga mehaničke čvrstoće uzeti kod visokog napona presjek barem 10 mm², i to kao bakreno uže (vidi str. 37.).

Zadatak 195. Trofaznim nadzemnim vodom, dugačkim 600 (350; 720) m, dovodi se električna energija do skupine žarulja za rasvjetu igrališta. Ukupna jakost žarulja iznosi 16 (12; 18) kW. Koliki je gubitak napona u tom vodu, ako je napon na kraju voda 380/220 V, a presjek vodiča 50 (25; 70) mm² Cu. Žarulje su na pojedine faze spojene tako, da je opterećenje simetrično.

Zadatak 196. Koliki su gubitak napona i gubitak snage u nadzemnom vodu, kojim se električna energija dovodi do potrošača, koji kod napona 380/220 V (190/110 V; 500 V) treba 11 (4,8; 7,5) kW uz $\cos \varphi = 0,75$ (0,85; 0,8)? Vod je dugačak 750 (240; 1050) m, presjek bakrenih vodiča iznosi 35 (25; 16) mm².

Zadatak 197. Koliki treba da bude presjek bakrenih vodiča nadzemnog voda, kojim treba dovesti električnu energiju do tvornice, koja kod napona 380/220 V treba 32 (18; 24) kW uz $\cos \varphi = 0,8$ (0,7; 0,9). Vod je dugačak 370 (430; 620) m, a razmak između vodiča iznosi oko 60 cm. Gubitak napona ne smije biti veći od 4%.

Zadatak 198. Trofaznim nadzemnim vodom treba prenijeti snagu 500 (300; 3000) kW uz $\cos \varphi = 0,75$ (0,85; 0,7) na daljinu 10 (5; 30) km

a) uz napon 5 (3; 15) kV,

b) uz napon 10 (6; 30) kV,

ali tako, da gubitak snage ne prijeđe 5%. Koliki treba da je presjek vodiča od bakra? Koliko puta deblji moraju biti vodiči kod 5 (3; 15) kV nego kod 10 (6; 30) kV?

Zadatak 199. Koliko iznosi procentualni gubitak snage u vodu iz zadatka 190, a) prije kompenzacije, b) nakon kompenzacije, ako je otpor voda 12,3 oma po fazi. Kolika je ušteda u troškovima na električnoj energiji, postignuta kompenzacijom, ako se ovaj prijenos vrši za vrijeme od 4000 (2500; 4200) sati godišnje, a električna energija stoji Din 7,— (6,50; 8,—) po kWh.

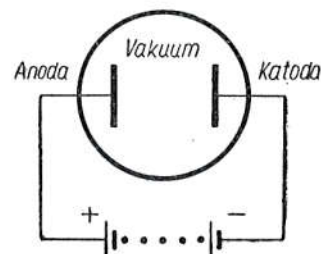
11. PROLAZ STRUJE KROZ VAKUUM, PLINOVE I PARE

11.1. PROLAZ STRUJE KROZ VAKUUM

Ako bismo iz nekog staklenog balona prema slici 180. posve isisali zrak, ne bi između metalnih ploča (elektroda) u tom balonu tekla baš nikakva struja. Na negativnoj elektrodi (katodi) skupili bi se doduše elektroni i oni bi težili na dođu kroz balon na pozitivnu elektrodu (anodu), ali im to ne bi uspijevalo. Elektroni ne mogu bez naročitih okolnosti izaći iz metalnih vodiča.

No u naročitim uvjetima elektroni ipak izlaze iz metalnih vodiča. Ovdje ćemo prikazati dva načina i ukazati na njihove osnovne primjene.

a) *Termoelektronska emisija.* Ugrijemo li na bilo koji način makar kakav komad metala do dovoljno visoke temperature (nekoliko stotina do nekoliko hiljada °C), iz njega će pod utjecajem toplinskog (termičkog) gibanja izlaziti elektroni. Normalno, oni se sasvim malo udalje od metala, te ih on za tili čas opet privuče natrag. Ugrijemo li katodu kod uređaja prema slici 180., tada će iz nje izlaziti veći ili manji broj elektrona, već prema temperaturi, na koju je katoda ugrijava i njezinoj konstrukciji. No jedan se dio elektrona ne će sada više vraćati u katodu, jer ih privlači pozitivna anoda: negativni naboj elektrona i pozitivni naboj anode privlače se. Elektroni će se kroz vakuum gibati od katode prema anodi, kroz vakuum će dakle teći električna struja.



Sl. 180. Struja teče kroz vakuum samo, ako je katoda vruća, jer samo iz vruće katode izlaze elektroni.

Ova pojava izbacivanja, odašiljanja ili, kako se to prema latinskom kaže, emisije* elektrona iz vruće katode naziva se termoelektronska emisija, a stakleni baloni, koji iskorišćuju ovu pojavu, nazivaju se općim imenom elektronske cijevi ili elektronke. O njima će biti još riječi u poglavlju 11.2.

Elektroni se u elektronkama mogu gibati samo od katode prema anodi, jer oni mogu izaći samo iz katode. Formalno (ali i samo formalno!) mi smjerom struje smatramo smjer od anode prema katodi, jer se strujom smatra gibanje pozitivnih čestica elektrike (vidi poglavlje 4.7).

b) *Fotoelektronska emisija.* Pustimo li, da na katodu prevučenu naročitim metalom pada svjetlost, izbijat će ta svjetlost elektrone iz katode. Jedan dio tih elektrona privući će anoda. Pojava je sasvim slična kao kod termoelektronske emisije s tom razlikom, što je uzrok izlaženju elektrona iz katode svjetlost, a ne toplina. Stakleni baloni, koji iskorišćuju tu pojavu, zovu se fotocijevi ili fotonke.

* Latinska riječ »emissio« znači odašiljanje.

11.2. ELEKTRONKE

Elektronke se danas upotrebljavaju u gotovo bezbrojne svrhe, a ima ih izvanredno mnogo različitih konstrukcija. Mi ćemo ovdje opisati samo najjednostavnije.

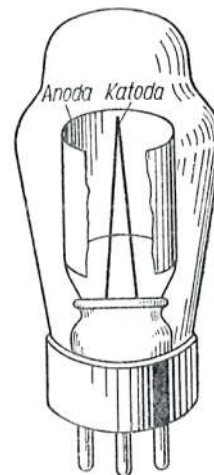
Elektronka sa dvije elektrode naziva se *dioda* ili *kenotron*. Dioda nisu nikad građene prema slici 180., već otprilike tako, kako je pokazano na slici 181. Katoda je građena kao žičana petlja, a anoda kao metalni cilindar. Stezaljke su izvedene u podnošku i imaju oblik utikača.

Struja kroz elektronku ovisi, u određenim granicama, o naponu između anode i katode. Što je taj napon veći, struja će biti jača. Ako taj napon poraste iznad izvjesne granice, struja ne će dalje rasti: elektronka je zasićena, a to znači, da na anodu dolaze praktički svi elektroni, koji izlaze iz katode.

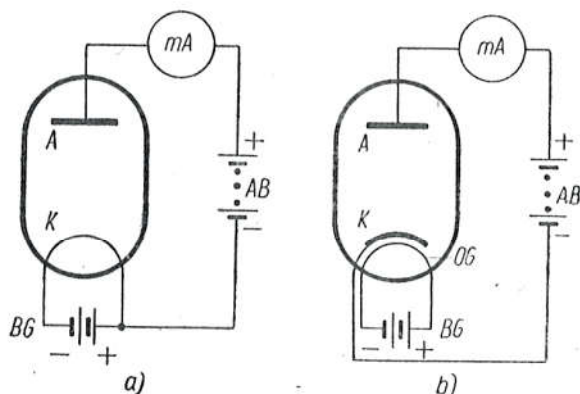
Struja zasićenja jako ovisi o temperaturi, na koju je ugrijana katoda. Iz volframa, na primjer, izlazi pri 2200°C oko 75 puta više elektrona nego pri 1800°C , a slično je i kod drugih metala.

Katode se izrađuju od materijala, iz kojih razmjerno lako izlaze elektroni. Kao materijali za katode upotrebljavaju se volfram, volfram s dodatkom torija, nikaljne slitine sa slojem barija, cezija ili stroncija i drugi.

Katoda može biti grijana direktno ili indirektno, istosmjernom ili izmjeničnom strujom. Shema spoja diode s direktno grijanom katodom prikazana

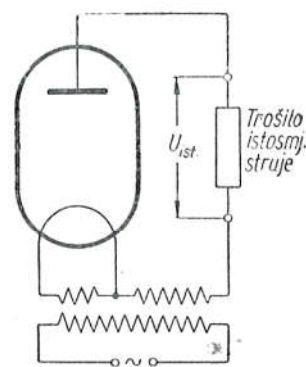


Sl. 181. Dioda ili kenotron, elektronka sa dvije elektrode.



Sl. 182. Dioda a) s direktno i b) s indirektno grijanom katodom.

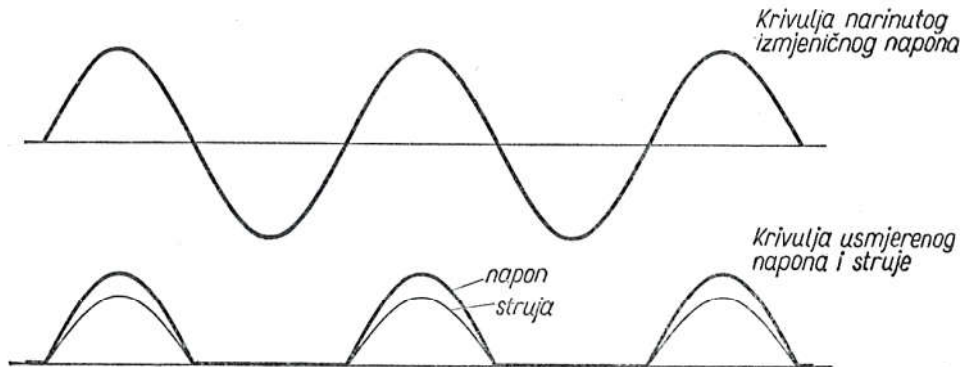
A-anoda, K-katoda, AB-anodna baterija, BG-baterija za grijanje
mA-miliampermetar.



Sl. 183. Dioda kao usmjerivačica. (Sekundarni namot transformatora daje napon za grijanje i anodni napon.)

je na slici 182.a. Struja grijanja teče kroz katodu. Indirektno grijana katoda spojena je prema slici 182.b. Ona nije u metalnom spoju s otpornikom za grijanje.

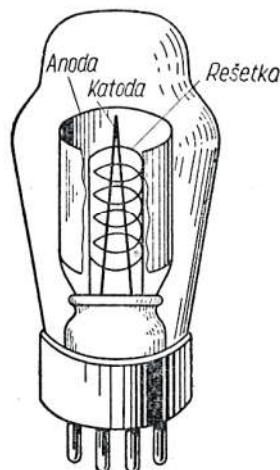
Osnovni zadatak diode je *usmjerivanje struje*, t. j. pretvaranje izmjenične struje u istosmjernu. Takve se elektronke zovu *usmjerivačice*. Najjednostavniji spoj usmjerivačice prikazuje slika 183. Transformator daje katodi čas pozitivni, čas negativni napon prema anodi. Pomoću posebnog strujnog kruga, koji je napajan od istog transformatora, katoda se grije pa izbacuje elektrone. Rekli smo, da se elektroni mogu gibati samo od katode prema anodi. Izmjenični napon narinut elektronki moći će prema tome proizvesti



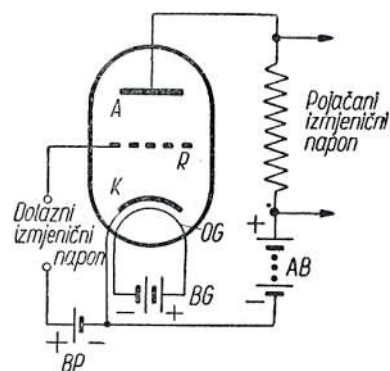
Sl. 184. Krivulje narinutog i usmjerenog napona usmjerivačice sa slike 183.

struju kroz elektronku samo onda, kad je katoda negativna, a anoda pozitivna elektroda, dakle samo za vrijeme jedne poluperiode. U drugoj poluperiodi, kad je katoda pozitivna, narinuti napon ne će moći proizvesti struju kroz elektronku, jer će katoda izbačene elektrone privući natrag. Krivulje napona i struje izgledat će prema tome kao na slici 184. Izmjenični napon proizvest će pulzirajuću istosmjernu struju i pulzirajući istosmjerni napon. U glavi 15. pokazat ćemo, kako se izmjenična struja daje povoljnije pretvoriti u istosmjernu.

U vakuumskim elektronkama ne vlada doduše apsolutni vakuum. Nešto atoma plina oстане u elektronki usprkos najsavršenijem isisavanju, no to je



Sl. 185. Trioda — elektronka s rešetkom.



Sl. 186. Trioda kao pojačalo.

R - rešetka, OG - otpornik za grijanje katode, BP - baterija za prednapon rešetke, ostalo kao na slici 182.

tako malo, da vakuum možemo smatrati praktički potpunim. Tlak plina u takvim elektronkama iznosi otprilike sto milijunti dio jedne atmosfere.

Mnoge su elektronke punjene plinom. Neke sadrže nešto žive, koja se djelomično ispari, kad cijev radi, a druge su punjene malim količinama plemenitog plina tako, da je tlak u njima oko 0,001 do 0,002 (jedna do dvije tisućinke) atmosfere. Punjenje plinom pojačava struju elektrona kroz cijev.

Često je potrebno struju kroz elektronku regulirati. To se jednostavno postižava ugradnjom treće elektrode između katode i anode. Ta se treća elektroda naziva *rešetka*, a može biti građena u formi spirale, koja okružuje katodu (slika 185.). Elektronke s 3 elektrode nazivaju se *triode*. Prema tome, da li je napon rešetke prema katodi pozitivan ili negativan, pospješuje ona ili usporuje gibanje elektrona kroz elektronku. Prikladnom konstrukcijom rešetke može se postići, da sitna promjena napona na rešetki izaziva znatnu promjenu jakosti struje kroz elektronku. Prema tome takve cijevi s rešetkom mogu služiti i kao pojačala, a služe i u mnoge druge svrhe. Osnovni spoj prikazuje slika 186.

Ima elektronki i sa 4 elektrode (*tetrode*), s 5 elektroda (*pentode*), pa i s još više elektroda. Njihovo je djelovanje dosta složeno, pa ga ne ćemo ovdje opisivati.

Osim kao usmjerivačice i pojačala, elektronke se najviše upotrebljavaju kao oscilatori, pa u signalnim, mjernim, regulacionim i zaštitnim uređajima, ali još i u mnoge druge svrhe.

11.3. FOTONKE

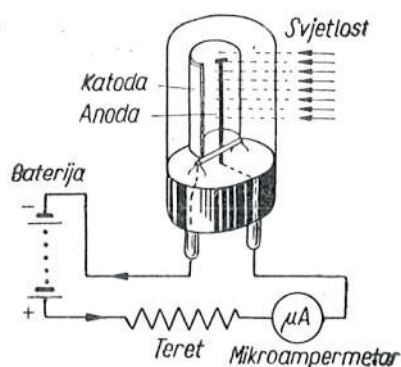
Fotonke su takve elektronske cijevi, kroz koje prolaze elektroni pod utjecajem svjetlosti, što pada na katodu. Princip fotonke prikazan je na slici 187.

U staklenom balonu, smještena je anoda u obliku štapića ili prstena, a katoda se sastoji od tankog sloja alkaličnog metala (cezija, kalija, rubidija) nanesenog na sloj srebra na unutarnjoj strani staklenog balona. (Na slici 187. nacrtana je posebna katoda.) Na balonu je ostavljeno samo malo okance, kroz koje svjetlost može dospjeti u unutrašnjost balona.

Kad svjetlost pada na katodu, ona izbija iz katode elektrone, koje anoda privlači isto tako kao u elektronkama: Kroz fotonku teče tada struja. Kad svjetlost na katodu ne pada, elektroni ne mogu izaći iz nje, pa struja kroz fotonku ne teče. Što je jača svjetlost, koja upada u fotonku, to je jača struja kroz nju. Ta se pojava može iskoristiti u vrlo mnoge svrhe. Fotonke se upotrebljavaju u tonfilmskoj tehnici, televiziji, za mjerenje jakosti rasvjete, u sigurnosne svrhe, za kontrolu kod mnogih industrijskih procesa i t. d. One zamjećuju svaku promjenu jakosti ili boje svjetlosti, koja pada u fotonku, i to tako, da svaka takva promjena izaziva promjenu struje u strujnom krugu fotonke, a ta se promjena može u prikladnom spoju iskoristiti za signalizaciju, uklapanje, isklapanje ili drugo.

Struja kroz fotonku vrlo je slaba. Ona iznosi tek nekoliko mikroampera (milijuntinka ampera). Stoga je fotonka redovno u vezi s elektronkom kao pojačalom.

Struja kroz fotonku nešto je jača, ako u fotonki nije vakuum već nešto malo plina. Takve se fotonke ipak u neke svrhe ne mogu upotrebiti, jer su donekle trome, t.j. promjena struje kroz fotonku nije istovremena s promjenom svjetlosti, koja na nju pada.



Sl. 187. Fotonka.

11.4. IZBIJANJE U PLINU I PARI

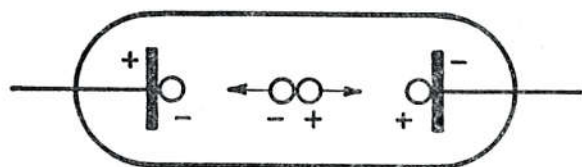
Plinovi, koji nisu izvrgnuti suviše jakim električnom polju, u običnim su prilikama izvrsni izolatori, tako dobri, da ni najpreciznijim ampermetrima ne možemo zamijetiti, da kroz njih teče struja. Priključimo li na primjer svjetlosnu cijev na ne previsoki napon, ona ne samo da ne će svijetliti, već ni mikroampermetrom priključenim u seriju s tom cijevi ne ćemo moći izmjeriti nikakvu struju. Plin u cijevi kao da je savršen izolator. (Ima međutim načina, kako se može pokazati, da ipak neka neznatna struja teče kroz cijev.)

Ako napon povisujemo, cijev će pri određenom naponu početi svijetliti, i kroz nju poteče struja, koju možemo i izmjeriti ampermetrom. Dok je kod niskog napona otpor cijevi bio golem, dotle se on iznad određenog napona odjednom bitno smanji. Napon, kod kojega se to događa, pri kojemu se svjetlosna cijev pali, ovisi o duljini i promjeru cijevi te o vrsti i tlaku plina, kojim je cijev punjena. Taj se napon naziva **n a p o n p a l j e n j a**. Iznad određenog napona poteče dakle kroz cijev struja, naboji elektroda nastoje se izjednačiti, i elektrode se izbijaju.

Do izbijanja dolazi i u pari. Naročito je važno izbijanje u živinoj i natrijevoj pari. Izbijanje u živinoj pari iskorišćuju živini usmjerivači i živine sijalice, a izbijanje u natrijevoj pari iskorišćuju natrijeve sijalice.

Struja kroz plinove teče drukčije nego kroz metalne vodiče. Ohmov zakon vrijedi samo kod neznatnih struja. Nosioци struje nisu samo elektroni, kao ni kod tekućina, elektrolita. Odnosi, koji ovdje nastaju, dijelom su vrlo složeni, ali grubu sliku o njima možemo ipak dobiti dosta jednostavno.

Kao i sve druge tvari svaki se plin sastoji od molekula, a ove od atoma. Svaki takav atom ima električki pozitivno nabijenu jezgru i izvjestan broj elektrona, koji kruže oko te jezgre. Normalno, atomi plina su električki neutralni, jer se utjecaji pozitivnog naboja jezgre i negativnih naboja elektrona međusobno poništavaju. Izvjesne zrake, koje dolaze iz svemira, takozvane kozmičke zrake, kao i zrake, koje potječu od radioaktivnih raspadanja u zemlji, izbiju iz pojedinih atoma plina elektron. Tako nastane svake sekunde u plinu izvjestan (vrlo mali) broj slobodnih elektrona i pozitivno nabijenih atoma (koji su pozitivno nabijeni stoga, što



Sl. 188. Pozitivni ion putuje prema katodi, a negativni prema anodi.

im manjka jedan elektron). Ovakvi dijelovi atoma, koji su pozitivno ili negativno nabijeni, nazivaju se ioni, a sama pojava **ionizacija**. Pozitivno nabijeni atom, kojemu manjka jedan elektron, naziva se pozitivni ion, a elektron je negativni ion. Dok na svjetlosnu cijev nije priključen nikakav napon, ioni se dosta brzo ponovo sjedinjuju: u cijevi ima uvijek razmjerno mali broj iona.

No što se događa, kad na svjetlosnu cijev narinemo napon? Da to objasnimo, promatrajmo jedan pozitivni i jedan negativni ion prema slici 188. Pod utjecajem električkog polja negativni se ion (elektron) giba prema pozitivnoj elektrodi, anodi, dok se pozitivni ion giba prema negativnoj elektrodi, katodi. Kad dođe na anodu, elektron se u metalnom vodiču giba dalje kao struja. Isti onaj broj elektrona, koji iz anode ulazi u metalni vodič strujnoga kruga, isti taj broj elektrona dolazi iz metalnog vodiča na katodu. Ti elektroni, koji dolaze metalnim vodičem na katodu, spajaju se na njoj s pozitivnim ionima, koji na katodu dolaze iz plina pod utjecajem električkog polja.

Na taj način u metalnom vodiču strujnoga kruga teče struja, a ona se na opisani način nastavlja i kroz razrijeđeni plin. Ta je struja vrlo slaba sve do određenog napona, jer ona potječe samo od onog razmjerno malog broja iona, koji nastaju ionizacijom zbog djelovanja kozmičkih zraka i zraka od radioaktivnih raspadanja u zemlji.

No iznad određenog napona ta se struja bitno pojačava, i svjetlosna cijev počinje da svijetli. Zbog čega?

Uslijed djelovanja električnog polja — koje je jače, što je napon viši — ioni se gibaju prema elektrodama. Oni pod utjecajem električnog polja dobivaju sve veću brzinu, slično kao što se i kamen, koji smo bacili s visine, pod utjecajem sile teže giba sve brže. No ioni se na svom putu srazuju s atomima plina. Ako je brzina iona dovoljno velika, izbit će ion pri takvom srazu s atomom plina iz njega jedan elektron. Nastat će dva nova iona: slobodni elektron i pozitivno nabijeni atom bez jednog elektrona. Ovi će ioni također poletjeti prema elektrodama i na svom će putu srazom, sudarom opet izbiti po koji elektron iz atoma plina. Na taj način broj iona raste kao lavina, pa bi struja tako porasla, da bi svjetlosna cijev bila uništena. Da se struja ograniči, treba stoga u seriju sa svjetlosnom cijevi spojiti prikladni otpornik. Kod izmjenične se struje umjesto omskog otpornika upotrebljava u tu svrhu prigušnica (prigušni svitak). Ovakva ionizacija, koja nastaje zbog sudara iona i atoma, naziva se *sudarna ionizacija*.

Kod sudara između iona i atoma nastaje još jedna pojava: svjetlost. I ta pojava nastaje, samo ako je brzina iona dovoljno velika. Zbog toga svjetlosna cijev svijetli.

Ako svjetlosna cijev nije dovoljno evakuirana, t.j. ako plin u njoj nije dovoljno razrijeđen, ona ne će svijetliti. U tom su slučaju atomi plina u njoj tako gusti, da se ioni s njima sudaraju prije, nego što su postigli dovoljnu brzinu, da bi izbili elektron iz atoma, odnosno da bi izazvali svjetlosno djelovanje.

Zbog sudarne ionizacije veća je i osjetljivost elektronki i fotonki, kad se u njima nalazi nešto plina.

Izbijanje, koje smo netom opisali, jest *tinjavo izbijanje*. Njegova je karakteristika, da temperatura ostaje niska, a struja je mala. No u određenim uvjetima tinjavo izbijanje prelazi u *lučno izbijanje* i temperatura se znatno povišuje, katoda se užari, struja bude znatno jača, a napon potreban za održavanje izbijanja bude mnogo manji. Takvo izbijanje ne podržavaju samo ioni nastali sudarnom ionizacijom, već u mnogo većoj mjeri elektroni, koji izlaze iz užarene katode (termoelektronska emisija, vidi 11.1). Primjer za takvo izbijanje jesu živini usmjerivači.

11.5. IZBIJANJE U ZRAKU

Izbijanje u zraku nije drugo već izbijanje u plinu pri atmosferskom tlaku, jer je zrak ustvari plinska smjesa. No, kako je u jednu ruku zrak najvažniji izolator u elektrotehnici, a u drugu se ruku naš dosadašnji opis izbijanja odnosio uglavnom na izbijanje u plinu pod niskim tlakom, opisat ćemo ovdje posebno razne oblike izbijanja u zraku.

Možemo razlikovati 5 različitih izbijanja u zraku, i to:

1. tamno izbijanje,
2. tinjavo izbijanje,
3. trakasto izbijanje,
4. električnu iskru i
5. električni luk.

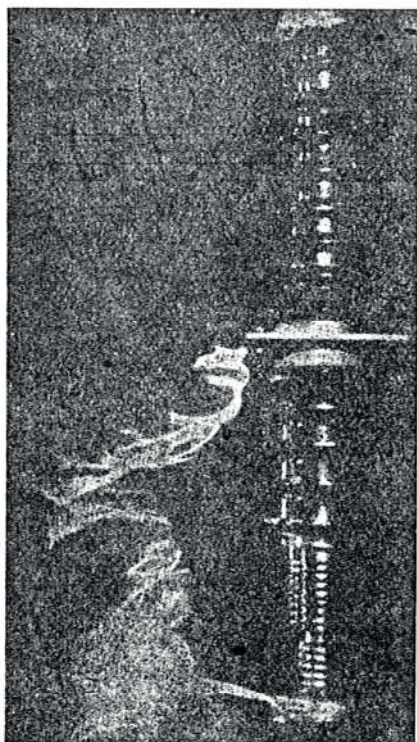
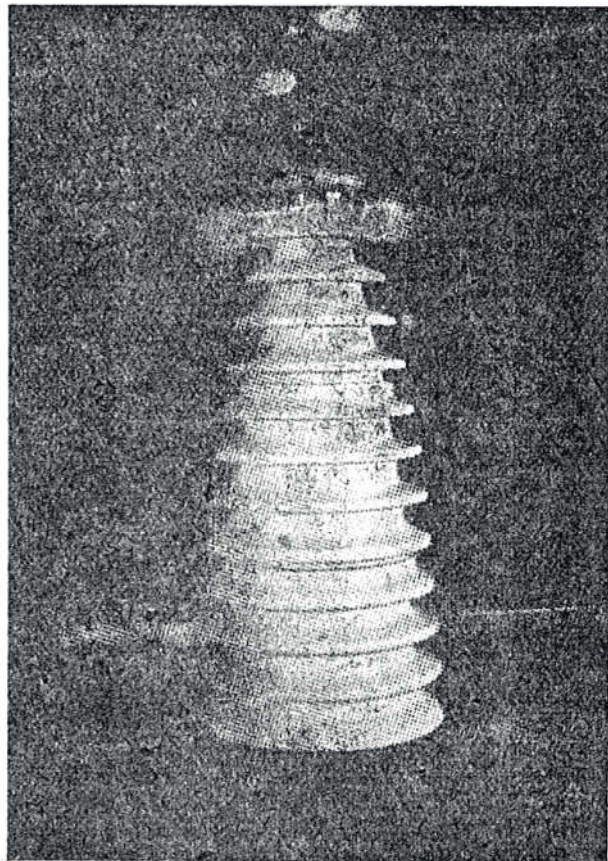
Tamno izbijanje je neznatna struja kroz zrak, kod koje nema nikakvih svjetlosnih učinaka. Između dva vodiča nekog nadzemnog voda teče uvijek neka struja. Jakost te struje ovisi o visini napona i o još mnogim drugim faktorima. I kod vrlo visokih napona ona je neznatna, tako malena, da je ne treba uopće uzeti u obzir.

Ako jakost električnog polja u zraku na nekom mjestu električnih postrojenja prijeđe izvjesnu granicu, izbijanje postaje vidljivo. Ono se pojavljuje

Sl. 189. Tinjavo izbijanje na metalnim
bridovima potpornog izolatora. →

kao tinjavo plavičasto svijetlo, pa se takvo izbijanje naziva *tinjavo izbijanje*. Ono nastaje u postrojenjima visokog napona, najprije na oštrim bridovima provodnih i potpornih izolatora te na šiljcima i oštrim bridovima drugih dijelova električnih postrojenja (slika 189.). Kod vodova visokog napona ono nastaje na oštrim dijelovima ovjesnog i spojnog materijala. Tinjavo izbijanje nastaje najprije na šiljcima i bridovima stoga, što je na tim mjestima električno polje najjače. No ponekad se tinjavo izbijanje pojavljuje i na cijeloj duljini vodova visokog napona, osobito na vodovima iznad 100 000 V. U tom slučaju vodiči noću svijetle, oni su okruženi tinjavim svijetlom. Ova se pojava naziva *korona**. Ona je vrlo važna kod vodova visokog napona.

Korona uzrokuje znatne dodatne gubitke energije u vodu. Pod nepovoljnim prilikama gubitak snage zbog korone može prijeći i 10% snage,



koja se prenosi. Korona nastaje, ako jakost polja na površini vodiča prijeđe izvjesnu granicu. Polje na površini vodiča uz isti je napon jače, što je površina vodiča manja, t. j. što je promjer vodiča manji. Stoga za svaki visoki napon postoji neki najmanji dopustivi promjer vodiča, ispod kojega ne smijemo ići, jer bi inače nastala korona i s njom spojeni veliki gubici energije**.

Ako kod nekog postrojenja ili uređaja, kod kojega je već nastalo tinjavo izbijanje, povišimo napon, a time pojačavamo električno polje, prijeći će kod određenog napona na pojedinim točkama mirno tinjavo svijetlo u nemirno *trakasto izbijanje*. Pojavljuju se nemirne svijetle trake s mnogo ogranaka. Pojava ovakvog trakastog izbijanja je znak, da je zrak kao izolator došao blizu granice svoje izdržljivosti. Stoga električna postrojenja moraju biti građena tako, da do trakastog izbijanja u normalnom pogonu ne dolazi.

← Sl. 190. Električni luk na provodnom izolatoru.

* »Korona« je latinska riječ, a znači »kruna«. Oko vodiča kao da postoji svijetla kruna.

** Ponekad se u osobitim atmosferskim prilikama pojavljuje korona i na vodovima, gdje je inače nema.

Konačno, ako zrak još jače električki napregnemo, prijeđe trakasto izbijanje odjednom u *električnu iskra*. Struja skokimice poraste na veliku jakost. Između obje elektrode kao da je nastao metalni spoj, pa električna iskra znači praktički kratki spoj elektroda. Zrak više nije izolator, on je postao vodljiv.

Ako izvor struje nije dovoljno izdašan, električna će se iskra začas utnuti. No ako je izvor struje izdašan, izbijanje će potrajati dulje. Takvo izbijanje nazivamo *električnim lukom* (slika 190.) Električni se luk ne trne lako. Na njegovoj se stazi stvara mnoštvo iona, a i nastala toplina pomaže njegovu održavanje: iz vruće katode lako izlaze elektroni. Tako se luk može održati i ako napon spadne na dio prvotnog napona.

Električni luk je jedan od najvećih neprijatelja električnih postrojenja. Vrlo visoke temperature, koje on uzrokuje, kadšto posvema unište dotični dio postrojenja. Osim toga on uzrokuje i prenapone, koji mogu oštetiti strojeve i aparate priključene na mrežu. Stoga se u električnim postrojenjima poduzimaju različite zaštitne mjere protiv nastajanja i učinaka električnog luka. Luk nastaje ponajviše od atmosferskih prenapona, ali i zbog krivog sklapanja i oštećenja pojedinih dijelova postrojenja.

Najveća električna iskra nastaje u prirodi. To je *munja*. Ona nastaje kao posljedica izvanredno velikog napona uzrokovanog ogromnim nabojem. Taj naboj nastaje trenjem vodenih masa u oblacima. Jakost struje kod munje iznosi nekoliko hiljada do nekoliko desetaka hiljada ampera, pa i do 300 000 A. No njezino je trajanje vrlo, vrlo kratko, tek nekoliko milijuntinka sekunde. Stoga je energija munje razmjerno vrlo mala: svega nekoliko kilovatsati.

Kako nastaje izbijanje u zraku? Pa, grubo rečeno, vrlo slično kao i u razrijeđenom plinu i pari. Samo što napon, odnosno električno polje, koji su potrebni, da dođe do izbijanja, moraju biti znatno viši nego kod razrijeđenih plinova i para. Do izbijanja dolazi zbog ionizacije zraka. Tamno izbijanje nastaje zbog ionizacije malog broja atoma pod utjecajem kozmičkih zraka, odnosno radioaktivnog zračenja iz zemlje, jednako kao i u svjetlosnoj cijevi. Do tinjavog i svih ostalih vrsta izbijanja dolazi uslijed sudarne ionizacije, koja nastaje, kad ioni pod utjecajem dovoljno jakog električnog polja postignu dostatnu brzinu. A da oni u zraku pri atmosferskom tlaku postignu dovoljnu brzinu, potrebno je znatno jače polje nego u razrijeđenom plinu. U zraku su, naime, pri atmosferskom tlaku atomi, odnosno molekule znatno gušće nego u razrijeđenom plinu, pa ion udari u neku molekulu prije, nego je postigao dovoljnu brzinu. Tek ako je električno polje razmjerno vrlo jako, ioni se dovoljno ubrzaju prije, nego udare o molekulu, pa tek onda može nastati sudarna ionizacija. Pri tinjavom izbijanju sudarna ionizacija nastaje samo na elektrodama, gdje je jakost polja najveća. Pri trakastom izbijanju ona nastaje već na duljem dijelu razmaka između elektroda, a kod iskre, odnosno luka na cijelom putu između elektroda. Stoga je pri trakastom izbijanju potrebno još jače polje, a najjače je potrebno, da dođe do iskre i luka.

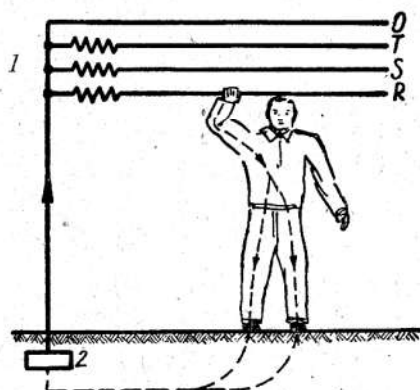
12. DJELOVANJE ELEKTRIČNE STRUJE NA ČOVJEKA

12.1. LJUDSKO TIJELO U STRUJNOM KRUGU

Struja iznad određene jakosti opasna je po ljudsko tijelo. Ona izaziva grč mišićja, a može dovesti do oštećenja krvnih sudova i živaca, prouzročiti teške opekline, a i smrtonosno treperenje srčanih klijetki.

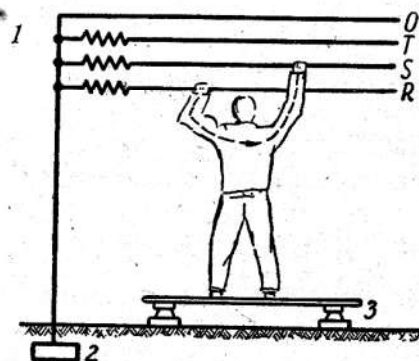
Čovjek može stradati od električne struje, ako njegovo tijelo dođe u dodir s dijelovima električnih postrojenja, koji su pod naponom, tako da se strujni krug zatvori kroz njegovo tijelo. Najčešće do toga dolazi prema slici

191. tako, da se čovjek, stojeći na vodljivoj podlozi, dotakne nekog vodiča ili nekog dijela postrojenja, koje je pod naponom ili je zbog kvara došlo pod napon. Strujni krug se tada zatvara kroz srce, i čovjek može da strada i životom. Ako čovjek stoji na izoliranoj podlozi, tada se može bez opasnosti dotaknuti jednog vodiča pod naponom uz uvjet, da je podloga dovoljno siguran izolator za napon, koji vlada između tog vodiča i zemlje. Tada se naime strujni krug ne može zatvoriti kroz čovjeka, pa struja ne može teći kroz njegovo tijelo. Na taj se način izvjesni radovi na električnim postrojenjima mogu obavljati i obavljaju se pod naponom. Pritom treba međutim paziti, da se čovjek ne dotakne dvaju vodiča pod naponom, jer će se tada strujni krug prema slici 192. zatvoriti kroza nj, i čovjek može lako stradati.



Sl. 191. Dodir vodiča ili dijela postrojenja pod naponom vrlo je opasan, ako čovjek stoji na vodljivoj podlozi.

1 - transformator, strana niskog napona; 2 - uzemljivač.



Sl. 192. Vrlo je opasno dodirnuti dva vodiča, između kojih vlada napon, jer struja teče kroz srce. Izolirana podloga ništa ne pomaže.

1 - transformator, strana niskog napona; 2 - uzemljivač; 3 - izolaciona podloga.

Najviše ljudi strada prema slici 191. Ako se čovjek dotakne nekog dijela pod naponom, u prvom je redu od presudne važnosti to, na kakvoj podlozi stoji. Stojeći na dovoljno izoliranoj podlozi čovjek može bez opasnosti uhvatiti i vodič visokog napona, ali može poginuti od svega 110 V, pa i manje, ako se dotakne nekog dijela pod naponom stojeći bos ili u vlažnoj obući na zemlji (ili u kadi pri kupanju).

Pri dodiru dijela postrojenja pod niskim naponom, s kojim najčešće i imamo posla, osobito je važan otpor tijela prema protjecanju struje. Taj je otpor vrlo promjenljiv te ovisi o nizu okolnosti. On nije jednak za istosmjernu i izmjeničnu struju, a ovisi u znatnoj mjeri i o naponu. Dok on kod 220 V iznosi između ruke i noge u prosjeku oko 2500 Ω , kod 50 V on je oko 4 puta veći te iznosi oko 10 000 Ω . Taj otpor ljudskog tijela sastoji se od prelaznih otpora kože na mjestima, na kojima struja ulazi u tijelo i izlazi iz njega, te od otpora samog tijela. Otpor samog tijela vrlo je malen tako, da navedeni otpor od 2500 Ω kod 220 V čine uglavnom prelazni otpori kože. Ti su otpori osobito mali, ako su ruke i noge vlažne. Osim toga prelazni otpor je to manji što je koža na mjestu dodira nježnija, što je dodir na većoj površini te što je čvršći. Uz male prelazne otpore otpor tijela može iznositi i manje od 100 Ω . Osobito

je opasan takav dodir, gdje se rukom obuhvata neki dio pod naponom, jer se tada zbog grča mišićja ruka ne može osloboditi, dok god se strujni krug ne prekine.

Iz svega, što je rečeno, proizlazi:

1. Nije napon opasan za čovjeka, već struja.
2. Ipak, budući da viši napon izaziva jaču struju, opasnost je uz iste okolnosti to veća, što je napon viši.
3. Opasnost je to veća, što je bolje vodljiva podloga, na kojoj čovjek stoji.
4. Opasnost je to veća, što čovjek ima vlažnije ruke i što je dodir dijela pod naponom na većoj površini, a najveća, ako se dio pod naponom rukom obuhvati.

Ako je napon niži od kojih 50 V, ne može više ni pod najnepovoljnijim okolnostima protjerati kroz tijelo struju, koja bi bila opasna po život. Stoga elektrotehnički propisi traže, da se upotrebi napon od najviše 42 V kod takvih elektrotehničkih naprava, gdje bi kod kvara na izolaciji lako moglo doći do nesreće zbog izvanredno nepovoljnih okolnosti (na pr. kod radova s električnim alatom u čeličnim cilindrima parnih kotlova).

Izmjenična struja frekvencije 50 Hz znatno je opasnija od istosmjerne struje. Međutim, izmjenične struje vrlo visoke frekvencije, na pr. dijatermijske struje (za liječenje) od 500 000 Hz, nisu uopće opasne, dok ne prijeđu izvjesnu granicu.

12.2 DJELOVANJE STRUJE RAZNIH JAKOSTI

Već su i vrlo male struje opasne za čovjeka. Struja od kojih 10 mA (mili-ampera) već izaziva grč mišićja, a kod kojih 25 mA grč je već toliki, da se obuhvaćeni vodič ne može ispustiti. Struja do 25 mA obično još nije opasna po život, no ako se čovjek zbog grča ne može osloboditi dodira vodiča pod naponom, može već i takva struja nakon nekoliko minuta izazvati smrt.

Što je jača struja, to je kraće vrijeme potrebno, da njezin učinak bude smrtonosan. Struje od kojih 75 mA pa do kojih 4 A izazivaju već i za 1 sekundu, a ponekad i za znatno kraće vrijeme treperenje srčanih klijetki, koje uvijek uzrokuje smrt. Treperenje srčanih klijetki je nepravilno, vrlo brzo grčenje srca, koje — kad jednom do njega dođe — ne prestaje tako dugo, dok čovjek ne umre, a to bude za nekih 3 do 10 minuta. Budući da pritom dolazi do trenutne nesvjestice i grča organa za disanje, čini se, kao da je smrt trenutna.

Očekivali bismo, da će i iznad 4 A smrt biti to sigurnija, što je struja jača. Začudo tome nije tako. Struje iznad 4 A, ako kroz tijelo ne teku dulje od nekoliko sekundi, u pravilu ne izazivaju treperenje srčanih klijetki, pa prema tome ni momentanu smrt. One doduše začas posve zakoče srce, a kad struja prestane, srce još dulje ili kraće vrijeme nepravilno radi, ali — čovjek obično ne umre. Tako jake struje razvijaju međutim veliku toplinu, pa nastaju teške opekline, koje mogu biti i tako teške, da prouzroče smrt.

Evo zašto mnogi ostaju živi, i kad se dotaknu vodiča visokog napona (na pr. od 10 000 ili čak od 35 000 V), a stajali su na dobro vodljivoj podlozi. Vrlo jaka struja opekla ih je, ali nije ubila. Naprotiv, niski napon od 220 ili 110 V može biti osobito opasan, ako čovjek stoji na dobro vodljivoj podlozi. Napon od 220 V izaziva tada kroz otpor tijela od 1000 do 2500 Ω smrtonosne struje od 88 do 220 mA (jer i ovdje, kao i uvijek, vrijedi pravilo: struja = $\frac{\text{napon}}{\text{otpor}}$).

Treperenje srčanih klijetki znači sigurnu smrt, jer danas još nema načina, kako bi se ono na mjestu nesreće zaustavilo i na taj način spasilo unesrećenoga. Umjetno disanje tu ne pomaže ništa. Ipak *umjetno disanje treba svakako uvijek primijeniti, kad unesrećeni ne diše*, jer se ne može znati, da li je do treperjenja srčanih klijetki došlo ili ne. Mnogo je ljudi spašeno umjetnim disanjem.

12.3. PRVA POMOĆ

Ako je netko unesrećen od struje, pa je još uvijek u vezi s vodom pod naponom, postupaj ovako:

1. *Isklupi vod! Dok vod nije isklopljen, nikako ne dodiruj unesrećenoga golom rukom*, jer ćeš sam stradati. Ako vod ne možeš isklopiti, onda kod postrojenja niskog napona postupaj ovako:

a) *Izoliraj se od tla* pomoću nekoliko suhих dasaka, drvenih sanduka ili sličnog.

b) *Ukloni vod od unesrećenoga* dugom, suhom drvenom motkom, suhim ljestvama ili sličnim. Ne uspije li to, tada

c) *izoliraj ruke* omotavši ih nekoliko puta suhim komadima odjeće, pa stojeći na daskama ili sličnom, povuci unesrećenoga za odjeću i odvući ga od dodira s vodom.

Kod postrojenja visokog napona ne dodiruj ni u kojem slučaju unesrećenoga, ako je on u vezi s postrojenjem pod naponom sve dotle, dok je ono pod naponom.

2. Reci nekome, neka odmah *pozove liječnika* i neka obavijesti pogonsku službu poduzeća, koje upravlja vodom.

3. Ako unesrećeni ne diše, *smjesta, ne gubeći ni časka vremena, na licu mjesta započni umjetno disanje*. Položi unesrećenog potrbuške, među zube mu stavi neki tupi predmet (na pr. komad drveta, olovku), a ruke mu stavi pod bradu. Klekni uz glavu unesrećenoga, okrenut prema njemu. Stavi mu svoje ruke na leđa tako, da ti se palci dodiruju, a prsti su ti iza pazuha. Polako se, ispruženih ruku, naginji prema naprijed prenoseći svoju težinu na unesrećenoga, sve dok ti ruke nisu okomite. Nagni se natrag, prihvati ruke unesrećenoga ispod laktova te ih polako diži, sve dok ne osjetiš otpor i naprezanje u njegovim ramenima. Sad opet započni kretanju pritiskivanja i t. d. Kretanja pritiskivanja i kretanja dizanja neka traju približno jednako vrijeme, i to tako, da se cijeli postupak ponavlja jednolično oko 12 puta u minuti, po potrebi satima, sve do dolaska liječnika. Brže kretanje su štetne i nepotrebno umaraju.

4. *Započne li unesrećeni disati, prekini umjetno disanje*, polij mu lice i grudi hladnom vodom te ih snažno istrljaj. Ako se unesrećeni oporavi, pokrij ga te mu žličicom ulijevaj u usta toplo piće, ako može gutati. Ne daj mu, da sjedne ili ustane.

5. Sve ostalo prepusti liječniku.

13. ELEKTRIČNA RASVJETA

13.1. OPĆENITO O SVJETLOSTI

Fizika nas uči, da je svjetlost elektromagnetsko titranje, koje se po prostoru širi fantastičnom, nepredstavljivom brzinom od 300 000 kilometara u sekundi.

Od ostalih elektromagnetskih titranja svjetlost se razlikuje po duljini vala. I toplinske, ultraljubičaste, rentgenske i kozmičke zrake i radiovalovi također su elektromagnetska titranja. Svjetlost je takvo elektromagnetsko titranje, kojemu duljina vala iznosi 0,4 do 0,8 μ (mikrona; 1 mikron = hiljaditi dio milimetra). Ljudsko je naime oko tako građeno, da zamjećuje elektromagnetska titranja samo ove valne duljine. Svjetlost neke određene valne duljine pobuđuje u nama osjet određene boje. Na pr. svjetlost valne duljine 0,4 μ vidimo kao svjetlost ljubičaste boje, pri 0,45 μ vidimo plavu boju, pri 0,5 μ zelenu, pri 0,55 μ žutu, a pri 0,7 do 0,8 μ vidimo crvenu boju. Svjetlost, koja u nama pobuđuje osjet bijele boje, mješavina je svjetlosti različitih valnih duljina.

Svjetlost nastaje uglavnom na dva načina: temperaturnim isijavanjem i luminescencijom.

Poznato je, da svaka tvar isijava svjetlost, ako je ugrijemo iznad neke temperature. Takvo se isijavanje naziva temperaturno isijavanje, a ono je to jače, što je viša temperatura, na koju je ugrijano tijelo, koje isijava. Osim toga, što je viša temperatura, to je proizvedena svjetlost sličnija bijeloj svjetlosti (a pri vrlo visokim temperaturama isijavana svjetlost prelazi u plavičastu). Gotovo svi izvori svjetlosti, od sunca do električne žarulje i stearinske svijeće, jesu temperaturna sijala, t. j. proizvode svjetlost pri visokoj temperaturi.

Pri prolazu električne struje kroz plinove i pare svjetlost može nastati i pri sasvim niskoj temperaturi (»hladna svjetlost«). Takvo isijavanje svjetlosti naziva se luminescencija, a nastaje i iz drugih uzroka. Zbog luminescencije svijetli i krijesnica. Boja svjetlosti pri luminescenciji nije ovisna o temperaturi. I pri niskoj temperaturi može se postići svjetlost bjelja od danje (sunčane) svjetlosti.

Naše oči nisu jednako osjetljive za sve boje. One su dosta slabo osjetljive za crvenu i ljubičastu, a najosjetljivije za zelenu boju. No jednobojna svjetlost nije ugodna za naše oči, koje su navikle na približno bijelu boju danje svjetlosti. Stoga se pri rasvjeti za rad uvijek teži, da se boja svjetlosti ne razlikuje suviše od danje svjetlosti.

13.2. JAKOST SVJETLOSTI, SVJETLOSNI TOK, KOLIČINA SVJETLOSTI

Ima jačih i slabijih izvora svjetlosti, jačih i slabijih sijalica. Kažemo, da je neka sijalica to jača, što je jača svjetlost, koju ona daje. Da možemo međusobno uspoređivati svjetlost pojedinih izvora svjetlosti, mora postojati jedinica za jakost svjetlosti. Prije su se kao jedinice za jakost svjetlosti upotrebljavale Hefnerova svijeća (oznaka HS) i internacionalna svijeća (oznaka IS), ali je Međunarodni komitet za mjere i utege odlučio, da se sa 1. I. 1948. uvede nova jedinica za jakost svjetlosti. Ta je nova jedinica nazvana kandela ili nova svijeća, oznaka c^* .

Između nove jedinice za jakost svjetlosti, kandeles, i prijašnjih jedinica postoji približan odnos:

$$1 c \approx 0,98 IS \approx 1,09 HS; \quad 1 IS \approx 1,11 HS.$$

Jakost svjetlosti $1 c$ jednaka je $1/60$ one jakosti svjetlosti, koju isijava 1 cm^2 površine idealnog sijala (takožvanog apsolutno crnog tijela) pri temperaturi tališta platine (2317°C).

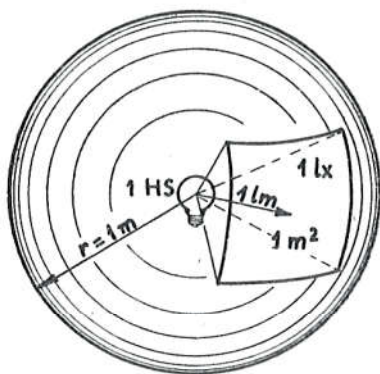
Prijašnja jedinica Hefnerova svijeća bila je određena kao ona jakost svjetlosti, koju kod točno određenih prilika isijava u horizontalnom smjeru svjetiljka načinjena na točno određeni način.

Za prosuđivanje izvora svjetlosti važno je ne samo, kolika je jakost svjetlosti, koju on isijava u nekom smjeru, već i kolika je količina svjetlosti,

koju on ukupno isijava u svakoj sekundi. Ta ukupna količina svjetlosti, koju isijava neki izvor svjetlosti u jednoj sekundi, naziva se *svjetlosni tok* izvora svjetlosti. Jedinica za svjetlosni tok je *lumen***, oznaka lm .

* Oznaka c dolazi odatle, što se kandela francuski piše *candela*.

** Lumen je latinska riječ, a znači svijetlo.



Sl. 193. Ako izvor svjetlosti, koji u svim smjerovima isijava svjetlost jakosti $1 c$, smjestimo u središte šuplje kugle polumjera 1 m , isijavat će on na svaki m^2 kugline površine svjetlosni tok 1 lm .

Između jedinice za jakost svjetlosti, kandeleg, i jedinice za svjetlosni tok, lumena, postoji točno određena veza. Stavimo sijalicu, koja u svim smjerovima isijava jednako jaku svjetlost 1 c u šuplju kuglu polumjera 1 m (slika 193.). Takva će sijalica na svaki kvadratni metar kugline ploštine isijavati svjetlosni tok 1 lm. Na taj je način određena jedinica 1 lm. Budući da kugla polumjera 1 m ima ploštinu 12,57 m², ukupni svjetlosni tok, što će ga takva sijalica isijavati, iznosi 12,57 lm.

Osim lumena upotrebljava se i 10 puta veća jedinica *dekalumen*, oznaka dlm; 1 dlm = 10 lm.

Jedinica lumen, kako smo je ovdje odredili, zapravo je novi lumen. On se od internacionalnog lumena i Hefnerova lumena razlikuje upravo toliko, koliko se kandela razlikuje od internacionalne svijeće i Hefnerove svijeće.

Danas se izvori svjetlosti prosuđuju po svjetlosnom toku, koji ukupno isijavaju, a ne toliko po jakosti svjetlosti, koju isijavaju u nekom smjeru. Ponekad se izvori svjetlosti označuju i svijećama. Na pr. izvor svjetlosti od 1 c je takav izvor svjetlosti, kod kojega je srednja jakost u svim smjerovima isijavane svjetlosti 1 c. Takav izvor svjetlosti isijava jednaki svjetlosni tok kao onaj izvor svjetlosti, koji bi u svim smjerovima prostora jednoliko isijavao svjetlost jakosti 1 c. Kao što smo prije pokazali kod primjera sa šupljom kuglom, takav izvor svjetlosti isijava svjetlosni tok 12,57 lm = 1,26 dlm. Prema tome, ako negdje pročitamo, da neki izvor svjetlosti na primjer »ima 20 svijeća«, onda to znači, da taj izvor svjetlosti isijava svjetlosni tok $1,26 \cdot 20 = 25,2$ dlm.

Ako je neki izvor svjetlosti isijavao na pr. 1000 lm za vrijeme od 10 sati, kažemo, da je on dao *količinu svjetlosti* $1000 \cdot 10 = 10\,000$ lumensati (oznaka lmh). Općenito, količina svjetlosti je energija, koju u neko vrijeme isijava izvor svjetlosti, a naše je oči osjećaju kao svjetlost. Jedinica za količinu svjetlosti jest lumensat.

13.3. SVJETLOSNO ISKORIŠĆENJE

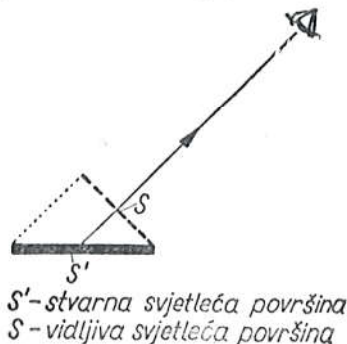
Obično se danas električne sijalice označuju brojem vata, koji uzimaju iz mreže, a ne brojem lumena, koje daju. No sve električne sijalice ne daju ni približno jednaki broj lumena po vatu električne snage, koju uzimaju iz mreže. Dok na pr. nova obična žarulja od 100 W za 220 V daje oko 1150 lm, dvostruko spiralizirana takva žarulja daje već oko 1250 lm. Nova obična žarulja od 100 W za 220 V daje prema tome oko 11,5 lumena po vatu (lm/W), a dvostruko spiralizirana oko 12,5 lm/W. Živina sijalica daje oko 35 lm/W, fluorescentna cijev oko 40 lm/W, a natrijeva sijalica čak oko 60 lm/W.

Broj lumena po vatu, što ga daje neki izvor svjetlosti, naziva se njegovo *svjetlosno iskorišćenje*. Ono je osnovni podatak za ekonomičnost izvora svjetlosti. Što je svjetlosno iskorišćenje veće, izvor svjetlosti je ekonomičniji.

13.4. SJAJ IZVORA SVJETLOSTI

Neugodno je gledati u golu, nezaklonjenu žarulju, pa makar je i slaba. Ona blješti, zaslijepljuje nas. Stavimo li dvaput jaču žarulju u balon od opalnog stakla, dobit ćemo više svijetla bez blještenja. Zašto? Zato, što u prvom slučaju svjetlost isijava samo sitna površina usijane niti u žarulji, a u drugom slučaju svjetlost kao da isijava cijeli stakleni balon, kojega je površina raz-

mjerno velika. Kažemo, da je *sjaj izvora svjetlosti* u prvom slučaju velik, a u drugom malen. Sjaj sunca je tako velik, da u nj uopće ne možemo gledati.



Sl. 194. Za sjaj izvora svjetlosti važna je vidljiva svjetleća površina.

Sjaj je određen omjerom jakosti svjetlosti i vidljive površine, koja tu svjetlost isijava.

Označimo li jakost svjetlosti u nekom smjeru sa I , a svijetleću površinu vidljivu iz tog smjera sa S , (slika 194.), tada je sjaj:

$$B = \frac{I}{S} \left(= \frac{\text{kandele}}{\text{cm}^2} \right) \text{ stilba (oznaka sb)}$$

Jedinica za sjaj je stilb. Sjaj 1 sb ima onaj izvor svjetlosti, koji po kvadratnom centimetru vidljive površine isijava jakost svjetlosti 1 c.

46. primjer. Žarulja u balonu od opalnog stakla isijava u nekom smjeru 250 c. Koliki je sjaj te svjetiljke u tom smjeru, ako je promjer balona 35 cm?

Rješenje: Za sjaj nije važno, kolika je ukupna površina balona. Vidljiva svijetleća površina je krug promjera 35 cm, t. j. površine:

$$S = \frac{d^2 \pi}{4} = \frac{35^2 \pi}{4} = 960 \text{ cm}^2.$$

Sjaj je prema tome:

$$B = \frac{I}{S} = \frac{250}{960} = 0,26 \text{ sb.}$$

(Sjaj gole žarulje iznosi oko 150 sb.)

13.5. RAZVOJ I VRSTE IZVORA SVJETLOSTI

Izvora svjetlosti ima prirodnih i umjetnih. Najvažniji prirodni izvor svjetlosti je sunce. Umjetni izvori svjetlosti su oni, koje proizvode ljudi, da svijetle onda, kad sunčane rasvjete nema ili je slaba, kao i tamo, gdje ona ne dopire ili dopire nedovoljno.

Nekad, davno, ljudi su upotrebljavali kao izvor svjetlosti luč. U toku stoljeća iznalazili su sve savršenije izvore svjetlosti. No dugo, vrlo dugo ti su izvori svjetlosti bili primitivni. Davali su slabo, titravo svijetlo i širili su smrad. Početkom 19. vijeka već su izumljeni bolji izvori svjetlosti. U poredbi s našim današnjim električnim sijalicama i ti su izvori svjetlosti bili nezgrapni, loši i neekonomični.

Prvi električni izvor svjetlosti bila je lučnica (lučna sijalica). Izumio ju je Englez Davy (čitaj: Devi) početkom prošloga vijeka. No ta je lučna sijalica imala suviše mana, a da bi se bila mogla upotrebiti za praktičnu rasvjetu. Osim toga tada još nije bilo ni električnih generatora. Izvori struje bili su jedino galvanski elementi, a iz njih se moglo dobiti tek malo električne energije. Praktički se električna rasvjeta počela upotrebljavati tek iza god. 1876., kad je Jabločkov izumio prvu praktički upotrebljivu lučnicu, koja je bila ujedno i prvi praktički upotrebljivi električni izvor svjetlosti uopće. Pravi zamah dobila je električna rasvjeta malo kasnije, iza god. 1879., kad je Edison izumio svoju električnu žarulju s ugljenom niti.*

* Još prije Edisona izumio je praktički upotrebljivu sijalicu Rus Lodygin, koja se je u ograničenoj mjeri i upotrebljavala.

Električne izvore svjetlosti nazivamo općenito električne sijalice. Danas razlikujemo uglavnom ove vrste sijalica:

a) žarulje, koje se općenito upotrebljavaju za umjetnu rasvjetu, pa i u druge svrhe;

b) fluorescentne sijalice, koje se sve više upotrebljavaju za rasvjetu umjesto žarulja;

c) svjetlosne cijevi, koje se upotrebljavaju za reklamnu i ukrasnu rasvjetu;

d) živine i natrijeve sijalice (sijalice s metalnom parom), koje se upotrebljavaju za javnu rasvjetu, za rasvjetu velikih radionica i uopće velikih površina te za reflektore;

e) tinjalice, koje se upotrebljavaju ponajviše u signalne svrhe;

f) lučnice s ugljenim elektrodama, koje se danas upotrebljavaju uglavnom samo za reflektore, projekcione svjetiljke i slično.

13.6. ŽARULJE

Žarulje su i danas još najvažniji izvori svjetlosti. Do konca prošloga vijeka izrađivala se je njihova žarna nit od ugljena, kasnije su se upotrebljavali metalni osmij i tantal, a danas se žarne niti izrađuju gotovo samo od volframa*. Žarulje s ugljenom niti upotrebljavaju se danas vrlo rijetko, i to samo za specijalne svrhe. Pokazalo se, da je svjetlosno iskorišćenje žarulja to veće, što je temperatura žarne niti viša. A najviša se temperatura žarne niti može postići baš upotrebom niti od volframa, koji ima vrlo visoko talište (3380°C). Pritom je vrlo važno i to, da odvod topline bude što manji. Da se odvod topline smanji, ne upotrebljava se danas više ravna žarna nit, već se ona spiralizira (t. j. savije u spiralu) ili čak dvostruko spiralizira prema slici 195.



Sl. 195. Dvostruko spiralizirana nit.

Žarna nit žarulje vrlo je tanka. Kad svijetli, ona je usijana na vrlo visoku temperaturu. Zbog toga se pomalo pretvara u metalnu prašinu, koja se taloži na staklenom balonu sijalice. Staklo žarulje postaje od tog metalnog taloga crnkasto, a nit se stanjuje, dok na nekom mjestu ne postane tako tanka, da »pregori«. Pokazalo se, da se ovo »isprašavanje« niti može znatno smanjiti, ako žarulja nije zrakoprazna, već ispunjena kemijski neutralnim plinom. Stoga se žarulje danas redovito pune plinom argonom ili dušikom (rjeđe kriptonom). Žarna nit žarulja punjenih plinom smije se usijati na znatno višu temperaturu nego žarna nit zrakopraznih žarulja. Zbog ove visoke temperature (do 3000°C) svjetlosno iskorišćenje žarulja punjenih plinom veće je nego kod zrakopraznih.

* Prvi je upotrebljivu žarulju s volframovom niti izradio Hrvat Hanaman.

Svjetlosno iskorišćenje žarulja je to veće, što je žarulja jača, kako pokazuje ova tablica:

Svjetlosni tok i svjetlosno iskorišćenje žarulja
za 220 V, domaće proizvodnje, s jednostruko spiraliziranom niti

Veličina žarulje	Svjetlosni tok	Svjetlosno iskorišćenje	Veličina žarulja	Svjetlosni tok	Svjetlosno iskorišćenje
W	lm	lm/W	W	lm	lm/W
15	120	8,0	150	1980	13,2
25	205	8,2	200	2730	13,6
40	325	8,2	300	4250	14,2
60	575	9,6	500	7500	15,0
75	780	10,4	1000	17000	17,0
100	1150	11,5	1500	27500	18,3

Kako tablica pokazuje, žarulja od 1000 W daje oko 50% više svijetla nego 10 žarulja po 100 W.

Žarulje sa dvostruko spiraliziranom niti daju 10 do 30% više svjetlosti, nego što je navedeno u ovoj tablici.

Svjetlosno iskorišćenje žarulja općenito je to veće, što je žarna nit usijana na višu temperaturu. No to brže se nit troši, pa je i trajanje žarulja kraće. Lako se mogu proizvesti vrlo dugotrajne žarulje, ali bi one bile i vrlo neekonomične, njihovo bi svjetlosno iskorišćenje bilo malo. Današnje naše žarulje tako su građene, da je njihova srednja trajnost oko 1000 sati svijetljenja. Račun pokazuje, da je takva trajnost žarulja najekonomičnija.

Žarulje su vrlo osjetljive na visinu napona. Svaka je žarulja građena za određeni napon. Ako je pogonski napon manji od onoga, za koji je žarulja građena, ona će slabije svijetliti, a i njezino svjetlosno iskorišćenje bit će manje. Ako je napon viši, žarulja će doduše dobro svijetliti, ali će brzo pregorjeti. Ako je napon samo 5% prenizak, žarulja će davati oko 14% manje svijetla, a svjetlosno iskorišćenje bit će oko 8% manje. Ako je napon samo 5% previsok, trajnost žarulje se smanjuje na polovinu.

13.7. FLUORESCENTNE SIJALICE

Fluorescentnih sijalica u širem smislu ima različitih vrsta. U užem smislu međutim pod fluorescentnim sijalicama razumijevaju se samo fluorescentne cijevi s vrućim elektrodama. Tako ćemo postupiti i u ovoj knjizi, pa će živine fluorescentne sijalice biti prikazane pod živinim sijalicama, a fluorescentne sijalice s hladnim elektrodama pod svjetlosnim cijevima.

Fluorescentne sijalice s vrućim elektrodama dijele se na obične fluorescentne sijalice i na uske (»vitke«) fluorescentne sijalice (slimline).

Obične fluorescentne sijalice počele su se u inozemstvu upotrebljavati 1938. godine, a kod nas su se prve pojavile tek poslije rata. Građene su prema slici 196. vrlo jednostavno. To su duge, uske staklene cijevi, u kojima se nalazi plemeniti plin pod vrlo niskim tlakom i kapljica žive. Sa svake je strane uvedena u cijev po jedna elektroda. Cijev je iznutra obložena slojem svijetleće tvari, luminofora. Taj luminofor je najvažniji dio ovih sijalica.

Evo kako radi takva fluorescentna sijalica. Shemu spoja vidimo na slici 197. Sijalica s hladnim elektrodama ne bi palila, pa se stoga najprije moraju elektrode ugrijati. Kad se sijalica priključi na napon, strujni krug je zatvoren preko upaljača: $S_1 - E_1 - U - E_2 - S_2$. Tim strujnim krugom teče struja, koja ugrije elektrode E_1 i E_2 . Nakon kratkog vremena (praktički gotovo odmah), kad su se elektrode ugrijale, upaljač prekida navedeni strujni krug. Kod pre-

kida struje nastaje zbog samoindukcije prigušnice razmjerno velik napon na stezaljkama upaljača, a time i između elektroda E_1 i E_2 . (Nešto smo slično vidjeli kod pokusa prema slici 118.) Sijalica se upali, pa je strujni krug sad zatvoren kroz sijalicu, a mimo upaljača, koji je otvoren.



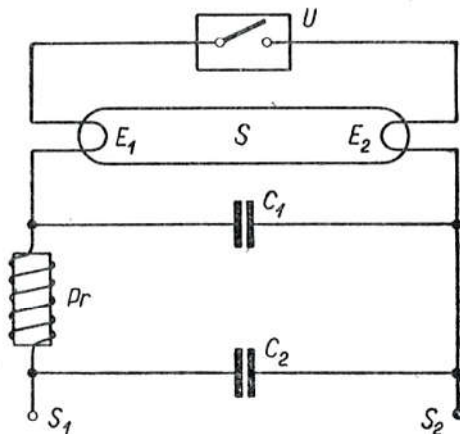
Sl. 196. Fluorescentna sijalica za 220 V je svjetlosna cijev s vrućim elektrodama obložena iznutra tankim slojem svjetleće tvari, koja nevidljivu svjetlost pretvara u vidljivu.

U takvoj sijalici nastaje razmjerno slaba zelenkasta svjetlost i mnogo ultravioletnih zraka, koje naše oči ne vide. Osnovno je sad kod fluorescentnih sijalica, da im je cijev obložena takvom tvari, koja fluorescira, t. j. svijetli vlastitom svjetlošću, kad na nju padaju ultravioletne zrake. Takve tvari, koje pretvaraju nevidljive ultravioletne zrake u vidljivu svjetlost, nazivaju se

luminofozi. Boja svjetla, koju sijalica daje, ovisi o materijalu, koji je upotrebljen kao luminofor. Mogu se postići vrlo različite boje svjetla, pa i posve bijelo svjetlo i svjetlo slično danjem.

Sve sijalice, koje iskorišćuju izbijanje u plinu ili u pari, pa tako i fluorescentne sijalice, moraju biti spojene u seriju s nekim otpornikom, koji ograničuje struju. Bez tog otpornika struja bi odmah nakon paljenja porasla toliko, da bi sijalicu začas upropastila. Takav je otpornik obično prigušnica (svitak sa čelikom) kao na slici 197., pa je $\cos \varphi$ loš (oko 0,55). Pomoću kondenzatora C_2 $\cos \varphi$ se može popraviti. Kondenzator C_1 služi za sprečavanje radio-smetnji.

Svaka sijalica s izbijanjem trne se i pali 100 puta u sekundi kod fre-



Sl. 197. Shema spoja obične fluorescentne sijalice.

S - sijalica; E_1, E_2 - elektrode; U - upaljač (starter); Pr - prigušnica; C_1 - kondenzator protiv radio-smetnji; C_2 - kondenzator za poboljšanje $\cos \varphi$; S_1, S_2 - priključne stezaljke.

kvencije 50 Hz. To su tako brze promjene svjetlosti, da ih naše oko ne primjećuje pri promatranju mirnih predmeta. No pri promatranju predmeta, koji se gibaju, primjećujemo neugodno titranje. Ta se pojava zove *stroboskopski efekt*. Toj mani možemo izbjeći tako, da se na pr. 3 sijalice priključe trofazno ili barem 2 sijalice dvofazno. Time se postizava pomak faza i u svjetlosti pojedinih sijalica, pa je ukupna svjetlost približno stalna. I kod jednofaznog priključka može se postići posve jednako izjednačenje kao i kod dvofaznog priključka, ako se po dvije fluorescentne sijalice spoje tako, da jedna ima induktivni, a druga kapacitivni predotpornik. To je dvojni ili duospoj. Tada su struje u te dvije sijalice pomaknute u fazi, kao da su priključene na dva različita fazna vodiča trofaznog sistema. U tom slučaju čak ni ne treba posebni kondenzator za kompenzaciju faktora snage, jer je on kod dvojnog spoja ≈ 1 .

Fluorescentne sijalice grade se za napone 110 do 250 V te uglavnom za snagu 20 i 40 W. Najviše se upotrebljavaju sijalice od 40 W. One su duge 120 cm, a promjer im je 3,8 cm.

Prednosti ovih sijalica prema žaruljama jesu:

1. Oko 3 puta veće svjetlosno iskorišćenje (30—45 lm/W).
2. Oko 3—7 puta veća trajnost (3000 do 7000 sati svijetljenja što bitno ovisi ne samo o kvaliteti sijalice već i o broju paljenja).
3. Niska temperatura sijalice za vrijeme svijetljenja (to je ljeti znatna prednost).
4. Zbog velike površine sijalica bliještanje je manje.

Mane tih sijalica jesu:

1. Veća skupocina sijalica i armatura.
2. Potreba naročitog pribora (upaljač, prigušnica, kondenzatori).
3. Potreba naročitog spoja za rasvjetu ljudi ili predmeta u kretanju.

Obične fluorescentne sijalice ne rade dobro pri niskoj temperaturi, pa se za vanjsku rasvjetu i na mjestima izvrnutim hladnoći upotrebljavaju specijalne sijalice.

U najnovije vrijeme počele su se (najprije u Americi) upotrebljavati *uske* (*»vitke«*) fluorescentne sijalice s vrućim elektrodama. Zovu ih i *slimline** — sijalice. Dok obične fluorescentne sijalice imaju promjer 38 mm i duljinu 1200 mm (za 40 W), ove nove sijalice imaju promjer 19 mm za duljine 1060 i 1620 mm, odnosno 25 mm za duljine 1830 i 2440 mm. One se ne mogu priključiti direktno na napon mreže, već je potreban specijalan transformator, jer im napon paljenja iznosi 500 do 750 V, a napon gorenja 140 do 320 V. Upaljač nije potreban. Svjetlosno iskorišćenje im je oko 30% bolje nego kod običnih fluorescentnih sijalica te iznosi oko 50 lm/W.

Upozorenje. Luminofori su otrovni, pa treba paziti, da se čovjek ne poreže o razbijenu fluorescentnu sijalicu, jer takva rana teško cijeli.

13.8. SVJETLOSNE CIJEVI

Djelovanje svjetlosnih cijevi opisano je uglavnom već u poglavlju 11.4. To su cijevi punjene plemenitim plinom pod niskim tlakom. Za punjenje se najviše upotrebljava neon te neon sa nešto žive, pa se ove cijevi često nazivaju neonske cijevi. Cijevi punjene neonom daju crveno svjetlo, a cijevi punjene neonom i živom daju modro svjetlo. Druge se boje mogu dobiti pomoću drugih plinova (argon, helij), no najčešće se dobivaju pomoću stakla u boji ili tako, da je cijev iznutra obložena luminoforom. Ove posljednje cijevi zovu se fluorescentne svjetlosne cijevi, a mogu dati svjetlost jednake boje kao obične fluorescentne sijalice (bijelu, danju, toplo-bijelu) ili svjetlost različite boje.

Svjetlosne cijevi bez luminofora upotrebljavaju se za reklamnu (svjetlosna slova, likovi) i ukrasnu rasvjetu. Fluorescentne svjetlosne cijevi upotrebljavaju se za rasvjetu prostorija, ponajviše za dekorativnu rasvjetu. One se mogu prilagoditi makar kakvim arhitektonskim oblicima.

Često je potrebno, da svjetlosne cijevi budu dugačke po nekoliko metara. Kako su njihove elektrode hladne, a cijevi uske, potreban je napon od 300 do 1000 V po metru duljine, a za paljenje još viši napon. Prema tome im treba visoki napon pa se priključuju na mrežu preko posebnog transformatora. Obično su ti transformatori izvedeni tako, da imaju veliki induktivni otpor pa

* Slimline (čitaj: slimlajn) engleska je riječ, a znači vitka linija.

ujedno služe kao prigušnice za ograničavanje struje te nisu potrebne posebne prigušnice. Transformator neka bude što bliže svjetlosnim cijevima, kako bi skupi i opasni vodovi visokog napona bili što kraći. S naponom se obično ne ide preko 6000 V.

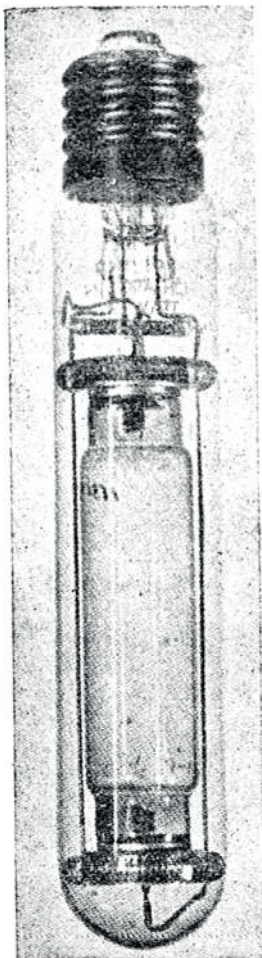
Fluorescentne svjetlosne cijevi dosta se upotrebljavaju u inozemstvu za rasvjetu prostorija, gdje se hoće postići dekorativni efekti. Njihovo svjetlosno iskorišćenje nije međutim baš veliko te iznosi oko 20 lm/W.

Trajnost svjetlosnih cijevi iznosi oko 5000 do 7000 sati, a onih bez luminafora čak i do 15 000 sati, no na kraju svojeg trajanja one daju znatno manji svjetlosni tok nego na početku.

13.9. ŽIVINE SIJALICE

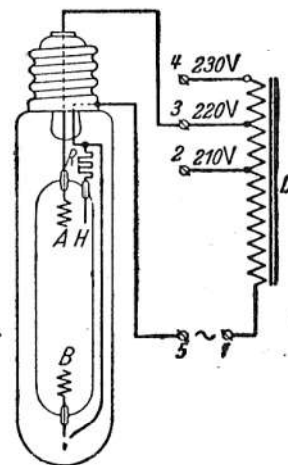
Ove se sijalice osnivaju na izbijanju u živinoj pari te iskorišćuju svjetlosno djelovanje, koje pritom nastaje. Prve živine sijalice radile su na vrlo niski tlak živine pare (oko 0,025 at), no danas se takve sijalice više ne upotrebljavaju. Danas razlikujemo ove vrste živinih sijalica:

- a) Obične živine sijalice srednjeg tlaka,
- b) obične živine sijalice visokog tlaka,
- c) živine sijalice za miješano svjetlo,
- d) fluorescentne živine sijalice,
- e) specijalne živine sijalice vrlo visokog tlaka.



← Sl. 198. Živina sijalica srednjeg tlaka.

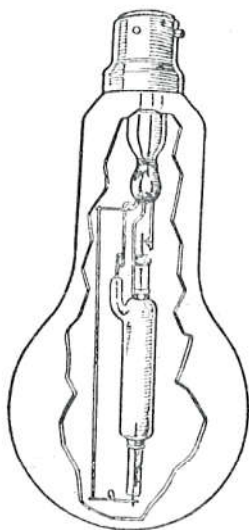
Sl. 199. Shema živine sijalice. →
A, B - glavne elektrode; H - pomoćna elektroda;
R - veliki otpor; L - prigušnica.



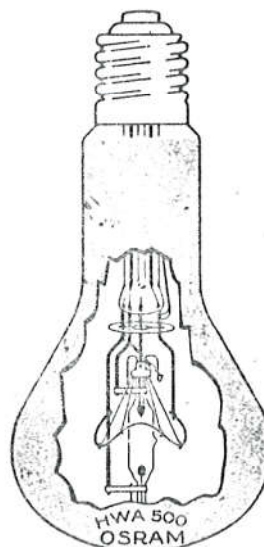
Živine sijalice srednjeg tlaka građene su prema slikama 198. i 199., a izvode se obično za snage od 400 do 1000 W. One su dugoljastog, cjevastog oblika. U cijevi, u kojoj se vrši izbijanje, nalazi se nešto plemenitog plina pod niskim tlakom i živa, koja se kasnije u pogonu ispari. Ta je cijev smještena u drugu, zrakopraznu cijev, koja služi kao toplinska izolacija. Za paljenje služi pomoćna elektroda H, s kojom je u seriju spojen otpornik velikog otpora. Kao otpornik za ograničenje struje obično se upotrebljava prigušnica (svitak s čeličnom jezgrom), kao što je to prikazano na slici 199. Prigušnica na toj slici ima 3 odvojka, na koje se sijalica spoji prema tome, koliki je raspoloživi napon mreže.

Kad se cijev priključi na napon, na pr. 220 V, nastaje najprije tinjavo izbijanje između elektrode A i pomoćne elektrode H. To izbijanje potakne izbijanje između elektroda A i B, koje se isprva vrši u plemenitom plinu. Zbog toga se izbijanja živa pomalo isparuje, tlak u cijevi raste, dok za nekih 5 min ne naraste na oko 1 at. Tek tada sijalica svijetli svojim punim sjajem. Izbijanje se sada vrši najvećim dijelom u živinoj pari.

Visokotlačne živine sijalice (slika 200.) izgledaju izvana kao obične sijalice. Izbijanje se u njima vrši u sitnoj cjevčici od kvarca, u kojoj za vrijeme rada vlada tlak od nekoliko atmosfera (oko 10). Spoj i djelovanje su inače isti kao i kod živinih sijalica srednjeg tlaka. Da bismo te sijalice mogli razlikovati od običnih žarulja, treba da grlo živine sijalice i pripadni podnožak budu obilježeni posebnom bojom ili da budu naročite konstrukcije.



Sl. 200. Visokotlačna živina sijalica.



Sl. 201. Sijalica za miješano svjetlo je kombinacija obične žarulje i visokotlačne živine sijalice.

Živinim sijalicama (kako srednjeg, tako i visokog tlaka) treba nakon paljenja nekoliko minuta, dok se potpuno ne razgore. Kad se utrnu, ne mogu se ponovo upaliti, dok se ne ohlade, a to traje 5 do 20 min. Faktor snage im je vrlo loš (0,4 do 0,6) zbog prigušnice, koja im je potrebna za pogon. Taj se cos φ obično popravljja pomoću kondenzatora. Živine sijalice srednjeg tlaka daju zelenkastobijelo svjetlo, a one visokog tlaka daju plavkastobijelo svjetlo. Pri rasvjeti takvim sijalicama ne raspoznaje se prava boja predmeta.

Neke živine sijalice ne mogu raditi u svakom položaju, pa o tome treba tražiti upute dobavljača. (U vertikalnom položaju sa grlom gore mogu raditi sve živine sijalice.)

Prednost je živinih sijalica u tome, što su one vrlo ekonomične. Svjetlosno iskorišćenje iznosi 30 do 50 lm/W, a trajnost 2000 do 4000 sati svjetljenja. Trajnost znatno ovisi o broju paljenja. Što se sijalica češće pali, to kraće traje. Mana im je, što su razmjerno skupe, što trebaju poseban pribor (prigušnica, kondenzator), što daju svjetlo neugodne boje, što se javlja stroboskopski efekt i što sporo razgaraju pri paljenju. Upotrebljavaju se stoga tamo, gdje nije važno raspoznavanje boja.

Stroboskopski efekt može se izbjeći tako, da dvije takve sijalice smjestimo jednu kraj druge i spojimo svaku na drugu fazu trofaznog sistema. Tada one u različito vrijeme trnu, pa se njihove svjetlosti dopunjavaju. Ipak, ovaj način nije osobito prikladan, jer on traži na nekom mjestu dvije živine sijalice, što je skupo, a k tome ostaje još uvijek neugodna boja svijetla.

Da se boja svijetla popravi i ublaži stroboskopski efekt, može se svijetlo živine sijalice miješati sa svjetlom žarulje. Takvo se svijetlo naziva *miješano svijetlo*. U specijalno za to konstruiranu svjetiljku stavljaju se jedna živina sijalica i jedna žarulja. Kod rasvjete ulica i prometnih putova dodatna žarulja treba da daje otprilike $\frac{1}{3}$ onog svjetlosnog toka, što daje živina sijalica, a kod rasvjete radionica $\frac{1}{2}$. Kod takve rasvjete, kod koje želimo postići što bolju boju svijetla, treba dodatna žarulja davati otprilike isto toliki svjetlosni tok kao živina sijalica. Budući da je svjetlosno iskorišćenje žarulja znatno manje, uzimat će takva žarulja iz mreže znatno više vata od živine sijalice.

Najjednostavnije se međutim miješano svijetlo postizava *sijalicama za miješano svijetlo* (slika 201.). To su visokotlačne živine sijalice, kod kojih je u stakleni balon ugrađena nit žarulje, koja je spojena sa živinom sijalicom u seriju, pa služi odmah i kao otpornik za umirenje umjesto prigušnice. Od ukupnog svjetlosnog toka, što ga daje takva sijalica, otprilike polovina potječe od cjevčice sa živinom parom, a polovina od užarene niti. Takve sijalice daju oko 20% više svijetla od žarulje s dvostruko spiraliziranom niti, boja svijetla im je odlična, stroboskopski efekt malen, faktor snage skoro 1, ne trebaju pribora, a pale odmah. Dakako, skuplje su od običnih žarulja.

Fluorescentne živine sijalice jesu visokotlačne živine sijalice, koje se od običnih živinih sijalica razlikuju time, što im je vanjska, vakuumska cijev obložena luminoforom. Na ovaj način mogu se postići razne boje svijetla (kao danja, topla i t. d.), slično kao kod običnih fluorescentnih sijalica. Svjetlosno iskorišćenje ovih sijalica iznosi oko 5% manje nego kod običnih živinih sijalica, a trajnost im je jednaka kao kod njih. Obično su građene tako, da mogu gorjeti u svakom položaju. U pogledu paljenja, stroboskopskog efekta i faktora snage vrijedi za njih sve ono, što je rečeno za obične visokotlačne živine sijalice.

Posljednjih nekoliko godina konstruirane su živine sijalice vrlo visokog tlaka (50 do 120 at), koje se obično grade za snage iznad 1000 W. Njihov se sjaj približava sjaju sunca, a upotrebljavaju se za specijalne svrhe.

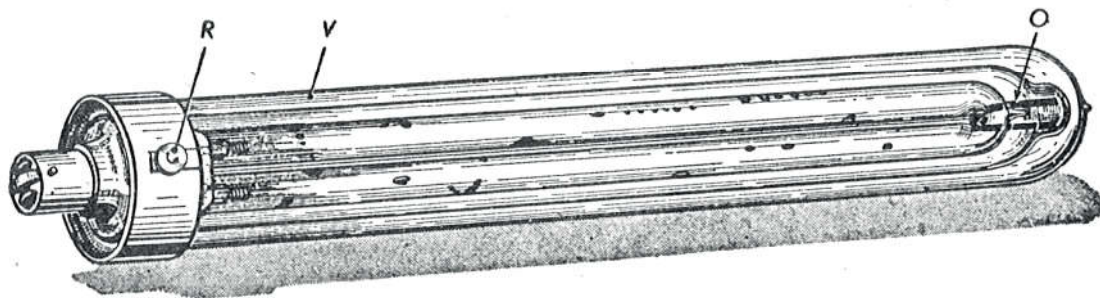
13.10. NATRIJEVE SIJALICE

Osnivaju se na istom principu kao i živine sijalice, samo u unutrašnjosti cijevi umjesto žive imaju natrij. Kad sijalica nije u pogonu, natrij se slegne u obliku sitne prašine na unutarnju stranu cijevi. Kad se sijalica upali, natrij se za nekoliko minuta ispari, pa sijalica svijetli zbog izbijanja u natrijevoj pari. Sijalica postigne svoje potpuno svijetlo tek nakon 8 do 20 min, ali za razliku od živine sijalice pali i onda, kad je vruća, t. j. neposredno nakon toga, što smo je utrnuli.

Kao i kod živinih sijalica cijev, u kojoj se vrši izbijanje, smještena je u zrakoprazni stakleni balon. Da se poveća svjetlosni učin sijalice, koji je to veći, što je cijev dulja, savija se cijev u obliku slova U, kao što je to prikazano na slikama 202. i 203.

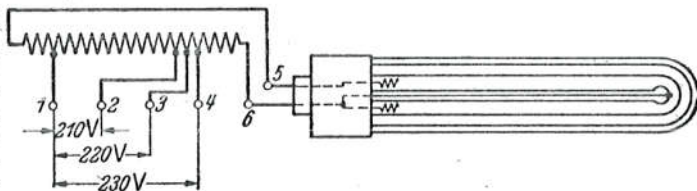
Svjetlosno iskorišćenje natrijevih sijalica još je veće nego kod živinih. Ono iznosi 40 do preko 60 lumena po vatu, uključivši gubitke u prigušnici. Boja svijetla je međutim jednobojna, žuta, pa se stoga natrijeve sijalice mogu

upotrebljavati samo tamo, gdje takva boja ne smeta (rasvjeta autoputova, pristaništa, aerodroma, kolenoloma, zemljanih radilišta, tvorničkih dvorišta, nekih industrijskih radionica i dr.).



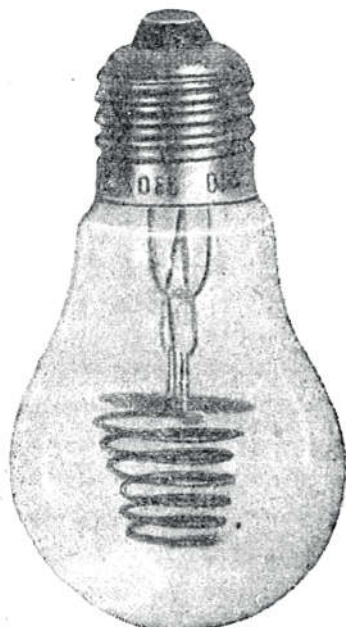
Sl. 202. Natrijeva sijalica.

Kao i živine sijalice i one su punjene plemenitim plinom (neonom) za početno paljenje. Također pokazuju stroboskopski efekt. Faktor snage ($\cos \varphi$) još im je lošiji nego kod živinih sijalica i on iznosi svega 0,20 do 0,35, zbog čega je važno, da se popravlja pomoću kondenzatora. Osnovni položaj natrijevih sijalica je horizontalan; samo neke mogu raditi i u kosom ili vertikalnom položaju, ali uvijek tako, da im grlo bude gore. Ako se natrijeva sijalica razbije, pa natrij dođe u dodir s vlagom, razvije se toplina, koja može izazvati požar. Na to treba osobito paziti prilikom transporta i rukovanja sa starim sijalicama. Trajnost natrijevih sijalica iznosi 3000 do 4000 sati svijetljenja.



Sl. 203. Shema natrijeve sijalice.

13.11. TINJALICE



Sl. 204. Tinjalica.

I tinjalice iskorišćuju svjetlosno djelovanje, koje nastaje kod izbijanja u plinu. Građene su na vrlo različite načine, a jednu izvedbu oblika obične žarulje pokazuje sl. 204. Elektrode su savijene u obliku spirale. Između te dvije spirale nema metalnog spoja. Tinjalice su punjene neonom ili smjesom plemenitih plinova. Kod priključka na napon nastaje izbijanje između elektroda, pa takva sijalica daje slabo tinjavo svjetlo. Po tom tinjavom svjetlu te su sijalice i prozване tinjalicama. Kao i sve druge sijalice, koje se osnivaju na pojavi izbijanja u plinu, i tinjalice trebaju serijski otpornik za ograničenje struje. Taj se otpornik kod tinjalica ugrađuje u njihov podnožak, pa se tinjalica može uvijčati u obično grlo kao i žarulja.

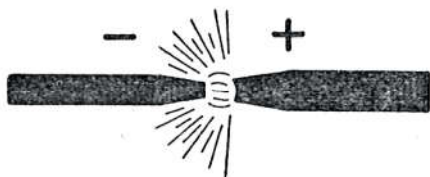
Kod 220 V tinjalice troše 0,25 do 4 vata po lumeni. Za razliku od svih ostalih sijalica one troše to više vata po lumeni, što su veće (zbog serijskog

otpora). One prema tome nisu ekonomične, ali imaju najmanji potrošak od svih električnih sijalica. Upotrebljavaju se stoga tamo, gdje ne trebamo mnogo svjetla, a stalo nam je, da potrošak bude što manji: na pr. za signalne svjetiljke, za rasvjetu za nuždu, za sasvim slabu noćnu rasvjetu i sl. Budući da one iskorišćuju takozvano katodno tinjanje, svjetlom je prevučena samo katoda. Stoga se tinjalice (građene posebno u tu svrhu) mnogo upotrebljavaju kao pokazivala polarnosti u postrojenjima istosmjerne struje. Kod izmjenične struje katoda je čas jedna, čas druga elektroda, pa svijetle obje elektrode.

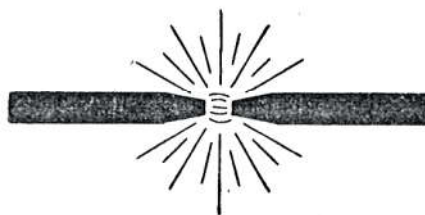
13.12. LUČNICE

Lučnice su najstariji električni izvori svjetlosti. Prva lučnica izumljena je god. 1821., ali su se praktički počele upotrebljavati tek pošto je Jabločkov 1876. god. načinio prvu praktički upotrebljivu lučnicu. Uskoro su ih žarulje počele istiskivati iz upotrebe, ali su se lučnice ipak dosta dugo upotrebljavale, osobito za javnu rasvjetu. Danas se lučnice upotrebljavaju još samo izuzetno (na pr. za projekzione svjetiljke i reflektore), ali će — po svemu se čini — uskoro posve nestati iz upotrebe.

Kod lučnica svjetlost nastaje zbog električnog luka između ugljenih elektroda. Kod lučnica za istosmjernu struju najveći dio svjetla (80 do 85%) daje pozitivna elektroda. Ona se i jače troši, pa se proizvodi znatno debljom od negativne (slika 205.a). Kod lučnica za izmje-



Sl. 205.a. Kod lučnica za istosmjernu struju najviše svjetla daje pozitivna elektroda. Ona se brže troši, pa se izrađuje debljom.



Sl. 205.b. Kod lučnica za izmjeničnu struju obje elektrode daju jednako svjetlo. Obje su jednako debele.

ničnu struju obje su elektrode jednako debele (slika 205.b), jer je svaka elektroda čas pozitivna, čas negativna. Da se dobije bolje svjetlo, obično se danas ugljenu elektroda dodaju razne primjese. Kod lučnica za istosmjernu struju, može se negativna elektroda prevući bakrom.

Lučnice za izmjeničnu struju normalno se ne upotrebljavaju za projekzione svjetiljke, jer luk ne gori tako jednoliko kao pri istosmjernoj struji, već je nemiran.

Električni luk nije drugo nego izbijanje u zraku. Stoga je i kod lučnica potreban serijski otpornik, koji treba da bude takav, da lučnica dobije napon od kojih 35 do 45 V.

Kad lučnica svijetli, elektrode se troše, pa bi se njihov razmak povećavao. Time bi se karakteristike lučnice u pogonu mijenjale, a nakon nekog vremena ona bi utrnula. Da se to ne desi, svaka lučnica mora imati uređaj za reguliranje razmaka između elektroda. Obično se regulacija vrši automatski, ali manje lučnice imaju i danas još ponekad ručnu regulaciju.

13.13. OSVIJETLJENOST (JAKOST RASVJETE)

Osvijetljenost (jakost rasvjete) neke plohe to je jača, što veći svjetlosni tok pada na jedinicu površine te plohe. Jedinica osvjetljenosti je *luks** (oznaka lx). S jednim luksom osvjetljena je neka ploha, ako na svaki kvadratni metar njezine površine pada svjetlosni tok 1 lm. Prema tome je

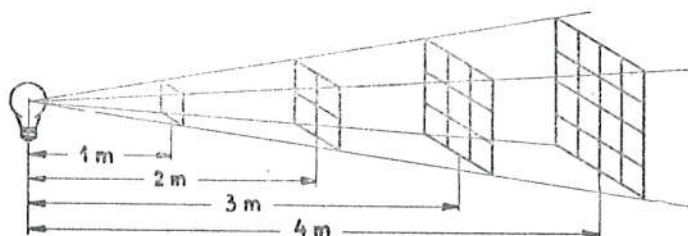
$$\text{luks} = \text{lumen/m}^2$$

Obilježimo li svjetlosni tok sa Φ (lumena), jakost rasvjete sa E (luksa), a površinu osvjetljene plohe sa S (m^2), vrijedi odnos:

$$E = \frac{\Phi}{S} \quad \text{odnosno} \quad \Phi = ES$$

Stavimo li prema slici 193. u središte šuplje kugle izvor svjetlosti, koji u svim smjerovima jednoliko isijava svjetlost jakosti 1 c. tada taj izvor svjetlosti na svaki m^2 površine šuplje kugle isijava svjetlosni tok 1 lm (vidi 13.2). Šuplja kugla bit će dakle tada osvjetljena sa 1 lx.

Što je ploha dalje od izvora svjetlosti, to je slabije osvjetljena. No ako je udaljenost od plohe do izvora dvaput veća, nije osvjetljenost na njoj samo dvaput, već $2 \cdot 2 = 2^2 = 4$ puta manja; ako je udaljenost tripot veća, osvjetljenost je $3 \cdot 3 = 3^2 = 9$ puta manja, ako je udaljenost 4 puta veća, osvjetljenost je $4 \cdot 4 = 4^2 = 16$ puta manja i t. d. *Prema tome osvjetljenost opada s kvadratom udaljenosti od izvora svjetlosti.* To se najbolje vidi nepo-



Sl. 206. Osvjetljenost opada s kvadratom udaljenosti od izvora svjetlosti.

sredno iz slike 206. Onaj isti svjetlosni tok, koji u udaljenosti 1 m pada na neki kvadrat, pada u udaljenosti 4 m na 16 takvih kvadrata, dakle na 16 puta veću površinu. Na kvadrat u udaljenosti 4 m pada tek šesnaesti dio onog svjetlosnog toka, koji pada na jednaki takav kvadrat u udaljenosti 1 m. Prema tome će osvjetljenost biti 16 puta manja.

Osvjetljenost u bilokoj udaljenosti od izvora svjetlosti može se izračunati i po formuli

$$E = \frac{I}{a^2},$$

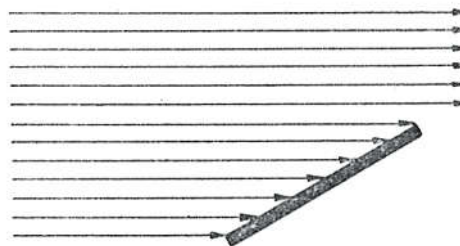
gdje je E — osvjetljenost (u luksima), I — jakost svjetlosti izvora svjetlosti u dotičnom smjeru (u kandelama), a — udaljenost od izvora svjetlosti (u metrima).

* Lux (čitaj: luks) — latinska riječ, a znači svijetlo.

No o još nečemu ovisi osvjetljenost, kako pokazuju slike 207. a i b. Osvjetljenost je najveća onda, kad je osvjetljena ploha okomita na smjer



Sl. 207.a. Osvjetljenost je najjača, ako zrake svjetlosti padaju okomito na plohu, koju rasvjetljuju.



Sl. 207.b. Osvjetljenost je to slabija, što zrake svjetlosti padaju kosije.

zraka svjetlosti, a to je manja, što je ploha više nagnuta. Na nagnutu plohu na slici 207.b pada samo polovica onoga svjetlosnog toka, koji pada na plohu okomitu na smjer zraka svjetlosti na slici 207.a.

Zadatak 200. Koliki svjetlosni tok pada na neku plohu, ako je njezina ploština $S = 30$ (44,2; 22,8) m², a srednja osvjetljenost $E = 40$ (120; 15) luksa?

Zadatak 201. Kolika je osvjetljenost neke plohe od 5×5 m (48,2 m²; $6 \times 4,5$ m), ako na nju pada svjetlosni tok 1500 (8200; 540) lm?

Zadatak 202. Kolika je osvjetljenost u udaljenosti 20 (12; 35) m od izvora svjetlosti, ako on u tom smjeru daje svjetlost jakosti 4500 (750; 90) c?

13.14. PROPUŠTANJE, ODBIJANJE I UPIJANJE SVJETLOSTI

Neke tvari propuštaju svjetlost, a neke ne. Od tvari, koje propuštaju svjetlost, neke je raspršuju, pa su neprozirne (na pr. opalno staklo), a neke je ne raspršuju; takve su tvari prozirne (na pr. obično staklo). Nema nijedne tvari, koja bi propuštala svu svjetlost, koja na nju pada. Sve za svjetlost propusne tvari propuštaju samo jedan dio svjetlosti, jedan dio odbijaju (reflektiraju), a jedan dio upijaju (apsorbiraju).

Za konstrukciju sijalica i svjetiljaka (»rasvjetnih tijela«) važno je znati, koliki dio ukupnog svjetlosnog toka pojedine tvari propuštaju, koliki odbijaju te koliki upijaju. Te dijelove ukupnog svjetlosnog toka nazivat ćemo faktorima propuštanja, odbijanja i upijanja, pa je:

$$\text{faktor propuštanja} = \frac{\text{propušteni svjetlosni tok}}{\text{ukupni svjetlosni tok}},$$

$$\text{faktor odbijanja (refleksije)} = \frac{\text{odbijeni (reflektirani) svjetlosni tok}}{\text{ukupni svjetlosni tok}},$$

$$\text{faktor upijanja (apsorpcije)} = \frac{\text{upijeni (apsorbirani) svjetlosni tok}}{\text{ukupni svjetlosni tok}}.$$

Ako hoćemo vrijednosti ovih faktora izraziti u postocima, treba navedene omjere pomnožiti sa 100. Umjesto faktor propuštanja, odbijanja, upijanja, zovu ove omjere i koeficijent propuštanja, odbijanja, upijanja.

Zbroj faktora propuštanja, odbijanja i upijanja mora uvijek biti jednak 1.

Evo vrijednosti ovih faktora za neke materijale:

Materijal	Faktor propuštanja %	Faktor odbijanja %	Faktor upijanja %
Bijelo prozorsko staklo 2-4 mm	90—92	6—8	2—4
Mutno (matirano) staklo 1,7-3,6 mm	12—47	40—78	4—30
Mliječno staklo (nit sijalice se uopće ne vidi)	oko 35	oko 50	oko 15
Opalno staklo (nit sijalice se jedva vidi)	oko 55	oko 35	oko 10
Pergament neobojen	oko 42	oko 48	oko 10
Svila bijela, gusta	61—71	28—38	1
Celon bijeli, 1 mm	oko 17	oko 55	oko 28
Celon siv, neproziran, 0,5 mm	oko 79	oko 8	oko 13

Faktor propuštanja tvari, koje su nepropusne za svjetlost, očito je 0. Takve tvari jedan dio svjetlosti upijaju, a jedan dio odbijaju.

Iz fizike je poznato pravilo, da se zraka svjetlosti odbija od neke plohe pod istim kutem, pod kojim ona pada na nju. No u praksi to vrijedi samo za određenu vrstu glatkih ploha, koje zovemo zrcalnim ploham, jer mogu poslužiti kao zrcala. Na ostalim ploham svjetlost se pri odbijanju raspršuje.

Svjetlost ne odbija samo zrcalo, već i svaka druga ploha u većoj ili manjoj mjeri. Općenito, neka će ploha to veći dio svjetlosti odbijati, a to manji upijati, što je svjetlija i što je glada.

Evo faktora odbijanja za neke plohe (srednje vrijednosti, približno):

Ploha	Faktor odbijanja %	Ploha	Faktor odbijanja %
Zrcalo stakleno sa živinim amalgamom	70	Premaz bijelom bojom	80
Isto, samo posrebrano	85	„ svjetložutom bojom	60
Polirano srebro	92	„ smeđom	34
Emajl, bijel	70	„ svjetlozelenom bojom	55
Aluminij poliran ili anodiziran	66	„ tamnozelenom „	16
Čelik poliran	50	„ svijetlomodrom „	43
Bijeli lim	65	„ svijetlocrvenom „	43
Crni metali, neobrađeni	15	„ tamnocrvenom „	19
Papir, bijel	70	„ bijelom uljenom „	82
Koža, crna	1,5	Prirodni beton	45
Barhet, crn	0,2	Crvena opeka	25
		Žuta opeka	35

Faktor upijanja možemo lako izračunati, jer je faktor odbijanja + faktor upijanja = 100. Na pr. za premaz bijelom bojom faktor upijanja je $100 - 80 = 20\%$, t. j. ploha premazana bijelom bojom 80% svjetlosti odbija, a 20% upija. Treba primijetiti, da je faktor odbijanja zbog prljanja (zapašivanja) ploha u praksi redovito manji.

13.15. ZAHTEJEVI NA DOBRU RASVJETU

Da rasvjeta bude dobra, treba da bude ispunjeno ovih pet uvjeta:

- Osvijetljenost mora biti dovoljno jaka;
- rasvjeta mora biti dovoljno jednolična;
- sjene moraju biti blage;
- izvori svjetlosti ne smiju bliještit;
- boja svjetlosti ne smije biti neugodna.

Osvijetljenost neke prostorije ili nekog prostora treba da odgovara radu, koji se tamo vrši. Osvijetljenost,

koja je dovoljna za hodnike, nije ni približno dovoljna za crtaonice. Radionica fine mehanike treba da bude znatno bolje osvijetljena nego kovačnica, gradske ulice s velikim prometom mnogo bolje nego seoske ceste s neznatnim prometom. Vrlo je važno, da rasvjeta bude dovoljno jaka. Pokazalo se, da se pri nedovoljnoj rasvjeti proizvodnost rada znatno smanjuje.

Jugoslavenski standard propisuje, da se odaberu ove vrijednosti za osvijetljenost:

Za grube radove	minimalno	20 lx	poželjno	40 lx
za srednje radove	„	40 lx	„	80 lx
za fine radove	„	75 lx	„	150 lx
za vrlo fine radove	„	150 lx	„	300 lx

Grubi radovi su na pr. grubo kalupovanje, lijevanje, čišćenje odljeva, rad na pilanama, zemljani radovi, betoniranje i sl. Srednji rad je na pr. rad na radnim strojevima obične preciznosti, obično lemljenje, bravarski radovi, rad u kuhinjama, obični stolarski radovi i sl. Finim radom smatra se na pr. rad na preciznim radnim strojevima, montaža finih strojeva i aparata, krojenje i šivanje, strojopis, čitanje i pisanje i dr. Kao vrlo fini rad uzima se između ostalog fina mehanika, tkanje tamnih materijala, precizni laboratorijski radovi, crtanje i ručni rad.

Gore navedene vrijednosti odnose se na srednju osvijetljenost i na opću rasvjetu (bez posebne rasvjete radnog mjesta). Pri određivanju srednje osvijetljenosti ne uzimaju se u obzir oni dijelovi prostorija, koji neposredno ne služe svrsi, kojoj je prostorija namijenjena (na pr. široki hodnici, neiskorišteni uglovi i sl.)

Ako se uz opću rasvjetu posebno osvijetle pojedina radna mjesta, može se osvijetljenost od opće rasvjete smanjiti na 30 lx za srednje radove, 40 lx za fine radove i 50 lx za vrlo fine radove.

Ako se prostorija osvjetljuje fluorescentnim sijalicama, treba vrijednosti navedene pod »poželjno« smatrati minimalnima s time, da osvijetljenost ne bude manja od 100 do 150 lx, jer inače fluorescentna rasvjeta djeluje neugodno.

Za javnu rasvjetu (ulice, trgovi) uzima se:

ako je promet vrlo velik	minimalno	10 lx	poželjno bar	20 lx
ako je promet velik	minimalno	6 lx	poželjno bar	10 lx
ako je promet srednji	minimalno	2 lx	poželjno bar	4 lx
ako je promet malen	minimalno	0,5 lx	poželjno bar	1,5 lx

Rasvjeta treba da bude dovoljno jednolika i vremenski i prostorno. Rasvjeta je vremenski jednolika, kad svjetlost ne trepti ili ne titra toliko, da bi to bilo neugodno ili štetno za oči. Treperenje svjetlosti nastaje zbog kolebanja napona u mreži, a ono je posljedica prevelikog pada napona.

Veliki pad napona može nastati osobito pri uklapanju većih motora, pa česta uklapanja i isklapanja motora mogu dovesti do neugodnog i za oči vrlo šetnog treperenja svjetlosti. Stoga se veliki motori smiju pokretati samo pomoću pokretača, koji smanjuje struju pokretanja, ili moraju biti tako građeni, da im struja pokretanja nije prevelika. Po potrebi treba motore priključiti na posebne motorske strujne krugove, koji su odijeljeni od rasvjetnih strujnih krugova.

Kod izmjenične struje, koja se danas općenito upotrebljava, jakost struje se neprestano mijenja. Zbog toga ni svjetlost nije potpuno jednolika. Nit žarulje najjače je usijana, kad je struja najjača, a najslabije, kad je struja jednaka nuli. No te su promjene struje tako brze, da se nit žarulje ne dospije znatnije rashladiti, kad je struja slaba ili jednaka nuli. Titranja svjetlosti, koja nastaju, tako su brza, a tako mala, da ih oko kod normalne frekvencije 50 Hz ne može zamijetiti. Kod nekih

drugih električnih izvora svjetlosti mogu ponekad i kod frekvencije 50 Hz nastati smetnje. Sijalice, koje iskorišćuju izbijanje u plinu ili pari, trnu se i pale 100 puta u sekundi, pa nastaje stroboskopski efekt. Možemo ga izbjeći tako, da uz takve sijalice montiramo žarulje za dopunsko svjetlo (»miješano svjetlo«) ili da po dvije ili tri takve sijalice spojimo na dvije odnosno tri različite faze trofaznog sistema, da se ne trnu i ne pale istovremeno. Kod fluorescentnih sijalica mnogo se upotrebljava i takozvani dvojni (duo) spoj (vidi str. 191.).

Rasvjeta treba da bude i prostorno dovoljno jednolika. To znači, da osvijetljenost najjače i najslabije osvijetljenog mjesta ne smije biti suviše različita. Kod rasvjete radionica te uređskih i stambenih prostorija osvijetljenost najslabije osvijetljenog mjesta treba da bude barem 50% srednje osvijetljenosti, a kod vrlo finih radova i samo opće rasvjete čak 2/3 srednje osvijetljenosti. Kod rasvjete ulica, cesta, trgova, željezničkih stanica, dvorišta i sl. nejednolikost rasvjete može biti i veća.

Nije dobra rasvjeta, kod koje su sjene suviše oštre. No za većinu radova je jednako nepodesna takva rasvjeta, kod koje sjena praktički nema. Kod takve se rasvjete gubi osjećaj prostornosti predmeta. Stoga je za većinu praktičkih svrha najbolje, da postoje meke, neizrazite sjene.

Rijetko je što za oči štetnije nego bliještenje (zasljepljivanje) izvora svjetlosti. Kod žarulja, na primjer, jaka svjetlost izlazi iz male površine niti. Zbog toga je sjaj niti žarulje, a s njim i sjaj gole žarulje, vrlo velik, tolik, da bliješti, zasljepljuje oči. Sjaj žarulja iznosi oko 100 do 200 sb, a za dobru rasvjetu je poželjno, da sjaj izvora svjetlosti ne bude veći od 0,3 sb kod opće rasvjete, odnosno 0,2 sb kod rasvjete radnog mjesta. (To je otprilike sjaj mjeseca.) Da se izbjegne bliještenje golih žarulja, stavljaju se one u svjetiljke, koje ih zastiru od direktnog pogleda.

Za dobru rasvjetu vrlo je važna i boja svjetlosti. Svjetlost se po boji ne smije toliko razlikovati od danje svjetlosti, da bi to bilo neugodno. Svjetlost žarulja se dosta razlikuje od danje svjetlosti, ali ipak još nije neugodna za oči. Natrijeve sijalice, naprotiv, daju neugodnu žutu svjetlost, pa za običnu rasvjetu nisu podesne.

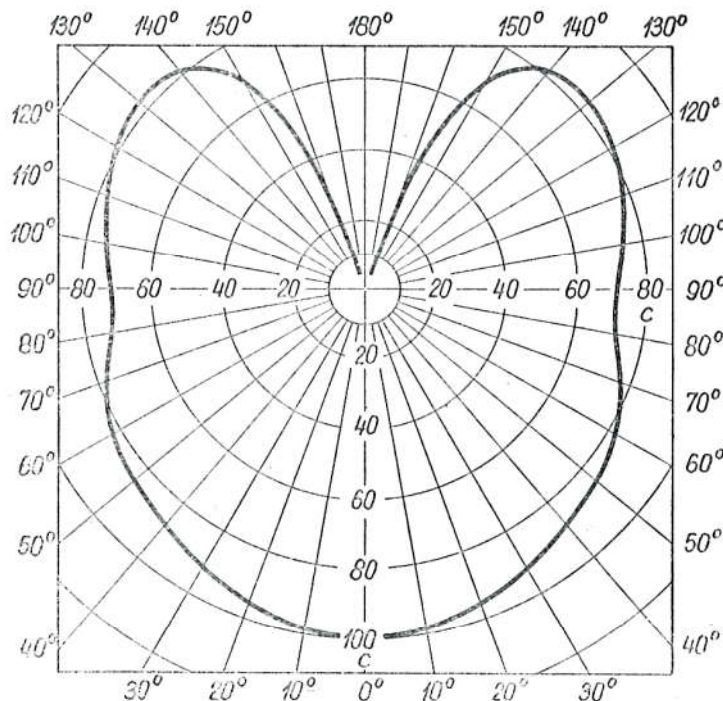
Treba osobito upamtiti: Što je bolja rasvjeta, proizvodnost rada je veća.

13.16. ZADATAK SVJETILJAKA, KRIVULJE RAZDIOBE SVJETLOSTI

Da se spriječi bliještenje zbog prevelikog sjaja žarulja i drugih električnih sijalica, stavljaju se sijalice u svjetiljke. One sprečavaju bliještenje izvora svjetlosti na dva načina. Izvor svjetlosti zaklanjaju od našeg oka (kao na pr. kod stolnih svjetiljaka) ili ga okružuju takvim staklom, koje raspršuje svjetlost pa na taj način znatno smanjuje sjaj (mliječno staklo, opalno, matirano staklo).

Osim što sprečavaju bliještenje, svjetiljke imaju još jedan zadatak. One treba da svjetlost izvora svjetlosti uprave na mjesto, gdje je ona potrebna, t. j. na površinu, koju želimo osvijetliti. Uzmimo na pr. javnu rasvjetu, t. j. rasvjetu ulica i trgova. Mi ne želimo, da nam svjetlost izvora svjetlosti kod takve rasvjete odlazi uzrak ili da osvijetljuje gornje katove zgrada. Da rasvjeta bude ekonomična, potrebno je, da po mogućnosti sav svjetlosni tok, koji izvori svjetlosti daju, pada na ulicu, odnosno na trg, t. j. na površinu, na kojoj se odvija promet. Gola žarulja, fluorescentna, živina ili natrijeva sijalica isijavaju svjetlost gotovo u svim smjerovima. Stoga se te sijalice stavljaju u prikladne svjetiljke, koje svjetlost bacaju prema dolje tako, da su tim sijalicama ulica, odnosno trg, znatno bolje osvijetljeni, nego kad bi sijalice bile gole.

Svjetiljka je najbolje karakterizirana svojom *krivuljom razdiobe svjetlosti* (fotometričkom krivuljom). Slika 208. prikazuje takvu krivulju za голу žarulju, koja daje ukupno 1000 lm. Iz te se krivulje vidi, na primjer, da gola žarulja baca okomito prema dolje svjetlost približne jakosti 100 c, pod kutom od 30° prema okomici daje 90 c, u horizontalnom smjeru (90°) daje 70 c, pod kutom 150° od okomice (60° od horizontale prema gore) daje također oko 70 c i t. d.



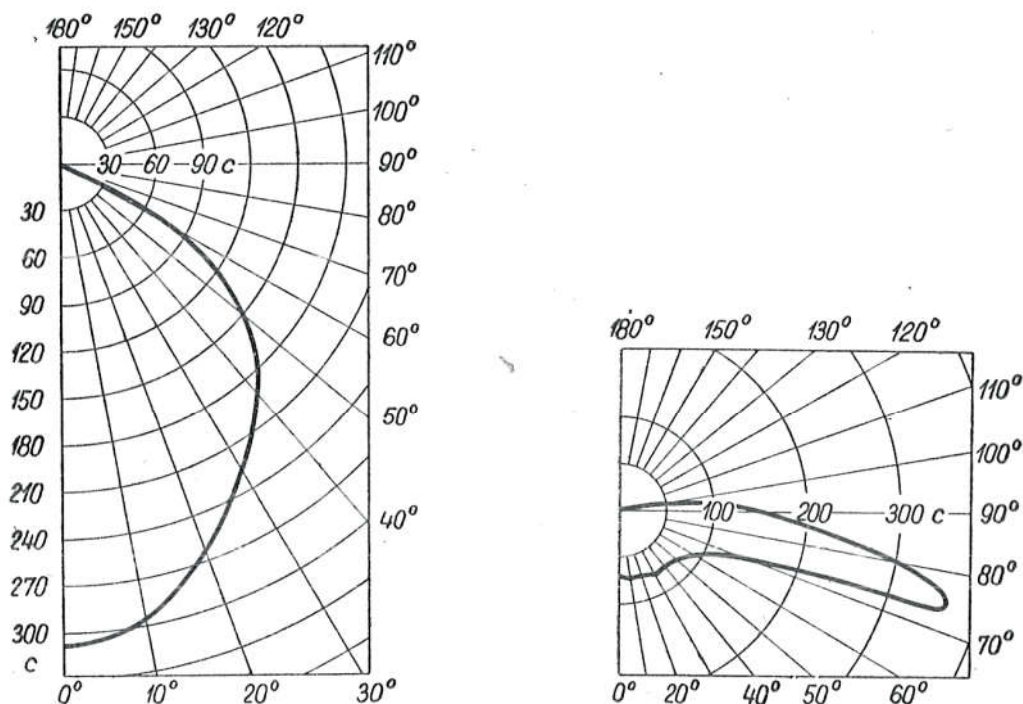
Sl. 208. Krivulja razdiobe svjetlosti (fotometrička krivulja) gole žarulje.

Ako je svjetiljka simetrična, lijeva i desna polovina njezine krivulje razdiobe svjetlosti također su simetrične, pa je dovoljno, da se nacрта samo jedna polovina. Slika 209.a i b prikazuje takve krivulje za dvije svjetiljke posve različite karakteristike. Svjetiljka sa krivuljom prema slici 209.a baca svjetlost uglavnom u dubinu, pa takve svjetiljke možemo nazivati *dubokim svjetiljkama*. Svjetiljka s krivuljom prema slici 209.b baca svjetlost jako u širinu; takve ćemo svjetiljke nazivati *širokim svjetiljkama*. Primjerak duboke svjetiljke prikazuje slika 210., a primjerak široke svjetiljke slika 211.

Krivulja razdiobe svjetlosti snima se na taj način, da se u jednoj ravnini, koja prolazi kroz os sijalice (odnosno svjetiljke), izmjeri jakost svjetlosti u kandelama u raznim smjerovima. Izmjerene vrijednosti nanesu se zatim za pripadne smjerove u prikladnom mjerilu (na pr. $1\text{ mm} = 2\text{ c}$) kao dužine s ishodištem u središtu svjetiljke. Spajanjem krajeva tih dužina dobije se krivulja razdiobe svjetlosti. Koncentrične kružnice* oko središta svjetiljke spajaju točke jednake jakosti svjetlosti. Takve se kružnice redovito crtaju uz krivulje razdiobe svjetlosti, jer omogućuju, da se iz krivulje bez mjerenja odredi jakost svjetlosti u bilo kojem smjeru. Jakost svjetlosti navedena je uz pojedinu kružnicu.

* Koncentrične kružnice = kružnice istog središta (centra).

Jakost svjetlosti mjeri se posebnim spravama, koje se nazivaju fotometri ili mjerila svjetlosti. Ima raznih sistema fotometara, ali se danas najviše upotrebljavaju oni, koji iskorišćuju selenove fotoelemente.



Sl. 209. Krivulja razdiobe svjetlosti (fotometrička krivulja): a) za duboku svjetiljku, b) za široku svjetiljku.

Krivulje razdiobe svjetlosti redovito su nacrtane uz pretpostavku, da se u svjetiljci nalazi sijalica, koja daje 1000 lm. Ako je u svjetiljci na pr. žarulja od 200 W, koja daje 2730 lm, treba jakost svjetlosti dobivenu iz krivulje pomnožiti omjerom 2730/1000, t. j. sa 2,73.

Bilo bi posve pogrešno misliti, da je površina, koju obuhvata krivulja razdiobe svjetlosti, razmjerna sa svjetlosnim tokom, koji svjetiljka daje, pa da je prema tome ona svjetiljka ekonomičnija, kojoj je ta površina veća.

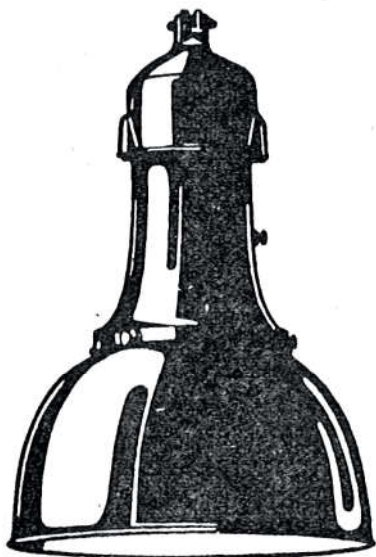
13.17. JAVNA RASVJETA

Javnom rasvjetom smatra se uglavnom rasvjeta trgova, ulica, i cesta.

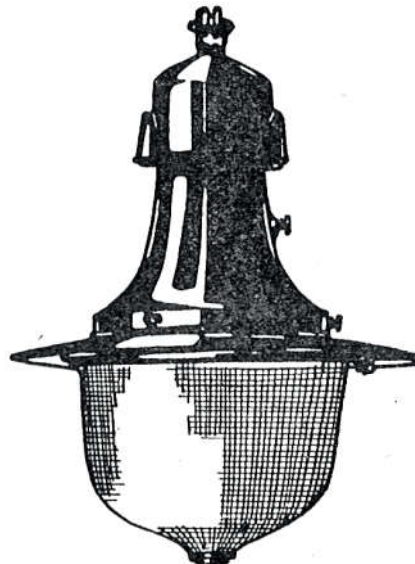
Za rasvjetu cesta i ulica sa slabim prometom služe uglavnom zidni ili stupni krakovi, od kojih se obično traži, da budu što jednostavniji, kako bi bili što jeftiniji. To su svjetiljke s jednostavnim zaslonom, koji služi za djelomično usmjeravanje svijetla, te sa zaštitnim, najčešće prozirnim staklom preko žarulje. U takve se svjetiljke obično stavljaju žarulje od 40 do 100 W.

Za rasvjetu ulica i trgova s većim prometom upotrebljavaju se specijalne ovjesne svjetiljke. U ulicama se one najčešće montiraju na čelična užeta razapeta preko ulice, a na trgovima na posebne stupove. Za široke ulice i trgove najbolje je upotrebiti široke svjetiljke (slika 211.) s krivuljom raz-

• diobe svjetlosti sličnom onoj na slici 209b. Prednost tih svjetiljaka je u tome, što prilično jednoliko osvjetljuju veliku površinu, pa njihov međusobni razmak može biti veći, a time i njihov broj manji. Sasvim duboke svjetiljke s



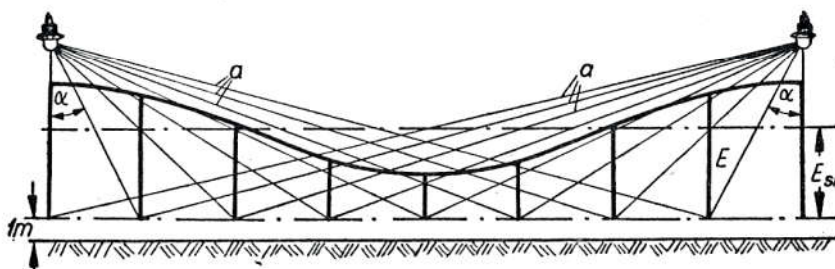
Sl. 210. Duboka svjetiljka (koja baca svjetlost uglavnom prema dolje, a malo ili ništa u širinu).



Sl. 211. Široka svjetiljka (koja baca svjetlost jako u širinu).

karakteristikom poput one na slici 209.a treba upotrebiti samo tamo, gdje svjetlost treba koncentrirati na manju površinu. Većinom je i za rasvjetu uskih ulica bolje upotrebiti poluduboke svjetiljke, koje bacaju svjetlost ipak nešto više u širinu.

Za javnu rasvjetu vrlo je ekonomično miješano svijetlo živinih sijalica i žarulja, kako je opisano u poglavlju 13.9. U najnovije



Sl. 212. Uz izračunavanje osvjetljenosti između dviju svjetiljaka.

vrijeme počele su se i kod nas u nekim gradovima upotrebljavati za javnu rasvjetu fluorescentne sijalice, koje se u inozemstvu u posljednjih desetak godina sve više primjenjuju i u tu svrhu.

Visina zavješanja svjetiljaka nad tlom ne smije biti manja od $1/3$ širine ulice (normalno se uzima 6 do 7 m, a nikako ne manje od 4 m). Za razmak između svjetiljaka se preporučuje, da bude nekoliko puta tako velik kao visina svjetiljaka nad tlom, i to 3 do 4 puta kod rasvjete dubokim i poludubokim svjetiljkama, a 5 do 6 puta kod rasvjete poluširokim i širokim svjetiljkama.

Proračun osvijetljenosti u svakoj pojedinoj točki možemo izvršiti, samo ako je poznata krivulja razdiobe svjetlosti upotrebljenih svjetiljaka. Osvijetljenost ne računa se za samo tlo, nego za mjernu ravninu 1 m nad tlom, jer se smatra, da je rasvjeta u toj ravnini važnija s obzirom na promet. Na slici 212. nacrtane su 2 svjetiljke ulične rasvjete. Sliku treba nacrtati u mjerilu, na pr. 1 : 100, t. j. jednom metru u naravi neka odgovara 1 cm na slici.

Razmak između svjetiljaka podijelimo na jednake odsječke, na pr. njih 8, pa za tako dobivene točke izračunajmo jakost rasvjete po formuli

$$E = \frac{I}{a^2}.$$

Jakost svjetlosti I dobijemo tako, da kutomjerom izmjerimo pripadni kut α , pa za taj kut očitamo iz krivulje razdiobe svjetlosti pripadnu jakost svjetlosti (uzimajući pritom dakako u obzir jakost sijalice u svjetiljci). Udaljenost a dobijemo iz slike (uzevši u obzir mjerilo). Za svaku točku treba računati dva puta, jedamput za lijevu i drugi put za desnu svjetiljku, pa dobivene osvijetljenosti zbrojiti. Osvijetljenost za pojedinu točku prikazimo okomitom dužinom u prikladnom mjerilu (na pr. 1 lx = 2 cm) pa krajeve tih dužina spojimo krivuljom. Odoka možemo sada procijeniti srednju osvijetljenost. Na slici je ona prikazana vodoravnom crtom, ispod koje površina mora biti jednako velika kao površina ispod izračunate krivulje. Dobili smo zapravo srednju osvijetljenost u osi ulice. Ona treba da bude 20% veća od one, koja je navedena u poglavlju 13.15 kao potrebna srednja osvijetljenost.

Projekt rasvjete nije dakako tako jednostavan. Za nj je potrebno uzeti u obzir tehničke, ekonomske i estetske obzire.

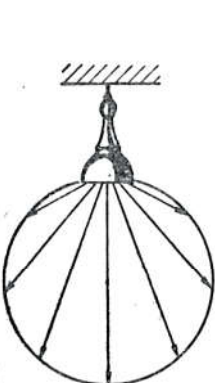
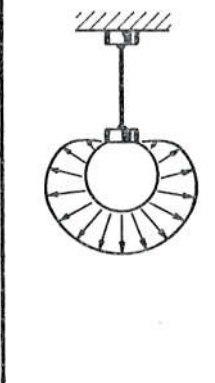
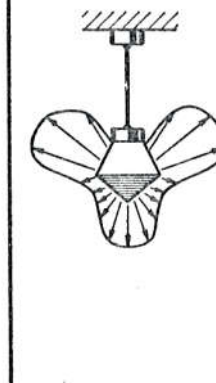
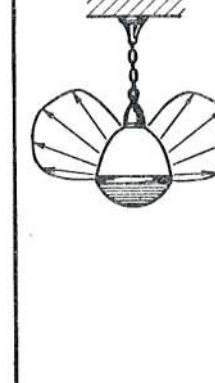
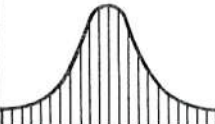
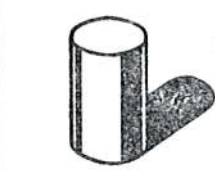
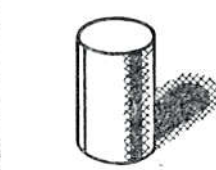
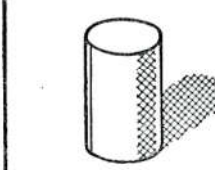
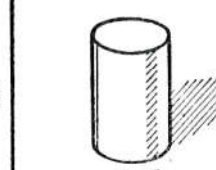
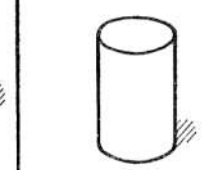
13.18. RASVJETA PROSTORIJA

U prvom redu razlikujemo *opću rasvjetu* i *rasvjetu radnih mjesta*. U pravilu treba dati prednost samo općoj rasvjeti. Posebnu rasvjetu radnih mjesta uz dodatnu opću rasvjetu treba odabrati: a) Kad su zahtjevi na osvijetljenost izvanredno veliki; b) za pojedina radna mjesta, koja traže jaču osvijetljenost, nego što je za dotičnu prostoriju inače ekonomično; c) kad je promjenljiv smjer, iz kojega svjetlost treba da pada. Uz rasvjetu radnih mjesta treba uvijek da bude izvjesna opća rasvjeta (vidi str. 201.), jer bi inače nejednolikost bila tako velika, da ne bi bila samo neugodna već i štetna za oči.

Kod rasvjete prostorija svjetiljke ne bacaju uvijek cijeli proizvedeni svjetlosni tok prema dolje. Ako je strop svijetao, svjetiljka može bacati svjetlost djelomično ili čak posve prema gore, prema stropu. Na stropu se svjetlost reflektira pa opet pada prema podu. No ne reflektira se sva svjetlost. Jedan dio svjetlosti strop i zidovi upijaju. Od ukupno proizvedenog svjetlosnog toka jedan se dio gubi u svjetiljci, a drugi dio upijaju strop i zidovi. Stoga i rasvjeta ima svoju *korisnost* (stupanj djelovanja):

$$\text{korisnost} = \frac{\text{korisni svjetlosni tok}}{\text{proizvedeni svjetlosni tok}}$$

Kod rasvjete prostoriya razlikujemo direktnu, pretežno direktnu, poluindirektnu, pretežno indirektnu i indirektnu rasvjetu. Karakteristike ovih vrsta rasvjete vide se iz ovog pregleda:

Direktna rasvjeta	Pretežno direktna rasvjeta	Poluindirektna rasvjeta	Pretežno indirektna rasvjeta	Indirektna rasvjeta
				
				
				
Korisnost kod svijetlog stropa i polusvijetlih zidova (grubo približno)*				
55 0/0	40 0/0	35 0/0	30 0/0	25 0/0
Korisnost kod polusvijetlog stropa i tamnih zidova (grubo približno)*				
50 0/0	30 0/0	25 0/0	20 0/0	15 0/0

Kod *direktna rasvjete* svjetiljke bacaju cijeli svjetlosni tok direktno prema dolje. Takva se rasvjeta najviše upotrebljava u radioničkim prostorijama, osobito ako su visoke. Ta je rasvjeta najekonomičnija (korisnost joj je najveća), jer svjetlost pada direktno na osvijetljenu plohu, dok je strop ništa ne upija, a zidovi malo. U drugu ruku, kod ove je rasvjete nejednolikost najveća, a sjene su oštre (vidi gornji pregled). Za direktnu rasvjetu prostoriya najviše se upotrebljavaju poluduboke i poluširoke svjetiljke: prve u visokim radionicama, druge u nižim.

Kod *pretežno direktna rasvjete* najveći dio svjetlosnog toka ide prema dolje, a mali dio prema stropu. Razdioba svjetlosti je nešto jednoličnija, i sjene su već blaže nego kod direktna rasvjete, ali je korisnost manja.

* Korisnost mnogo ovisi i o omjeru širine prostoriye prema visini svjetiljke nad podom odn. visini prostoriye. (Vidi na pr. D. Kaiser, Elektrotehnički priručnik.)

Kod *poluindirektne rasvjete* otprilike polovina svjetlosnog toka ide prema dolje, a polovina prema gore. Razdioba svjetlosti je još jednoličnija, a sjene su još mekše, ali je i korisnost još manja.

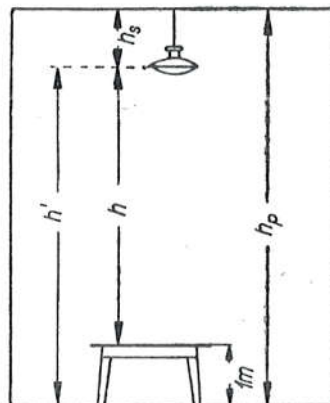
Kod *pretežno indirektna i indirektna rasvjete* ide najveći dio svjetlosnog toka odn. sav svjetlosni tok prema gore, u strop. Što je rasvjeta indirektnija, to je razdioba svjetlosti jednoličnija, a sjene su blaže. Kod posve indirektna rasvjete sjena gotovo i nema. Ta rasvjeta daje međutim najmanju korisnost, pa je ona vrlo skupa. Osim toga, indirektnu i pretežno indirektnu rasvjetu treba brižljivo održavati, jer se inače uslijed zaprašivanja njezina korisnost znatno smanjuje. Stoga se takva rasvjeta upotrebljava uglavnom samo za rasvjetu svećanih prostorija.

Za rasvjetu ureda, trgovina, stambenih i sličnih prostorija najviše se upotrebljava poluindirektna i pretežno direktna rasvjeta.

Ni kod rasvjete prostorija ne računa se osvijetljenost s obzirom na pod već s obzirom na takozvanu radnu plohu, za koju se uzima, da je 1 m nad podom (slika 213.), jer je to približna visina radnih stolova, osovina tokarilica i t. d. nad podom. Duljina ovjesa svjetiljaka h_p normalno se uzima 0,7 m, a obično je u granicama od 0,3 do 1,5 m. Za razmak između svjetiljaka l najbolje je da kod direktne rasvjete bude $l \approx h$ (t. j. približno jednak visini svjetiljaka nad radnom plohom), kod pretežno direktne rasvjete l može biti nešto veći, kod poluindirektne neka bude $l = 1,5 h$ do $2 h$, a kod indirektna $l = 1,5 h$ do $2,5 h$. Razmak svjetiljaka od zida neka bude $1/3 l$ do $1/2 l$.

Visina zavješavanja svjetiljaka za direktnu rasvjetu ne smije nikako biti premala, jer inače svjetiljke bliješte. Za pojedine jakosti žarulja visina svjetiljaka nad podom (h') ne bi smjela biti manja od ovih vrijednosti:

Jakost žarulja W	do 60	100	200	300	500	1000	1500
Visina h m	2,5	2,8	3,2	3,7	4,3	6,1	7,3



Sl. 213. Za proračun rasvjete važna je visina h svjetiljke nad radnom plohom

h_p - visina prostorije, h' - visina svjetiljke nad podom, h_s - duljina ovjesa svjetiljke.

13.19. PRORAČUN RASVJETE PROSTORIJA

Pomoću onoga, što već znamo, možemo proračunati potreban broj i jakost žarulja za rasvjetu prostorija. Potrebna osvijetljenost navedena je na strani 201., korisnost pojedinih vrsta rasvjete na strani 207., a podaci za međusobni razmak svjetiljaka na ovoj strani (gore). Evo kako se računa na osnovu tih podataka:

47. *primjer.* Sobu za stanovanje dugačku 5 m, a široku 4 m treba osvijetliti pretežno direktnom rasvjetom. Srednja osvijetljenost treba da iznosi 40 luksa. Strop je svijetao, a zidovi su polusvijetli. Treba izračunati potrebnu jakost žarulja.

Rješenje: Potrebni svjetlosni tok jednak je površini osvijetljene plohe $S = 5 \cdot 4 = 20 \text{ m}^2$ pomnoženoj srednjom osvijetljenošću $E = 40 \text{ lx}$ (vidi stranu 198.):

$$\Phi_k = E S = 20 \cdot 40 = 800 \text{ lm.}$$

Kod pretežno direktne rasvjete, svijetlog stropa i polusvijetlih zidova iznosi korisnost (prema tablici na strani 207.) $\eta = 40\%$. Prema tome možemo izračunati svjetlosni tok, koji treba da daju žarulje:

$$\eta = \frac{\Phi_k}{\Phi}, \text{ odavle } \Phi = \frac{\Phi_k}{\eta} = \frac{800}{0,40} = 2000 \text{ lm.}$$

Pomoću tablice na strani 190. možemo odrediti žarulje, koje daju potrebni svjetlosni tok. Već prema vrsti svjetiljke možemo odabrati jednu žarulju od 150 W, koja daje 1980 lm, 2 žarulje po 100 W, koje zajedno daju 2300 lm, 4 žarulje po 60 W, koje ukupno također daju 2300 lm, ili 6 žarulja po 40 W, koje daju ukupno 1950 lm.

48. primjer. Treba osvijetliti uredsku prostoriju za računovodstvo 12 m dugu, 6,5 m široku i 3,80 m visoku poluindirektnom općom rasvjetom. Strop i zidovi su svijetli. Izračunaj broj i jakost žarulja.

Rješenje. Prema podacima na strani 201. odaberemo srednju osvijetljenost $E = 100 \text{ lx}$. Potrebni svjetlosni tok iznosi ($S = 12 \cdot 6,5 = 78 \text{ m}^2$):

$$\Phi = E S = 100 \cdot 78 = 7800 \text{ lm.}$$

Kod poluindirektne rasvjete, svijetlog stropa i zidova iznosi $\eta = 35\%$ (tablica na strani 207.). Prema tome je:

$$\Phi = \frac{\Phi_k}{\eta} = \frac{7800}{0,35} = 22\,300 \text{ lm,}$$

Visina stropa je 3,80 m. Svjetiljke neka su obješene 80 cm = 0,80 m ispod stropa. Prema tome je udaljenost žarulja od osvijetljene plohe $h = 3,80 - 0,80 = 3,00 \text{ m}$. Razmak između svjetiljaka $l = 1,5 h$ do 2 h, t. j. 3 do 4 m. Treba uzeti 2 reda svjetiljaka, a u svakom redu 3 ili 4 svjetiljke, ukupno dakle $2 \times 3 = 6$ ili $2 \times 4 = 8$ svjetiljaka. Ako je u svakoj svjetiljci 1 sijalica, treba ona da daje:

$$\Phi_1 = \frac{22300}{6} = 3710 \text{ lm,}$$

odnosno

$$\Phi_1 = \frac{22300}{8} = 2780 \text{ lm.}$$

Prema tablici na strani 190. trebalo bi kod 6 svjetiljaka uzeti žarulje od 300 W, koje daju po 4250 lm. Stvarna osvijetljenost bila bi nešto veća, t. j. iznosila bi $\frac{4250}{3710} \cdot 100 = 115 \text{ lx}$, a potrebna električna snaga iznosila bi $6 \cdot 300 = 1800 \text{ W}$. Kod 8 svjetiljaka trebalo bi uzeti žarulje od 200 W, koje daju po 2730 lm. Stvarna jakost rasvjete bila bi tada $\frac{2730}{2780} \cdot 100 = 98 \text{ lx}$, a potrebna snaga $8 \cdot 200 = 1600 \text{ W}$.

Zadatak 203. Sobu za stanovanje od $5 \times 4,60$ ($6 \times 4,5$; $5,2 \times 3$) m treba osvijetliti pretežno direktnom rasvjetom tako, da srednja osvijetljenost bude 30 (25; 60) lx. Strop je polusvijetao, zidovi su tamni. U svjetiljku dolazi samo jedna žarulja. Od koliko vata treba da bude ta žarulja?

Zadatak 204. Za koliko postotaka bi se uz istu žarulju pojačala rasvjeta sobe iz zadatka 203., ako bi strop bio svijetao, a zidovi polusvijetli?

Zadatak 205. Kolika bi trebalo da bude žarulja za rasvjetu sobe iz zadatka 203., ako bi strop bio svijetao, zidovi polusvijetli, a rasvjeta direktna?

Zadatak 206. Koliki treba da budu broj i jakost žarulja za rasvjetu školske sobe (uredske prostorije; crtaonice) dugačke 10 (14; 12) m, široke 6,3 (6,5; 6) m, visoke 4 (3,50; 3,70) m? Rasvjeta neka bude poluindirektna, a osvijetljenost neka iznosi 80 (60; 150) luksa. Strop i zidovi su svijetli.

Zadatak 207. Radionicu, u kojoj se obavljaju grubi radovi, treba osvijetliti direktnom rasvjetom. Radionica je dugačka 24 (14; 18) m, široka 10 (7; 10) m i visoka 6 (4,3; 5,2) m. Strop je polusvijetao, zidovi su tamni. Srednja osvijetljenost treba da bude 20 luksa. Koliko je potrebno žarulja i kako jake treba da budu?

Zadatak 208. Treba osvijetliti glavnu prostoriju doma kulture tako, da srednja osvijetljenost bude 60 (70; 65) luksa. Prostorija je dugačka 16 (18; 12) m, široka 8 (8,5; 6,8) m, a visoka 4 (5; 3,80) m. Koliko je potrebno žarulja i kako jake treba da budu, ako je rasvjeta poluindirektna, a strop i zidovi su svijetli?

14. ELEKTRIČNI STROJEVI I TRANSFORMATORI

14.1. OPĆENITO

Električni strojevi dijele se na generatore, motore i pretvarače.

Električni generatori su strojevi, koji proizvode električnu energiju. Oni tu električnu energiju proizvode tako, da mehaničku energiju pretvaraju u električnu. Električni generator može, po zakonu o održanju energije, proizvesti samo toliko električne energije, koliko mu je privedeno mehaničke energije, odbivši gubitke energije, koji nastaju u generatoru kao i u svakom stroju. Za okretanje generatora potrebna je prema tome to veća mehanička snaga, što generator proizvodi veću električnu snagu. Snagu za pokretanje generatora daje zagonski stroj, koji zajedno s generatorom čini agregat za proizvodnju električne energije. Zagonski stroj može biti vodna turbina, parna turbina, parni stroj, dizelski motor, benzinski motor, motor na upojni plin, vjetrenjača ili kakav drugi zagonski stroj.

Elektromotori su pak takvi strojevi, koji električnu energiju pretvaraju u mehaničku. Stoga oni služe kao zagonski strojevi za zagon najrazličitijih strojeva i drugih tehničkih naprava.

Električni pretvarači su strojevi, koji električnu energiju jedne vrste pretvaraju u električnu energiju druge vrste, na pr. trofaznu struju u istosmjernu. Među pretvarače spadaju samo one naprave, kod kojih se ta pretvorba vrši posredstvom mehaničke energije, t. j. posredstvom okretanja stroja. Elektronski aparati (na pr. živini usmjerivači), koji također pretvaraju struju jedne vrste u struju druge vrste, ne spadaju među pretvarače.

Svim strojevima je zajedničko to, da se okreću, da se gibaju. Prema tome transformator, na pr., kod kojega nema nikakvog gibanja, ne spada u električne strojeve, već u aparate.

Električni strojevi svih vrsti mogu se sagraditi tako, da rade i kao generatori i kao motori. Svaki generator mogao bi raditi kao motor, a svaki mo-

tor bi mogao proizvoditi struju kao generator. Nema *nikakve principijelne razlike između električnih generatora i elektromotora*. I generatori i motori osnivaju se na posve istim principima. Samo se iz praktičnih, konstruktivnih razloga neki stroj redovito izvodi ili kao generator ili kao motor, a rjeđe tako, da može raditi i kao generator i kao motor. No važno je upamtiti, da se svaki električni stroj može izvesti tako, da radi i kao generator i kao motor.

Zašto je to tako, moći ćemo razabrati, ako se zamislimo nad najjednostavnijim generatorom prikazanim na slici 130. Svi se električni strojevi, dakle i generatori i motori, osnivaju na zakonima elektromagnetske indukcije. Kod generatora se iskorišćuje pojava, da se inducira elektromotorna sila u vodiču, koji se u magnetskom polju giba tako, da siječe magnetske linije. Kod motora se pak iskorišćuje pojava, da magnetsko polje nastoji pomaknuti vodič, kojim teče struja, dakle da djeluje na nj izvjesnom silom. Kad okrećemo »generator« na slici 130., u njemu će se inducirati neka elektromotorna sila, pa će generator proizvoditi struju, ako je strujni krug zatvoren. No čim generator proizvodi struju, teče ta struja kroz njegove vodiče. A na vodiče, kojima teče struja, magnetsko polje djeluje izvjesnom silom (koja je — kako znamo — to jača, što je magnetsko polje jače, što je struja jača i što je vodič dulji). Ta se sila odupire okretanju generatora, pa generator teže okrećemo, što on proizvodi jaču struju. Pri okretanju generatora moramo svladati tu silu, kojom se generator opire okretanju i koja bi htjela generator tjerati u protivnom smjeru. Struja, koja teče u strujnom krugu generatora na slici 130., nastaje zbog izmjenične elektromotorne sile, koja se inducira pri njegovu okretanju. No mi istu struju kroz vodiče našega »stroja« na slici 130. možemo postići i tako, da »stroj« ostavimo na miru, a u njegov strujni krug da uključimo neki drugi izvor isto takve izmjenične elektromotorne sile, na pr. drugi posve jednaki generator. Zbog protjecanja struje i sada će na vodiče našega stroja djelovati ona ista sila, koja se je odupirala njegovu okretanju, dok je on proizvodio struju, te koja ga je htjela tjerati u protivnom smjeru. No ta će sila doista sada i tjerati naš stroj u tom protivnom smjeru: naš stroj se sada samo okreće, on radi kao motor!* Ali čim se stroj okreće, njegovi vodiči opet sijeku magnetske linije, u njemu se opet inducira elektromotorna sila. Kako se sada naš stroj okreće u protivnom smjeru, imat će i ta elektromotorna sila protivan smjer: ona će se odupirati protjecanju struje kroz stroj, pa se stoga naziva protuelektromotorna sila.

Kako se iz navedenoga vidi, generatorsko i motorsko djelovanje stroja međusobno se isprepliću. Dok stroj radi kao generator, u njemu nastaje mehanička protusila, koja bi htjela, da stroj kao motor potjera u protivnom smjeru. Dok stroj radi kao motor, u njemu se inducira protuelektromotorna sila, koja bi htjela, da stroj kao generator proizvodi struju protivnog smjera. Ova isprepletenost generatorskog i motorskog djelovanja ima svoj osnov u zakonu o održanju energije, a ona je u biti svih električnih strojeva. Stoga i nema principijelne razlike između generatora i motora.

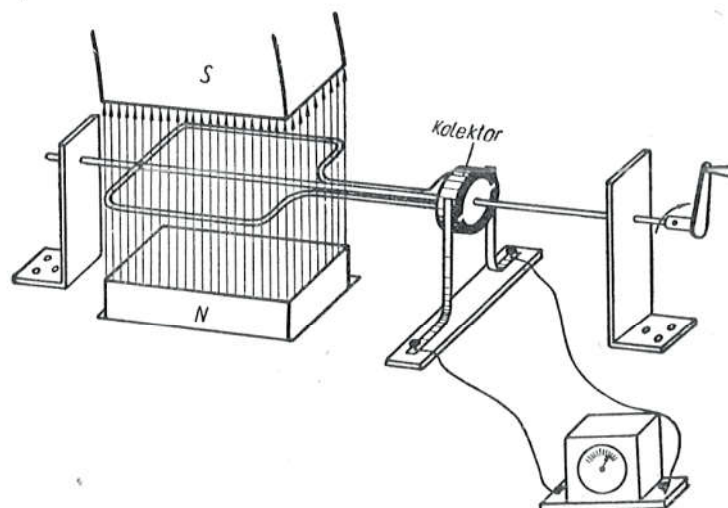
Onaj dio stroja, u kojem se pri generatorskom radu inducira elektromotorna sila, naziva se *armatura* (a također i kotva ili indukt). Kod istosmjernih strojeva to je obično rotor, a kod sinhronih i asinhronih strojeva to je obično stator.

Nazivna snaga stroja je ona snaga, za koju je stroj dimenzioniran i građen. To je ona snaga, koju stroj može pri nazivnom naponu i uz nazivnu frekvenciju trajno davati, a da se ne ugrije više, nego to dozvoljavaju propisi. *Nazivna snaga generatora* je prividna električna snaga u kilovoltamperima (ili u megavoltamperima) mjerena na stezaljkama generatora. *Nazivna snaga motora* je mehanička snaga u kilovatima (ili u vati-ma) mjerena na osovini motora.

* Ustvari, naš će stroj raditi kao motor samo onda, ako mu damo početnu brzinu, koja odgovara frekvenciji struje kroza nj. Kad ga jedamput potjeramo, on će se sam dalje okretati. Zašto je to tako, vidi u poglavljima 10.2 i 14.21.

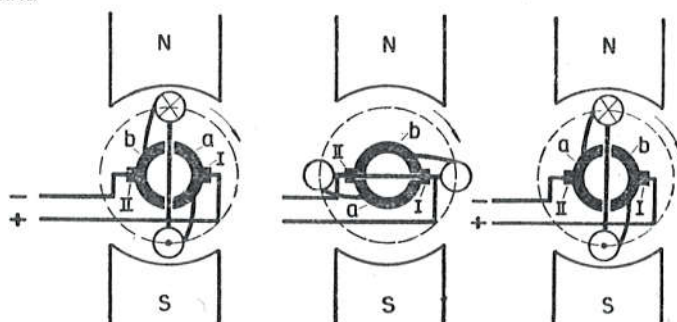
14.2. PRINCIP ISTOSMJERNIH GENERATORA (GENERATORA ISTOSMJERNE STRUJE)

Čini se, da je istosmjerna struja jednostavnija od izmjenične. No ipak su strojevi izmjenične struje jednostavniji od strojeva istosmjerne struje. Pa i u ovoj smo knjizi dosada opisali samo strojeve izmjenične i trofazne struje, dok o strojevima istosmjerne struje nismo rekli ni riječi.

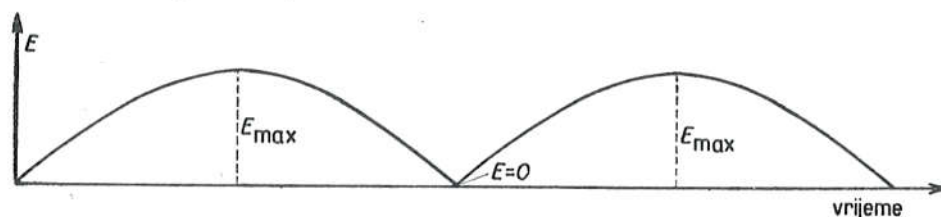


Sl. 214. Najjednostavniji istosmjerni generator.

Prije svega: u gotovo svim strojevima istosmjerne struje teče — izmjenična struja!* Istosmjerni su strojevi zapravo također strojevi izmjenične struje, kod kojih se istosmjerna struja dobiva samo zgodnim preklapanjem u pogonu.



Sl. 215. Kolektor vrši preklapanja tako, da napon ima uvijek isti smjer.



Da to objasnimo, zamislimo posve jednaki uređaj kao na slici 130., s tom jedinom razlikom, da umjesto kliznih koluta, na koje su bili spojeni krajevi vodiča, uzmemo nešto drukčiju napravu, takozvani *kolektor* ili *komutator***

* Od ovoga se izuzimaju samo t. zv. unipolarni strojevi, koji se međutim vrlo malo upotrebljavaju, jer mogu proizvesti samo vrlo male napone. Upotrebljavaju se stoga kadšto u elektrokemijskoj industriji za proizvodnju ogromnih struja uz vrlo male napone, koji su tamo potrebni.

** Kolektor i komutator su riječi latinskog porijekla. U doslovnom prijevodu kolektor znači skupljač, a komutator mjenjač.

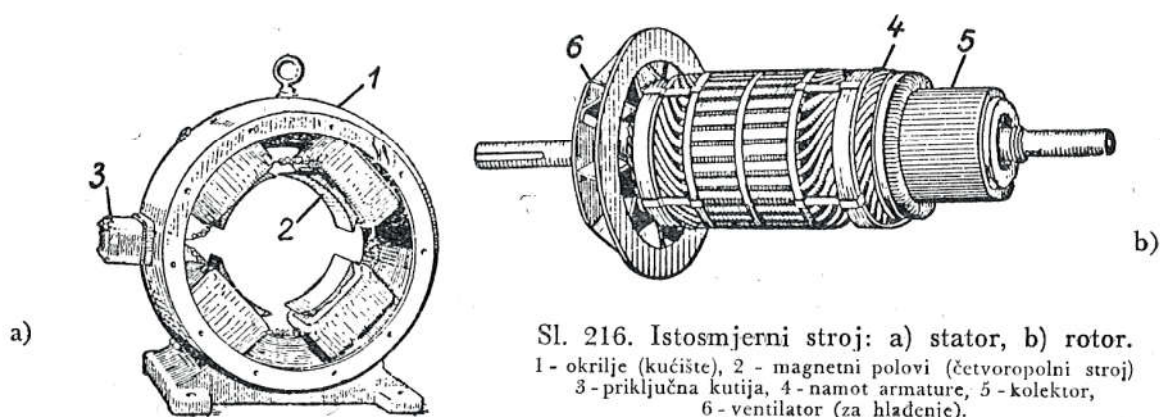
(slika 214.). Kolektor je metalni bubanj, koji se u našem slučaju sastoji od dvije međusobno izolirane polovine. Na jednu je polovinu spojen jedan, a na drugu polovinu drugi kraj petlje. Po kolektoru klize ugljeni blokovi, takozvane četkice, pomoću kojih se odvodi odnosno dovodi struja. Četkice su smještene jedna nasuprot drugoj.

Počnimo sada taj naš »stroj« okretati, upravo tako, kao što smo to učinili s onim na slici 130. Pa promotrimo, slično kao što smo to učinili na slici 131., kakva će se struja inducirati u pojedinim trenucima. U tu je svrhu na slici 215. nacrtana naša petlja u 3 različita položaja. Ispod tih položaja nacrtana je krivulja inducirane elektromotorne sile, slično kako smo to učinili na slici 131. Bitna, međutim, promjena prema slici 131. je u tome, što inducirana elektromotorna sila, pošto je u položaju 2 spala na vrijednost 0, ne mijenja svoj smjer. Zašto? Zato, što se u položaju 2 vrši »preklapanje« na kolektoru tako, da sada pod četkicu I dolazi polovina kolektora b, umjesto polovine a, koja se dotada nalazila pod četkicom I. Zbog ovog se preklapanja položaj 3 ni u čemu ne razlikuje od položaja I, pa je inducirana elektromotorna sila jednaka u oba položaja ne samo po veličini nego i po smjeru.

No što smo dobili? Da li je to istosmjerna struja, što smo je dobili? Da, neka vrsta istosmjerne struje i jest, jer inducirana elektromotorna sila, a s njom dakako i struja, ne mijenjaju smjer. No takva istosmjerna struja jako pulzira, njezina jakost nije ni približno stalna.

14.3. IZVEDBA I DJELOVANJE ISTOSMJERNIH GENERATORA

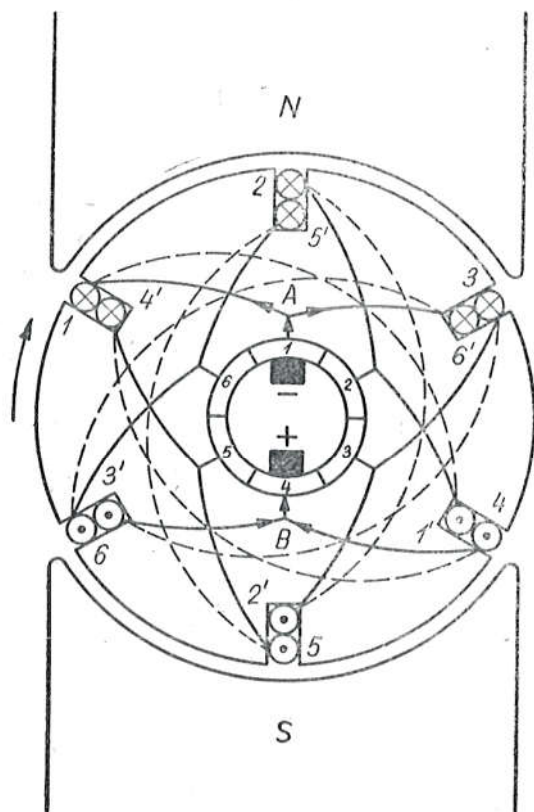
Generatori, koji proizvode »pravu« istosmjernu struju, razlikuju se dakako mnogo od našeg modela na slici 214. Prije svega, njihovi se namoti ne sastoje samo od jedne petlje već od prilično velikog broja zavoja. Ti se zavoji ne okreću u zraku, već su namotani u utore čeličnog cilindra sastavljenog od dinamo-limova. Razlog za to nije samo mehanička čvrstoća, već i to, što se na taj način mnogo bolje ostvaruje magnetski krug, jer se magnetske linije magneti mogu tada zatvarati kroz taj cilindar. Za stvaranje magnetskog polja služe elektromagneti, a ne trajni magneti. Slika 216. prikazuje stator i rotor malog istosmjernog stroja.



Sl. 216. Istosmjerni stroj: a) stator, b) rotor.
1 - okrilje (kućište), 2 - magnetni polovi (četvoropolni stroj)
3 - priključna kutija, 4 - namot armature, 5 - kolektor,
6 - ventilator (za hlađenje).

Ne ćemo se upuštati u različite načine namatanja istosmjernih strojeva, već ćemo samo objasniti, kako u biti rade takvi strojevi. Promotrimo stoga sliku 217., gdje je nacrtan rotor s jednostavnim namotom. Namot je smješten u utorima na obodu cilindra, i to u dva sloja, kao što se normalno i radi kod

istosmjernih strojeva. Na obodu ima svega 12 vodiča, a to znači $12 : 2 = 6$ zavoja. Kolektor se više ne sastoji od samo dvije međusobno izolirane polovine

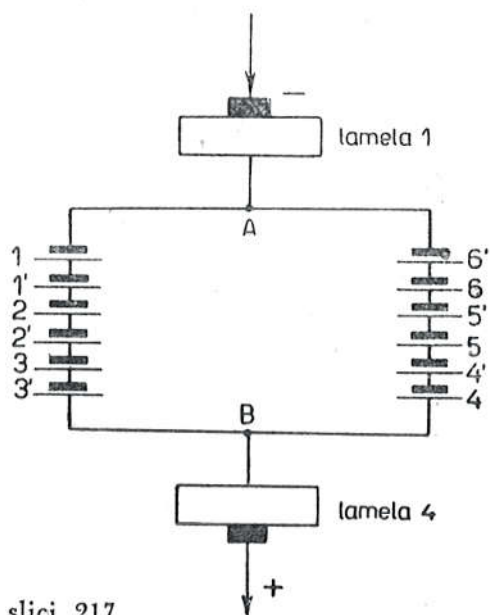


Sl. 217. Jednostavni namot istosmjernog stroja: 12 vodiča, 6 zavoja, 6 lamela, 2 paralelne grane, 2 četkice, 2 pola.

ju, te da se njihove elektromotorne sile zbrajaju, a s druge strane da je to isto i za zavojima 4—4', 5—5', 6—6'.

Promotrimo to bolje. Preko minus-četkice i lamele 1 dolazi struja u namot. U točki A grana se u dvije grane. Pokušajmo na slici 218. predložiti taj spoj sasvim shematski, pa promotrimo najprije lijevu granu. Iz točke A ide struja najprije preko vodiča 1. U njemu se inducira neka elektromotorna sila, pa taj vodič 1 možemo shematski na slici 218. predložiti galvanskim člankom. Iza vodiča 1 ide struja kroz vodič 1', koji je s vodičem 1 spojen u seriju. I u vodiču 1' inducira se elektromotorna sila, pa i taj vodič možemo na slici 218. predložiti galvanskim člankom. Ako obilazimo tako redom po namotu dalje, vidjet ćemo, da su s vodičima 1 i 1' još u seriji vodiči 2, 2', 3 i 3'. Nakon vodiča 3' dolazimo do točke B, preko koje struja ulazi u lamelu 4, pa preko nje dalje na plus-četkicu. Ako sad

Sl. 218. Shematski prikaz namota na slici 217.

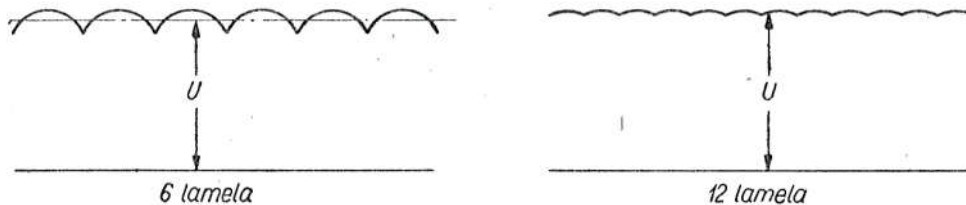


kao na slikama 214. i 215., već ima toliko međusobno izoliranih lamela, koliko ima zavoja, dakle 6. Namot je izveden tako, da ide od lamele 1 po prednjoj (kolektorskoj) strani rotora do vodiča 1, zatim po stražnjoj strani rotora od vodiča 1 do vodiča 1' (praveći zavoj 1—1'), nadalje opet po prednjoj strani rotora od 1' do lamele 2 pa do vodiča 2, a zatim po stražnjoj strani od 2 do 2' i t. d., i t. d. Ako okrećemo rotor kao generator, možemo po pravilu desne ruke lako ustanoviti, da elektromotorna sila u svim vodičima s gornje strane rotora ima smjer od prednje prema stražnjoj strani, a u svim vodičima s donje strane obratan. Ako promotrimo pojedine zavojne, vidjet ćemo, da elektromotorna sila u jednom vodiču zavoja ima jedan, a u drugom vodiču obratan smjer — kao što, naravno, i treba da bude. U svakom se zavoju, prema tome, inducira neka elektromotorna sila, koja je jednaka zbroju elektromotornih sila induciranih u oba vodiča toga zavoja.

No ako dobro promotrimo sliku 217., vidjet ćemo, da su s jedne strane zavoji 1—1', 2—2', 3—3' spojeni u seri-

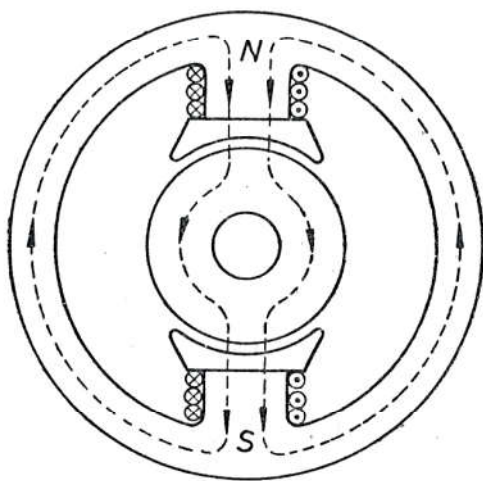
promotrimo desnu granu od točke A, vidjet ćemo, da imamo u seriji vodiče 4, 4', 5, 5', 6 i 6'. To je sve shematski predloženo na slici 218. Iz ove slike vidimo, da naš namot u momentu prikazanom na slici 217. čini ustvari dva paralelno spojena niza elektromotornih sila. Pojedine se elektromotorne sile u svakom od ova dva niza zbrajaju pa uzrokuju napon na četkicama generatora.

Kako se vidi, u momentu prikazanom na slici 217. osim lamela 1 i 4 sve ostale lamele su »mrtve«. No čim pri daljnjem okretanju vodiči 1 i 4' dođu u položaj, u kojem su na slici 217. vodiči 2 i 5', dođu pod četkice umjesto lamela

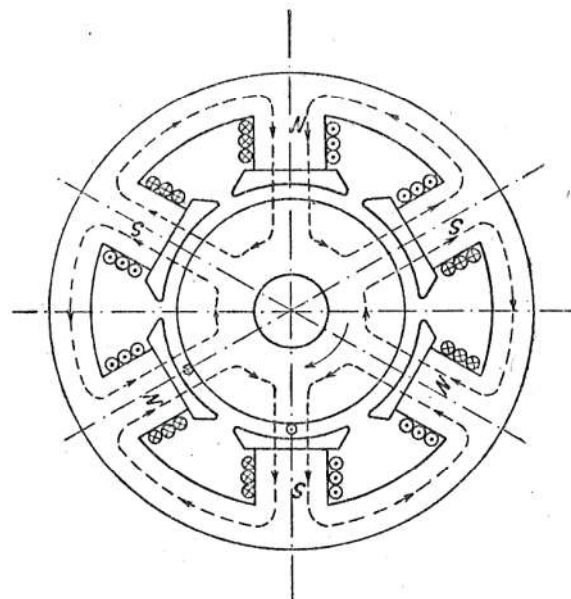


Sl. 219. Što istosmjerni generator ima više lamela, to napon na četkicama manje pulzira.

1 i 4 lamele 6 i 3. A kako je rotor posve simetrično građen, nema u tom novom položaju baš nikakve razlike premo onom položaju, koji je prikazan na slici 217. Na kolektoru je izvršeno preklapanje tako, da se sada pod četkicama nalaze lamele 6 i 3, a ne više lamele 1 i 4. Pri daljnjem okretanju rotora dolaze pod četkice redom pojedini parovi lamela, ali inducirana elektromotorna sila



Sl. 220. Magnetski krugovi dvopolnog istosmjernog stroja.



Sl. 221. Magnetski krugovi šestoropolnog istosmjernog stroja.

je uvijek jednaka (i najveća!), kad god pojedini parovi vodiča dođu pod sredinu polova. Ta elektromotorna sila ima uvijek smjer od gornje četkice prema donjoj, t. j. gornja je četkica negativna, a donja pozitivna.

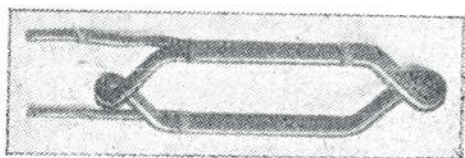
Dok je kod uređaja prema slici 214. inducirana elektromotorna sila bila maksimalna samo dvaput za vrijeme jednoga okretaja, dotle je ona kod uređaja prema slici 217. maksimalna 6 puta za vrijeme jednoga okretaja (slika

219.). Ona prema tome mnogo manje »pulzira«. Lako je uvidjeti, da bi kod velikog broja zavoja ona sasvim malo »pulzirala«, dakle da bi bila praktički konstantna: dobili bismo doista »pravu« istosmjernu struju!

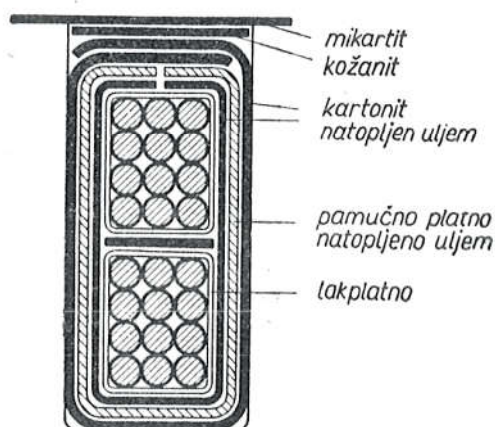
Kako se eto vidi, djelovanjem kolektora dobijemo istosmjernu struju, premda se u svakom zavoju inducira izmjenična elektromotorna sila, upravo onakva, kakva je prikazana na slici 131.!

Kako smo vidjeli na slikama 217. i 218., struja se u rotoru dijeli na 2 paralelne grane. Svaki vodič namota vodi prema tome samo $\frac{1}{2}$ ukupne struje.

Slika 220. prikazuje magnetski krug dvopolnog istosmjernog stroja. Magnetomotorna sila nastaje pola u sjevernom, a pola u južnom polu magneta.



Sl. 222. Svitak izrađen na šabloni za namatanje armature istosmjernog stroja.



Sl. 223. Smještaj vodiča u utoru armature. Vodiči u gornjoj i donjoj polovini utora pripadaju stranama dvaju različitih svitaka.

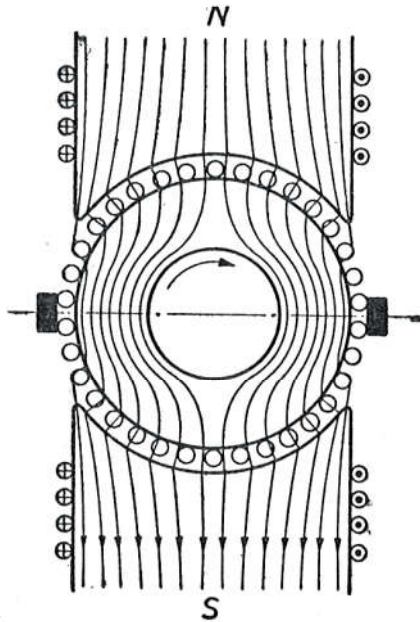
Ona uzrokuje magnetski tok, koji se dijeli u dvije simetrične polovine. Magnetski tok prolazi kroz sjeverni pol magneta, kroz zračni raspor između statora i rotora, kroz rotor, zatim opet kroz zračni raspor, kroz južni pol magneta, pa se kroz jaram statora zatvara sam u sebe.

Istosmjerni strojevi mogu biti ne samo dvopolni, već mogu imati 4, 6 pa i više polova. Na primjer stroj na slici 216. ima 4 pola. Na slici 221. prikazani su magnetski krugovi šestoropolnog stroja. I ovdje se magnetski tok kroz pojedine magnete dijeli u dvije polovine te se zatvara sam u sebe tako, kako je crtkano označeno na slici. U pogledu namatanja vrijedi za ove višepolne strojeve ono isto, što je za izmjenične strojeve rečeno u vezi sa slikama 135. i 136. Pojedini zavoji moraju biti građeni tako, da jedna njihova strana bude pod jednim polom, dok je druga strana pod susjednim protivnim polom.

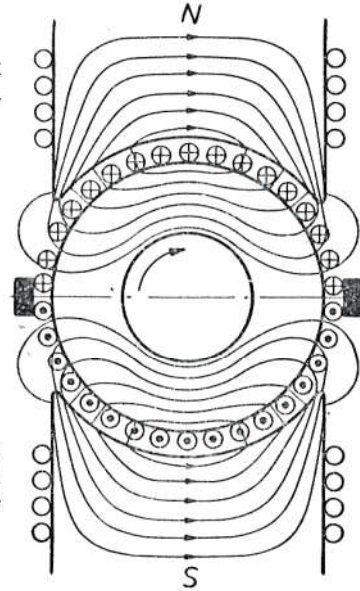
Obično se između lamela ne priključuje samo po jedan zavoj kao na slici 217. već nekoliko zavoja, koji tvore svitak poput onoga na slici 222. Tako se postizava veća elektromotorna sila, jer se elektromotorne sile u pojedinim zavojima zbrajaju. Vodiči su smješteni u utoru na primjer tako, kako to pokazuje slika 223. U donjoj polovini takvog utora nalazi se strana jednog svitka, a u drugoj polovini utora nalazi se strana drugog svitka. To je također dvo-slojni namot kao na slici 217., samo što se u utoru nalaze po dvije strane svitaka, a ne samo po dvije strane zavoja.

14.4. REAKCIJA ARMATURE ISTOSMJERNIH STROJEVA

Na slici 224. prikazan je magnetski tok kroz stroj istosmjerne struje, kad kroz njegov rotor ne teče nikakva struja. Jednostavnosti radi vodiči nisu nacrtani u utorima kao na slici 217. već na obodu rotora, a lamele kolektora



← Sl. 224. Magnetski tok magneta (kroz namot armature ne teče struja).



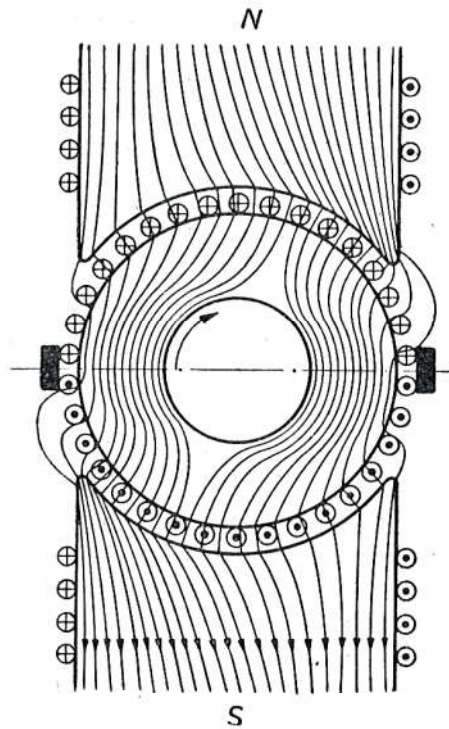
Sl. 225. Magnetski tok armature (kroz uzбудni namot ne teče struja). →

nisu uopće prikazane, već četkice kližu neposredno po vodičima. U praksi se tako dakako ne radi, ali za načelno razmatranje to je isto.

Armatura (rotor) istosmjernog stroja nije drugo nego svitak, kojemu je os okomita na os magneta. Kao i svaki drugi svitak i armatura istosmjernog stroja proizvodi magnetsko polje, kad kroz nju teče struja, a ta se pojava naziva reakcija armature. To magnetsko polje armature prikazano je na slici 225.

Glavno polje magneta i poprečno polje armature stvaraju ukupno polje, koje je prikazano na slici 226. To polje nije više jednoliko između stopala magneta i oboda rotora, već je iskrivljeno. *Neutralna zona nije više okomita na os magneta, već je zakrenuta za izvjesni kut, i to u smjeru vrtnje kod generatora, a protivno od smjera vrtnje kod motora.* Zbog reakcije armature nastaje veće zasićenje čelika u jednom dijelu magnetskog kruga; uslijed toga poraste nešto magnetski otpor, pa je ukupni tok nešto manji nego tok samih magneta bez reakcije armature. Zbog reakcije armature slabi magnetski tok stroja.

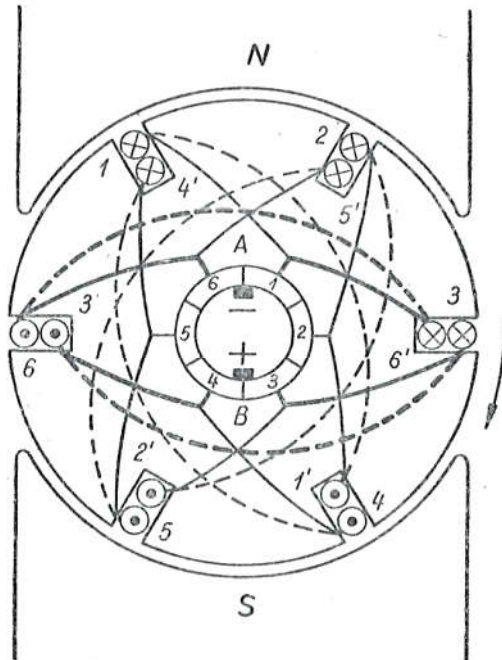
Sl. 226. Ukupni magnetski tok kroz stroj (nastaje djelovanjem amperzavoja magneta i amperzavoja armature).



Reakcija armature je to jača, što je opterećenje stroja veće. Kod neopterećenog generatora reakcije armature nema.

14.5. KOMUTACIJA ISTOSMJERNIH STROJEVA

Kad četkica prelazi s jedne lamele na drugu, vrši komutaciju, t. j. preklapanje pripadnog zavoja odnosno svitka od jedne polovine namota na drugu, u kojoj je smjer struje obratan. Na slici 227. prikazan je isti namot kao na



Sl. 227. Namot sa slike 217. u trenutku komutacije. Deblje izvučeni zavoji kratko su spojeni preko kolektora i četkica.

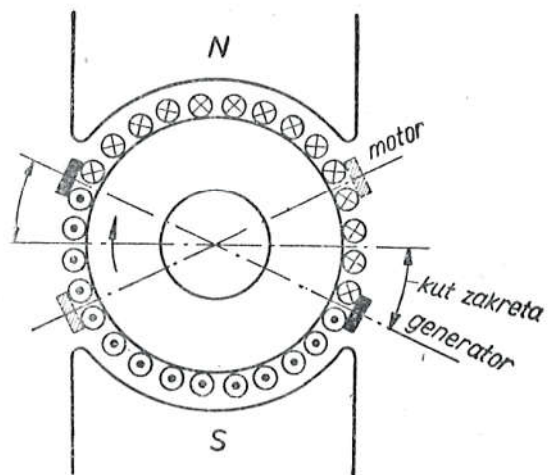
dašnja struja. Ta bi se elektromotorna sila odupirala prema tome promjeni (komutaciji) struje u kratko spojenim zavojima, pa bi četkice napustile lamele 4 i 1 prije, nego bi se smjer struje promijenio. Kako se on ipak nužno mora promijeniti, nastala bi iskra u času, kad četkice napuštaju lamele 4 i 1, a daka-ko i pri svakom drugom komutiranju. Kolektor bi pri opterećenju stroja neprestano iskrio.

Da se to iskrenje spriječi, treba četkice nešto zakrenuti, i to kod generatora u smjeru vrtnje, a kod motora u smjeru protivnom od smjera vrtnje (slika 228.). Četkice treba zakrenuti ne samo do neutralne zone pri opterećenju nego i još nešto više, da bi se za vrijeme komutiranja u kratko spojenim zavojima inducirala elektromotorna sila takvog smjera, da bi podupirala novi smjer struje i na taj način ubrzala komutaciju.

slici 217. samo trenutak kasnije, kad plus-četkica prelazi s lamele 4 na lamelu 3, a minus-četkica s lamele 1 na lamelu 6. U tom se trenutku zavoji 3—3' i 6—6' komutiraju, pa su oni na slici deblje izvučeni. Vidimo, da su u trenutku komutacije ti zavoji kratko spojeni.

Dok plus-četkica prelazi s lamele 1 na lamelu 6, treba da struja u zavojima 3—3' i 6—6' promijeni smjer. Ako bi četkice ostale u položaju kao na slici 227., komutacija ne bi bila dobra i kolektor bi pri opterećenju stroja iskrio. Zbog reakcije armature neutralna zona zakrenula se nešto u smjeru vrtnje kolektora.

Stoga u trenutku komutacije kratko spojeni svici 3—3' i 6—6' još nisu stigli u neutralnu zonu, pa oni još sijeku magnetske linije. U njima se inducira elektromotorna sila, i to — kako se lako možemo uvjeriti po pravilu desne ruke — istog smjera kao i dot-



Sl. 228. Da se spriječi iskrenje, zakrenu se pri opterećenju četkice generatora u smjeru vrtnje, a četkice motora u protivnom smjeru (samo kod strojeva bez pomoćnih polova).

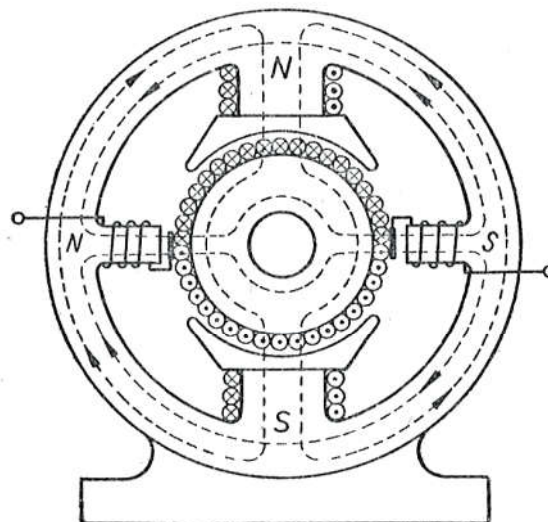
Takvo zakretanje četkica ima dva osnovna nedostatka, i to:

- a) Zakret četkica trebao bi da bude to veći, što je stroj jače opterećen.
- b) Kad su četkice zakrenute, nastaju na armaturi amperzavoji, koji su direktno protivni amperzavojima magneta, pa prema tome direktno slabe magnetski tok kroz stroj.

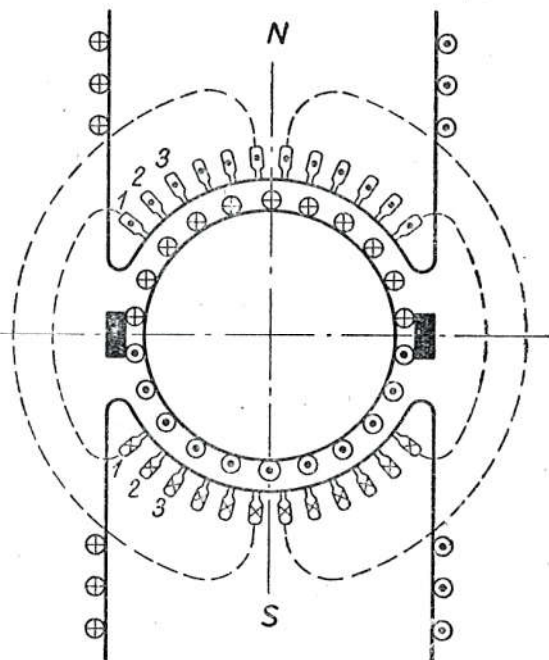
Stoga treba položaj četkica pri opterećenju regulirati ili ih postaviti u neki srednji položaj. Ti nedostaci su razlog, da se danas ovaj način uglavnom ne upotrebljava.

Da se proizvede dobra komutacija, izvode se na istosmjernim strojevima pomoćni polovi. Polarnost tih pomoćnih polova mora uvijek biti takva, da vodiči generatora pri okretanju prije glavnoga pola naiđu na istoimeni pomoćni pol, a vodiči motora da prije glavnoga pola naiđu na protivni pomoćni pol (slika 229.).

Polje pomoćnih polova treba da bude tako jako, da ono u neutralnoj zoni ne samo poništava polje armature, nego i stvara izvjesno polje povoljno za komutaciju. To polje treba da se mijenja s reakcijom armature: što je reakcija armature jača, t. j. što je opterećenje



Sl. 229. Stroj s pomoćnim polovima. Redoslijed polova u smjeru vrtnje je kod generatora N-s-S-n-N i t. d., a kod motora N-n-S-s-N i t. d.



Sl. 230. Kompenzacioni namot poništava reakciju armature. On je smješten u stopalima magneta, a spojen je u seriju s armaturom.

veće, to i polje pomoćnih polova treba da bude jače. U praznom hodu polja pomoćnih polova ne treba. Stoga namoti pomoćnih polova treba da budu građeni i spojeni tako, da kroz njih teče struja armature.

Pomoćni polovi poništavaju poprečno polje armature samo u uskoj zoni komutacije. Oni ne sprečavaju nejednolikost magnetske indukcije u rasporu ispod polova. Osobito kod velikih strojeva i strojeva s vrlo promjenljivim opterećenjem poželjno je, da se reakcija armature posve poništi. To se može postići takozvanim kompenzacionim namotom prema slici 230. To je namot smješten u polna stopala magneta i spojen tako, da i kroza nj protječe struja armature, ali u obratnom smjeru nego kroz armaturu. Magnetomotorne sile (amperzavoji) armature i kompenzacionog namota se poništavaju, a time se poništava i reakcija armature.

14.6. INDUCIRANA ELEKTROMOTORNA SILA I NAPON ISTOSMJERNIH GENERATORA

U svakom zavoju namota stroja inducira se pri okretanju neka elektromotorna sila. Kao što smo vidjeli, ukupna elektromotorna sila jednaka je zbroju elektromotornih sila induciranih u pojedinim zavojima. Ukupna je elektromotorna sila dakle to veća, što stroj ima veći broj zavoja. Nadalje, inducirana je elektromotorna sila to veća, što je magnetsko polje, u kojemu se vodiči gibaju, jače. Napokon, ta je elektromotorna sila to veća, što vodiči pojedinih zavoja brže sijeku magnetske linije, t. j. što se stroj brže okreće. No još jedan faktor utječe na veličinu inducirane elektromotorne sile: broj polova. Već smo prije razmatrajući sliku 135. spomenuli, da kod četvoropolnog stroja polovica okretaja odgovara cijelom okretaju kod dvopolnog stroja. Kod četvoropolnog bi se stroja, pod inače jednakim okolnostima, inducirala jednaka elektromotorna sila kao kod dvopolnog stroja s dvaput većom brzinom vrtnje, odnosno dvaput veća elektromotorna sila nego kod dvopolnog stroja s jednakom brzinom vrtnje.

Matematički to možemo izraziti pomoću formule:

$$E = 4 N \frac{pn}{60} \Phi \text{ volta,}$$

gdje je:

- E — inducirana elektromotorna sila u stroju (u voltima),
- N — ukupni broj zavoja,
- p — broj pari polova (kod dvopolnog stroja dakle $p = 1$),
- n — brzina vrtnje (okretaja/min),
- Φ — magnetski tok u veberima.

No koliki je napon na stezaljkama istosmjernog generatora? Kao i kod svakog izvora struje napon na stezaljkama je i ovdje jednak elektromotornoj sili umanjenoj za unutarnji pad napona:

$$U = E - I_a R_a \text{ volta,}$$

gdje je U — napon na stezaljkama generatora, I_a — struja armature (rotora) u amperima, R_a — otpor armature (rotora) u omima. Kad je $I_a = 0$, tada (i samo tada!) bit će $U = E$, t. j. *napon na stezaljkama neopterećenog generatora jednak je u njemu induciranoj elektromotornoj sili.*

Kod opterećenja se napon na stezaljkama generatora smanjuje. On se smanjuje to znatnije, što je opterećenje veće. Ovo smanjivanje napona nije nam poželjno, jer trošila traže konstantan napon. Stoga je potrebno napon na stezaljkama regulirati tako, da se on kod opterećenja ne smanjuje. Štoviše, većinom želimo, da napon na stezaljkama generatora bude kod opterećenja veći, nego kad je generator neopterećen. Na taj način možemo donekle nadoknaditi pad napona u vodovima kod opterećenja.

Napon na stezaljkama možemo mijenjati, t. j. regulirati samo tako, da mijenjamo induciranu elektromotornu silu. A nju možemo mijenjati tako, da mijenjamo jedan od faktora, koji utječu na njezinu veličinu. Dva od tih faktora ne možemo mijenjati: broj zavoja i broj polova ne mogu se u pogonu mijenjati. Treći faktor je brzina vrtnje. Nju bismo mogli mijenjati, ali većinom to ne radimo. Brzina vrtnje generatora određena je brzinom vrtnje zagonskog stroja. A ima razloga, zašto je dobro, da brzina vrtnje zagonskog stroja bude konstantna. Preostaje četvrti faktor: veličina magnetskog toka. Kako se ona može u pogonu mijenjati?

Kod svih današnjih strojeva (osim kod onih najmanjih, koji služe za za-
gon posve malih uređaja, kao što su električni satovi i sl.) magneti nisu per-
manentni, već su to elektromagneti. Tako je i kod istosmjernih stro-
jeva. Svaki magnet mora prema tome imati namot, kojim teče istosmjerna
struja. Ovi namoti, koji proizvode magnetski tok magneta, nazivaju se *uzbud-
ni namoti*, a struja, koja kroz njih teče, *uzbudna struja*. Što uzbudna struja
stvara jači magnetski tok, kažemo, da je *uzbudna struja* jača, ili da je stroj
jače uzbuđen. Mijenjanjem uzbudne struje možemo, prema tome, mijenjati i
jakost magnetskog toka, a s njim i elektromotornu silu, pa i napon na ste-
zaljkama generatora. Možemo stoga reći: *Regulacija napona generatora vrši
se mijenjanjem uzbuđene.*

14.7. IZVEDBA I DJELOVANJE ISTOSMJERNIH MOTORA

Kao svaki električni stroj, tako i istosmjerni stroj može u načelu da
radi ne samo kao generator, nego i kao motor. Ako je građen na pr. prema
slici 217., treba mu samo na četkice narinuti istosmjerni napon, pa će kroz
njegove dvije grane poteći struja. Smjer okretanja stroja kao motora ovisi o
smjeru narinutog napona i smjeru magnetskog polja. Ako je smjer polja
ostao isti (t. j. nije se promijenio smjer uzbudne struje), a smjer napona na-
rinutog na četkice je takav, da će kroz namot teći ista struja kao i onda, kad
je stroj radio kao generator, stroj će se kao motor, po pravilu lijeve ruke,
okretati u protivnom smjeru.

Smjer okretanja motora istosmjerne struje može se promijeniti tako,
da promijenimo smjer struje kroz rotor ili smjer uzbudne struje magneta.
Ako motor ima pomoćne polove i kompenzacioni namot, treba pri takvom
prespajanju uvijek paziti, da u smjeru vrtnje motora *nakon* glavnog pola
dolazi istoimeni pomoćni pol, a smjer struje kroz kompenzacioni namot da
bude protivan smjeru struje armature.

U načelu se istosmjerni generatori grade posve jednako kao i isto-
smjerni motori. U praksi će međutim istosmjerni stroj biti izveden ponešto
različito prema tome, da li treba da služi kao generator ili kao motor. Ima
međutim istosmjernih strojeva, koji se upotrebljavaju sad kao generator, sad
kao motor.

14.8. POKRETANJE ISTOSMJERNIH MOTORA

Kad istosmjernom stroju narinemo na četkice istosmjerni napon, on će
se početi okretati kao motor. Pri okretanju inducira se u njemu elektro-
motorna sila. Ta inducirana elektromotorna sila ne može nikada biti tako ve-
lika kao narinuti napon. Narinuti napon troši se naime ne samo na svlada-
vanje te protuelektromotorne sile, već i na pad napona u otporu armature:

$$U = E + I_a R_a.$$

Ovaj pad napona u otporu armature $I_a R_a$ iznosi kod malih strojeva do
10%, a kod velikih strojeva oko 3% od narinutog napona U , pa i manje.

U času pokretanja, kad motor još miruje, inducirana protuelektromo-
torna sila jednaka je nuli, t. j.

$$E = 0, \text{ dakle je } U = I_a R_a.$$

Struja bi prema tome bila

$$I_a = \frac{U}{R_a}.$$

A kako otpor rotora mora biti što manji, da gubici zbog ugrijavanja motora budu što manji, bila bi struja u času pokretanja ogromna.

49. *primjer*: Motor za napon 220 V uzima iz mreže kod potpunog opterećenja struju 50 A. Koliko bi iznosila struja u času pokretanja, ako bi motoru bio na četkice narinut cijeli napon 220 V, a njegov otpor armature između četkica iznosi 0,22 Ω ?

Rješenje:

$$I_a = \frac{220}{0,22} = 1000 \text{ A.}$$

Kako se vidi iz ovog primjera, struja bi u času pokretanja bila 1000 : 50 = 20 puta veća nego kod maksimalnog opterećenja! Zbog ovako goleme struje smjesta bi pregorjeli osigurači ili bi isključila automatska sklopka. A ako to ne, onda bi takva struja teško oštetila kolektor motora, pa i same namote. No i s obzirom na ostala trošila tako veliki »udari struje« u mreži nisu dozvoljeni. Tako golema struja izazvala bi veliki pad napona, pa bi pri svakom takvom pokretanju sve sijalice u blizini zatrepale ili čak »zažmirile«.

Da spriječimo tako velike struje pri pokretanju, moramo za vrijeme pokretanja povećati otpor rotora. To načinimo tako, da u seriju s otporom rotora spojimo dovoljno veliki promjenljivi otpornik. Takav se otpornik naziva *pokretač*. Pri pokretanju smanjujemo pomalo otpor pokretača, a sasvim ga isključimo tek onda, kad se motor posve zaletio, t. j. kad je došao na svoju potpunu brzinu. Ako bi pokretač ostao uklopljen u redovitom pogonu, nastali bi u njemu znatni gubici energije.

50. *primjer*: Koliki mora biti otpor pokretača R_p za motor iz 49. primjera, ako hoćemo, da struja ni pri pokretanju ne bude veća od normalne struje, t. j. od 50 A.

Rješenje:

$$R_p + R_a = \frac{U}{I_a} = \frac{220}{50} = 4,4 \Omega,$$

$$R_p = 4,4 - 0,22 = 4,18 \Omega.$$

14.9. MIJENJANJE BRZINE VRTNJE ISTOSMJERNIH MOTORA

Brzina vrtnje motora mora biti tolika, da se u njegovoj armaturi inducira elektromotorna sila, koja će zajedno s padom napona u armaturi biti jednaka narinutom naponu po formuli $U = E + I_a R_a$. Kako pad napona u armaturi $I_a R_a$ iznosi tek nekoliko procenata narinutog napona, mora inducirana protuelektromotorna sila biti približno jednaka narinutom naponu mreže. Ona je dakle određena tim naponom. Ako, na primjer, motor priključimo na napon 220 V, mora se u njegovoj armaturi inducirati elektromotorna sila od približno 220 V (nekoliko procenata manje).

Veličina inducirane elektromotorne sile ovisi i ovdje, kao i kod generatora, o ona ista 4 faktora: broju zavoja, broju polova, jakosti uzbude i brzini vrtnje. Na prva dva ne možemo ni ovdje utjecati. Veličina inducirane elektromotorne sile ovisi dakle samo o jakosti uzbude i o brzini vrtnje.

Ako smanjimo uzbudu, motor će se morati brže okretati, da se inducira ista elektromotorna sila; ako je pojačamo, motor će se okretati sporije. Dakle, *brzina vrtnje istosmjernih motora mijenja se promjenom uzbude. Što je uzbuda jača, to je brzina manja i obratno.*

Još se na jedan način može povećati, odnosno smanjiti brzina istosmjernih motora: povećanjem, odnosno smanjenjem narinutog napona. Motor se okreće uvijek takvom brzinom, da se inducira potrebna protuelektromotorna sila. Ako narinuti napon smanjimo, potrebna je manja protuelektromotorna sila, pa se i brzina vrtnje smanji. Ako narinuti napon povećamo, potrebna je veća protuelektromotorna sila, pa se i brzina vrtnje poveća. Dakle, *brzina vrtnje istosmjernih motora povećava se, odnosno smanjuje povećavanjem odnosno smanjivanjem narinutog napona.*

Kod istosmjernih motora treba paziti, da uzbuda ne spadne ispod izvjesne granice, jer bi u tom slučaju brzina motora mogla ponarasti toliko, da bi se motor mogao razletjeti.

14.10. KAKO ELEKTROMOTOR REGULIRA STRUJU OPTEREĆENJA?

Elektromotor mora uvijek iz mreže uzimati neku struju, pa čak i onda, kad je neopterećen. On okrećući se vrši neki mehanički rad, a za to mu je po zakonu o održanju energije potrebna električna energija. I kad motor nije opterećen, treba nešto električne energije za svladavanje trenja i za pokrivanje gubitaka u čeliku. Kad je opterećen, motor treba jaču struju: to jaču, što je opterećenje veće.

Prema jednadžbi $U = E + I_a R_a$ inducirana protuelektromotorna sila manja je od narinutog napona za pad napona u armaturi. Taj pad napona to je veći, što je struja veća, t. j. što je opterećenje veće. Uz isti narinuti napon protuelektromotorna sila mora biti manja, što je opterećenje veće. Kad motor opteretimo, kako će se smanjiti njegova protuelektromotorna sila? Pa naprosto tako, da motor nešto smanji svoju brzinu. Kad se poveća opterećenje, motor će dakle smanjiti svoju brzinu; tako će se smanjiti protuelektromotorna sila, pa će motor moći povući iz mreže jaču struju. Kad se motor rastereti, on će se, naprotiv, ubrzati; protuelektromotorna sila će porasti, pa će motor uzimati iz mreže manju struju.

Elektromotor se kod promjena opterećenja sam regulira te mu ne treba nikakvog posebnog regulatora, kao što to treba drugim strojevima (na pr. parnom stroju, dizelskom motoru, vodnoj turbini i t. d.). Ovo je zajednička osobina svih elektromotora, a ne samo motora istosmjerne struje.

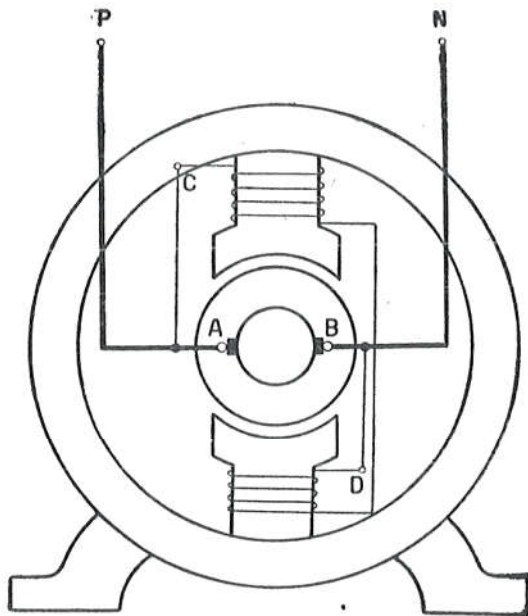
14.11. VRSTE ISTOSMJERNIH STROJEVA S OBZIROM NA NAČIN UZBUDE

Istosmjerni strojevi, i kad rade kao generatori i kad rade kao motori, bitno se međusobno razlikuju s obzirom na način uzbude. Prema načinu uzbude razlikujemo ove vrste istosmjernih strojeva:

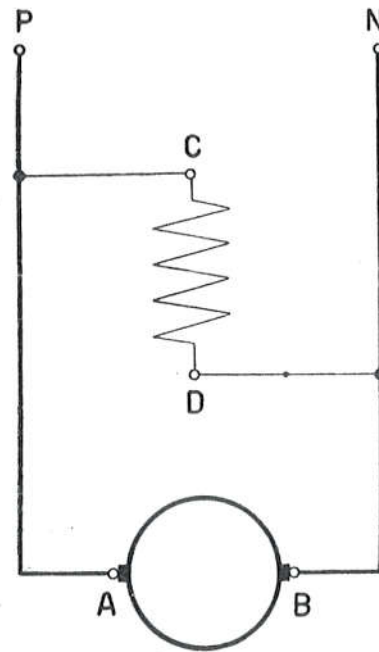
- strojevi s nezavisnom uzbudom,
- strojevi s vlastitim uzbudnim generatorom (dinamom),
- poredni strojevi,
- serijski strojevi,
- kompaundni strojevi.

Strojevi s nezavisnom uzbuđom dobivaju uzbuđnu struju za svoje magnetne iz stranog izvora struje, posve nezavisnog od dotičnog stroja, na pr. iz neke akumulatorske baterije ili iz nekog posebnog uzbuđnog stroja. Uzbuđna struja takvih strojeva vrlo se jednostavno regulira tako, da se u krug te struje uključi promjenljivi otpornik. No u praksi je obično neprilično, što takvim strojevima treba poseban izvor struje, pa se oni rijetko upotrebljavaju.

Strojevi s vlastitim uzbuđnim generatorom imaju na svojoj osovini posebni mali uzbuđni generator (još ga zovu uzbuđni dinamo, uzbuđnik i budilica) koji služi kao izvor uzbuđne struje za njihove magnetne. Takvi se strojevi upotrebljavaju uglavnom kao generatori, no i to dosta rijetko. Prednost im je u tome, što se uzbuđna struja za regulaciju napona može vrlo lako mijenjati, i to promjenom napona uzbuđnog generatora.



Sl. 231. Poredni istosmjerni stroj. Namot magneta je u porednom (paralelnom) spoju s namotom armature.



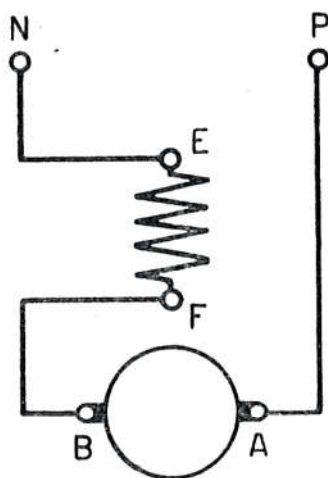
Sl. 232. Poredni istosmjerni stroj, shema spoja.

Kod **porednih storjeva** (slike 231. i 232.) namot magneta i namot armature nalaze se u porednom (paralelnom) spoju. Ovakvi se strojevi vrlo mnogo upotrebljavaju i kao generatori i kao motori.

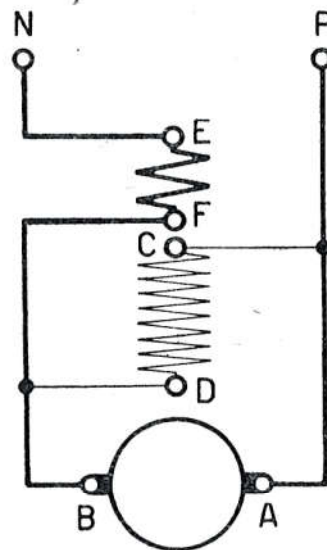
Karakteristika porednog stroja kao generatora je u tome, što mu je napon prilično stalan, konstantan, jer mu se uzbuđa ne mijenja znatno pri opterećenju. Prema jednadžbi $U = E - I_a R_a$ napon na stezaljkama opada, kad opterećenje raste, i to iz dva razloga. Prvi razlog je unutarnji pad napona u armaturi, a drugi je razlog u tome, što se pri porastu opterećenja smanjuje nešto i sama elektromotorna sila. Uzbuđna struja razmjerna je s naponom na stezaljkama generatora, jer su na taj napon priključeni magneti. A kako taj napon na stezaljkama opada, kad opterećenje raste, opada i uzbuđna struja, a s njom i inducirana elektromotorna sila. Osim toga inducirana elektromotorna sila opada pri porastu opterećenja i zbog reakcije armature, koja uzrokuje smanjenje magnetskog toka kroz stroj. Da se

nadoknadi, kompenzira to smanjenje napona, kako bi napon ostao stalan, mora se pri opterećenju pojačati uzbuda. A uzbuda se kod ovakvih generatora može vrlo lako mijenjati promjenljivim otpornikom u strujnom krugu magneta. U praznom hodu generatora uklopljen je u taj strujni krug neki otpornik, koji se postepeno isklapa, kako opterećenje raste, pa se otpor smanjuje. Na taj način se može lako mijenjati uzbuda, a s njome i napon.

Kako se poredni stroj vlada kao motor? Kako se vidi iz slika 231. i 232., i armatura i namot magneta priključeni su na uglavnom stalni napon mreže. Prema tome su stalne one dvije veličine, za koje smo u poglavlju 14.9. rekli da o njima ovisi brzina vrtnje motora, pa će i brzina vrtnje motora biti uglavnom konstantna. Poredni motor spada dakle među motore s približno konstantnom brzinom vrtnje,



Sl. 233. Serijski istosmjerni stroj, shema spoja. Namoti magneta i namot armature spojeni su u seriju.



Sl. 234. Kompaundni istosmjerni stroj, shema spoja. Magneti imaju po dva namota: jedan kao kod porednog stroja, a drugi kao kod serijskog stroja.

pa se upotrebljava tamo, gdje je — kod razdiobe istosmjernom strujom — poželjna odnosno potrebna takva konstantna brzina. Ipak, uključanjem promjenljivog otpornika u strujni krug magneta može se lako mijenjati uzbuda porednog motora, a time se može u širokim granicama i vrlo jednostavno regulirati njegova brzina. Ova jednostavna, a ujedno i ekonomična regulacija brzine porednih motora čini, da se oni dosta upotrebljavaju u industriji za zagon onih strojeva, gdje je važna regulacija brzine.

Serijski strojevi istosmjerne struje razlikuju se i kao generatori i kao motori bitno od porednih strojeva. Njihov način spoja prikazan je na slici 233. Kod njih su namoti magneta spojeni u seriju s namotom armature. Kako je struja armature jaka, a ta ista struja teče i kroz namote magneta, imaju namoti magneta takvih strojeva svega nekoliko zavoja debele žice, za razliku od porednih strojeva, kod kojih se namoti magneta sastoje od mnogo zavoja tanke žice.

Kad serijski stroj radi kao generator, onda, što je veće opterećenje, to i kroz namote magneta teče jača struja. Sериjski generator što je više opterećen, to je i jače uzbuđen, a to znači, da mu napon s opterećenjem

jako raste. U praznom hodu serijski generator ne daje uopće nikakav napon, jer, dok ne daje struju, dotle ni kroz namote njegovih magneta ne teče nikakva struja. Kod malih opterećenja napon serijskog generatora je malen, a kod velikih opterećenja je velik. Međutim, znamo otprije, da trošila traže više-manje stalan napon. Velika promjenljivost napona kod serijskog generatora je stoga razlogom, da se on normalno ne upotrebljava.

Sasvim je drukčije sa serijskim strojem kao motorom. Zbog nekih svojih osobina, on za neke vrste pogona ima prednosti pred svim električnim motorima uopće. Da te osobine uočimo, promotrimo, kako se on vlada pri promjenama opterećenja. U praznom hodu serijski će se motor okretati takvom brzinom, da će u njemu inducirana protuelektromotorna sila biti praktički jednaka narinutom naponu mreže. Zbog neznatnog otpora namota magneta i namota armature pad napona u motoru je posve neznatan u uporedbi s narinutim naponom. Pad napona nije baš velik ni pri opterećenju, ali se tada događa nešto drugo. Pri opterećenju i serijski motor mora uzeti jaču struju, da svlada opterećenje. No kako su namoti magneta u seriji s armaturom, prolazi ta jača struja ne samo kroz armaturu već i kroz namote magneta. Pri opterećenju serijskog motora znatno se pojačava uzbuda. Sjetimo se sada onoga, što smo rekli u poglavlju 14.9., a to je, da se s pojačanjem uzbude brzina motora razmjerno smanjuje. Pri porastu opterećenja brzina se serijskog motora ne smanjuje samo malo, kao kod porednog motora, već vrlo znatno. A upravo to znatno smanjenje brzine vrtnje pri porastu opterećenja je izvanredno vrijedna osobina serijskog motora i za mnoge pogone njegova glavna prednost. Zašto je to tako, najbolje ćemo vidjeti na konkretnom primjeru.

Uzmimo, da nekim serijskim motorom dižemo teret od 10 tona. Neka su brzina dizanja, napon motora i korisnost uređaja takvi, da motor pritom uzima iz mreže struju 100 A. Što će se dogoditi, ako nakon toga motor opteretimo dvostrukim teretom od 20 tona. Kad bi to bio poredni motor, tada bi on povukao iz mreže otprilike dvostruku struju, dakle približno 200 A. No serijski motor će na ovo povećanje tereta reagirati tako, da će mu se znatno smanjiti brzina vrtnje, a time i brzina dizanja tereta. Brzina dizanja će kod 20 tona iznositi samo možda 60% od brzine dizanja kod 10 tona. A umnožak između tereta i brzine dizanja mjerodavan je za snagu, koju treba obavljati. Kod 20 tona iznositi će dakle potrebna snaga za dizanje samo

$$\frac{20 \times 60\%}{10 \times 100\%} = 1,2$$

puta toliko, koliko kod 10 tona. Kako je kod istosmjernog stroja snaga = napon $\times$ struja, a napon je ostao konstantan, morat će se i struja povisiti za 1,2 puta, dakle na 120 A. Dakle samo na 120 A, a ne na 200 A kao kod porednog motora!

Serijski se motor prema tome vrlo dobro sam prilagođuje opterećenju. On može svladati velika opterećenja, a da mrežu pritom ne opterećuje znatno. On na takva opterećenja reagira znatnim smanjenjem brzine.

Kompaundni strojevi (slika 234.) jesu kombinacija porednih i serijskih strojeva. Kod takvih se strojeva namot magneta sastoji od dva dijela. Jedan dio od mnogo zavoja tanke žice spojen je paralelno s armaturom kao kod po-

rednih strojeva, a drugi dio od malo zavoja debele žice spojen je u seriju s armaturom kao kod serijskih strojeva.

Rekli smo, da kod porednog generatora napon na stezaljkama opada s opterećenjem, a kod serijskog generatora raste. Serijski namot kompaundnog generatora djeluje prema tome tako, da povišuje napon pri porastu opterećenja. Podesnim brojem zavoja serijskog namota može se postići, da taj serijski namot povišuje napon pri porastu opterećenja upravo za onoliko, za koliko bi on iz već poznatih razloga opao. Napon kompaundnog generatora može prema tome bez regulacije i pri punom opterećenju biti jednak kao i u praznom hodu. Čak se kadšto kompaundni generatori izvode tako, da napon pri punom opterećenju bude nešto viši (na pr. za 5%) nego u praznom hodu. Na taj način se može donekle kompenzirati (nadoknaditi) pad napona u vodovima pri opterećenju.

I poredni, i serijski i kompaundni strojevi su samouzbudni strojevi. Oni se sami uzbuđuju. Uzmimo na pr. poredni generator prema slici 231. U početku, kad ga okrenemo, između njegovih četkica ne postoji nikakav napon, pa prema tome ne teče nikakva struja ni kroz namote magneta. No svako željezo (čelik ili lijevano željezo), ako smo ga jedamput magnetizirali, ostaje nešto malo magnetično.* Tako i u magnetima našeg stroja preostaje nešto malo magnetizma, pa između njih postoji ipak neki slabašni magnetski tok. Zbog toga toka inducirat će se u armaturi ipak neka mala elektromotorna sila, pa će se i na četkicama A—B pojaviti neki mali napon. Zbog toga napona poteći će i kroz namote magneta neka mala uzbudna struja, koja će pojačati magnetski tok magneta. Stoga će se povećati i elektromotorna sila, a s njome i napon na stezaljkama. Time će se još pojačati uzbudna struja i t. d. — stroj se sam pomalo uzbuđi!

14.12. UGRIJAVANJE, GUBICI I KORISNOST ELEKTRIČNIH STROJEVA

Električni se strojevi u pogonu griju. Dva su glavna uzroka tom zagrijavanju:

1. Namoti električnih strojeva griju se to jače, što je struja jača. Iz Jouleova zakona znamo, da to zagrijavanje raste s kvadratom struje, t. j. da dvaput jača struja stvara 4 puta više topline, triput jača struja 9 puta više topline i t. d. Na ovo zagrijavanje strojeva troši se električna energija; ono dakle predstavlja gubitke. Te gubitke, koje stvara struja u namotima strojeva, nazivamo *gubicima u bakru*.

2. Kroz magnetski krug električnih strojeva (ili barem kroz jedan njegov dio) prolazi promjenljivi, izmjenični magnetski tok. On u čeliku stroja uzrokuje gubitke zbog premagnetiziranja i gubitke zbog vrtložnih struja, koje jednim imenom nazivamo *gubicima u željezu*, a koji također znače pretvaranje jednog dijela privedene energije u toplinu.

Osim toga nastaju gubici zbog trenja u ležajevima (uslijed čega se i ležajevi griju) te gubici zbog trenja rotora sa zrakom pri okretanju; ove posljednje nazivamo obično *gubicima ventilacije*. Gubici u željezu, gubici u ležajevima i gubici ventilacije nastaju i u praznom hodu, t. j. onda, kad stroj kao generator ne proizvodi nikakvu struju, odnosno kad stroj kao motor ne daje nikakvu snagu na osvinu. Stoga ove gubitke nazivamo *gubicima praznog hoda*.

* To je t. zv. remanentni magnetizam (remanentni — zaostali), vidi stranu 159. i 160.

Namoti električnih strojeva ne smiju se u pogonu ugrijati iznad izvjesne granice, jer bi se inače oštetila izolacija. Stoga elektrotehnički propisi propisuju najveće dozvoljeno ugrijavanje pojedinih dijelova električnih strojeva za različite vrste izolacije. Strojevi moraju biti građeni tako, da se pri nazivnom* naponu ne ugriju iznad te dozvoljene granice kad su opterećeni nazivnom* strujom, odnosno nazivnom* snagom. Preporuke Internacionalne elektrotehničke komisije (IEC**) i njemački propisi VDE**, koji se i kod nas dosta upotrebljavaju, dozvoljavaju ugrijanje namota strojeva s normalnom izolacijom za 60° C uz pretpostavku, da je temperatura okoline +40° C. Najviša temperatura normalno izoliranih namota ne smije prema tome biti veća od 40 + 60 = 100° C. Čelične jezgre, koje imaju utore s namotima, smiju se također ugrijati samo za 60° C, a čelične jezgre, koje nemaju utore s namotima, smiju se ugrijati i više, ali ne toliko, da bi to štetilo okolnim izoliranim dijelovima.

Ako bismo stroj previše opteretili, on bi se previše ugrijao. Ipak, stroj se smije kratkotrajno preopteretiti, ali pritom treba uvijek paziti, da temperatura njegovih namota ne prijeđe najveću dozvoljenu granicu.

Da se stroj u pogonu bolje hladi, nalaze se obično na njegovoj osovini krila ventilatora.

Kod svih strojeva (pa i neelektričnih) korisnost η jest:

$$\eta = \frac{\text{predana snaga}}{\text{primljena snaga}} = \frac{\text{predana snaga}}{\text{predana snaga} + \text{gubici}}$$

Nazivna snaga stroja, t. j. snaga za koju je stroj dimenzioniran i građen, jednaka je najvećoj predanoj snazi, koja je još dozvoljena s obzirom na ugrijavanje. Kod generatora predana snaga je ona električna snaga, koju on daje na svojim stezaljkama, a primljena snaga je ona mehanička snaga, koju mu na osovini daje zagonski stroj (na pr. parna turbina). Kod motora predana snaga je ona mehanička snaga, koju motor daje na svojoj osovini gonjenom stroju (na pr. bušilici), a primljena snaga je ona snaga, koju on uzima iz mreže. Približna korisnost η električnih strojeva navedena je u ovoj tablici:

Kod strojeva snage	0,1	1	10	100	1000	10000	kW
iznosi korisnost (približna srednja vrijednost)	65	74	83	91	93	96	%

14.13. ZAKRETNI MOMENT MOTORA

Zakretni moment je umnožak sile i kraka, na kojem sila djeluje (slika 235.). Ako zakretni moment označimo sa M , silu sa F (kg), a krak sile sa r , tada je:

$$M = Fr \text{ kilogrammetara.}$$

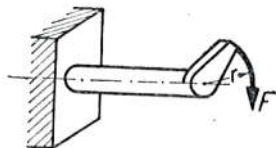
Kao što sila, koja djeluje u nekom smjeru, uzrokuje pravocrtno gibanje u tom smjeru, tako zakretni moment, koji djeluje oko neke osi, uzrokuje kružno gibanje oko te osi. Za veličinu zakretnog momenta sasvim je svedjedno, da li

* Nazivni napon, nazivna struja, nazivna snaga znači napon, struju odn. snagu, za koje je stroj dimenzioniran i građen.

** IEC je kratica engleskog naziva te Komisije: International Electrotechnical Commission (čitaj: Internešenel ilektrotekniki komišn). VDE je kratica za Verband Deutscher Elektrotechniker (Savez njemačkih elektrotehničara).

je sila velika, a krak mali, ili obratno. Važan je samo umnožak sile i kraka, na kojem ta sila djeluje.

Vodiči rotora elektromotora nalaze se u magnetskom polju. To magnetsko polje djeluje na te vodiče nekom silom. Krak sile na svaki pojedini vodič jednak je udaljenosti tog vodiča od osi motora.



Sl. 235. Zakretni moment je umnožak sile i kraka, na kojem ona djeluje:

$$M = Fr.$$

Kao što je snaga pri pravocrtном gibanju jednaka umnošku sile i brzine (t. j. sile i puta u jedinici vremena), tako je snaga pri okretanju jednaka umnošku zakretnog momenta i brzine vrtnje:

$$P = \frac{M n}{975} \text{ kilovata,}$$

gdje je M zakretni moment u kilogrammetrima, n broj okretaja u minuti, a faktor $1/975$ ovisi o upotrebljenim jedinicama. Odavle možemo izračunati, da je:

$$M = 975 \frac{P^{\text{kW}}}{n}.$$

Ako za P uvrstimo nazivnu snagu motora, a za n nazivnu brzinu vrtnje, izračunamo iz ove formule nazivni zakretni moment motora.

Iz ove formule se vidi, da je za istu snagu zakretni moment to manji, što je brzina motora veća. Kako o zakretnom momentu dobrim dijelom ovise dimenzije motora, vidi se, da je motor to manji (a time i to jeftiniji), što je njegova brzina veća. Elektromotor za 1500 okr/min znatno je manji i jeftiniji od elektromotora za 300 okr/min. Isto vrijedi i za generatore.

Na veličinu zakretnog momenta ne možemo nimalo utjecati izborom veće ili manje remenice ili zupčanika. Odaberemo li veću remenicu, bit će sila na remenicu manja, ali krak sile bit će veći nego kod manje remenice: Zakretni moment bit će u oba slučaja jednak. Sila u remenu bit će uz veću remenicu također manja, ali će brzina remena biti veća nego uz manju remenicu, pa će prenošena snaga biti u oba slučaja jednaka.

Za gonjenje nekog stroja potreban je izvjestan zakretni moment. Elektromotor treba tako odabrati, da njegov nazivni zakretni moment bude veći od zakretnog momenta potrebnog za gonjenje tog stroja. Osim toga najveći zakretni moment, koji elektromotor pri preopterećenju još može razviti, mora biti veći od najvećeg zakretnog momenta, koji je potreban za svladavanje preopterećenja, koja se u dotičnom pogonu mogu očekivati. Ako to ne bi bio, motor bi u pogonu pri preopterećenju stao.

Zakretni moment u času pokretanja nazivamo *potezni moment*.

14.14. MEHANIČKA ZAŠTITA ELEKTRIČNIH STROJEVA

Razlikujemo 4 vrste mehaničke zaštite strojeva:

1. Zaštita od dodira pokretnih dijelova i dijelova pod naponom,
2. zaštita od prodiranja stranih tijela i prašine,
3. zaštita od prodiranja vode,
4. specijalna zaštita.

Posve otvoreni stroj nije zaštićen ni od dodira, ni od prodiranja stranih tijela, ni od vode.

Kod zaštite od prodiranja stranih tijela razlikujemo zaštitu od velikih stranih tijela, zaštitu od malih stranih tijela i zaštitu od grube prašine. Stroj zaštićen od velikih odnosno od malih stranih tijela zaštićen je ujedno i od slučajnog dodira. Za zaštitu od malih stranih tijela upotrebljava se obično pokrov od rupičavog lima ili žičanog pletiva. Stroj zaštićen od grube prašine zaštićen je ujedno i od namjernog dodira. Takav je stroj sa svih strana zatvoren, ali ne hermetički. Cjevovodi za hlađenje treba da budu sami u sebe zatvoreni ili moraju svršavati izvan dotične prostorije.

U pogledu zaštite od prodiranja vode razlikujemo 3 vrste zaštite: od kapanja vode, od prskanja vode i od bujice. Stroj zaštićen od kapanja vode zaštićen je od vode samo odozgo. Na stroj zaštićen od prskanja voda smije prskati od okomitog do vodoravnog smjera. Stroj zaštićen od bujice zaštićen je od vode, koja dolazi bez osobitog pritiska iz bilo kojeg smjera.

Specijalnom zaštitom štite se strojevi od buktavih plinova i od eksplozije.

Kod elektromotora je obično dovoljno, da budu zaštićeni samo od slučajnog dodira, prodiranja velikih stranih tijela i kapanja vode. Takvi su motori gotovo jednako dobro hlađeni kao i posve otvoreni motori. No u prašnjavim pogonima (na pr. cementna industrija, mlinovi, djelomično tekstilna industrija) kao i na otvorenom potrebno je upotrebiti posve zatvorene motore. Kod njih je hlađenje znatno slabije. Oni se obično hlade samo površinski, pa imaju mnogo rebara radi povećanja površine, a time i boljeg dodira s rashladnim zrakom. Za jednaku snagu zatvoreni su motori veći od otvorenih, pa prema tome i skuplji.

14.15. TRANSFORMATORI

Djelovanje jednofaznih transformatora opisali smo već u poglavlju 9.17., a nekoliko spojeva trofaznih transformatora u poglavljima 10.4 i 10.5. Ovdje ćemo dopuniti tamošnja izlaganja.

Vidjeli smo, da transformator pretvara električnu energiju jednog napona u električnu energiju drugog napona, pri čemu vrijedi:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}, \quad P_1 \approx P_2, \quad f_1 = f_2.$$

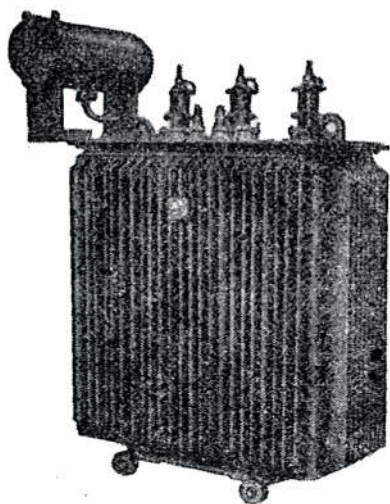
Ovi odnosi vrijede ne samo za jednofazne, već i za višefazne, pa prema tome i za trofazne transformatore.

Kako se snaga prenosi sa primarne strane na sekundarnu? Kad je transformator opterećen strujom I_2 , stvara ta struja kroz N_2 zavoja magnetomotornu silu $I_2 N_2$ amperzavoja u magnetskom krugu transformatora. Ta bi magnetomotorna sila htjela, da kroz magnetski krug progura magnetski tok protivnog smjera od onoga, koji postoji u praznom hodu, a koji inducira elektromotorne sile E_1 i E_2 . Kako elektromotorna sila E_1 uglavnom drži ravnotežu narinutom naponu U_1 , mora se ona održati, a to je moguće samo tako, da primarni namot povuče iz mreže struju I_1 tako jaku, da amperzavoji $I_1 N_1$ ne samo kompenziraju amperzavoje $I_2 N_2$, već da preostala magnetomotorna sila progura kroz

magnetski krug tok potreban za induciranje elektromotorne sile E_1 . Približno će biti $I_1 N_1 = I_2 N_2$ ili $\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$. A kako je $\frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2}$, to je $\frac{E_1}{E_2} \approx \frac{I_2}{I_1}$ ili $E_1 I_1 \approx E_2 I_2$ odnosno $P_{z1} \approx P_{z2}$: Primarni i sekundarni voltamperi približno su jednaki. Da i primarni i sekundarni vati ($P_1 \approx P_2$) moraju biti približno jednaki, proizlazi iz zakona o održanju energije.

Osnovni električki podaci transformatora jesu: prividna snaga (koja se obično izražuje u kVA ili, kod vrlo velikih transformatora, u MVA), frekvencija, za koju je građen (kod nas redovno 50 Hz), prijenosni omjer (t. j. omjer primarnog i sekundarnog napona u praznom hodu), napon kratkog spoja te kod trofaznih transformatora način spoja.

Napon kratkog spoja ustanovljuje se pokusom kratkog spoja transformatora. Sekundarne stezaljke spoje se kratko preko ampermetra (tako da se može mjeriti sekundarna struja), a napon na primarnim stezaljkama povišuje se od nule do one vrijednosti, kod koje kroz sekundarni namot transformatora teče nazivna struja. Taj napon nazivamo naponom kratkog spoja. On se obično izražava u procentima primarnog napona. *Napon kratkog spoja* je mjera za prividni otpor transformatora.



Sl. 236. Trofazni uljni transformator s prirodnim hlađenjem. Radi boljeg hlađenja kotao ima rebra.

Gubici u transformatoru i korisnost. U transformatoru nastaju gubici u bakru i gubici u željezu. Gubici u bakru ovise o opterećenju te su prema Jouleovu zakonu razmjerni s kvadratom struje. Pri polovičnom opterećenju gubici u bakru iznose svega 1/4 gubitaka pri punom opterećenju. Gubici u željezu praktički se ne mijenjaju s opterećenjem; oni su u praznom hodu praktički isti kao i pri punom opterećenju, pa ih nazivamo i gubici praznog hoda. Ti gubici uzrokuju, da je korisnost transformatora znatno lošija, kad je on slabo opterećen, nego kad je potpuno opterećen.

Izvedba transformatora. Da se smanje vrtložne struje, sastavljena je jezgra transformatora od tankih siliciranih* limova, koje nazivamo transformatorski limovi. Oko jezgre smješten je normalno najprije namot nižeg napona, a oko njega namot višeg napona. Normalno se cijeli namot smješta u kotao napunjen uljem, koje služi istovremeno i za povećanje izolacije i za hlađenje. Takvi transformatori hlađeni uljem nazivaju se uljni transformatori za razliku od suhih transformatora hlađenih zrakom, koji se danas za prijenos i razdiobu električne energije rijetko upotrebljavaju. Radi boljeg hlađenja potrebno je, da površina kotla uljnog transformatora bude što veća, pa se stoga kotao izvodi s rebrima (slika 236.), cijevima ili s radiatorima. Hlađenje ulja može biti pojačano ventilatorima, koji su prigrađeni uz kotao transformatora, a može biti i prisilno tako, da se ulje hladi u posebnom hladioniku. Pojačano ili prisilno hlađenje upotrebljava se samo kod velikih transformatora.

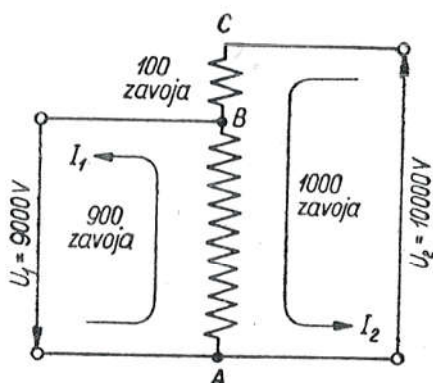
* Silicirani limovi su čelični limovi, koji sadrže stanoviti procenat silicija, čime se postizava, da im je otpor razmjerno vrlo velik.

14.17. REGULACIONI TRANSFORMATORI I AUTOTRANSFORMATORI

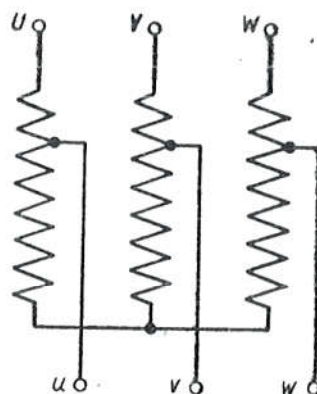
Regulacioni transformatori su u biti transformatori s odvojcima poput onoga na slici 238., samo što uvijek imaju znatno više odvojaka, a i s tom bitnom razlikom, da se preklapanje od jednog odvojka na drugi vrši pod opterećenjem.

Autotransformatori imaju samo jedan namot po fazi. Osnovni spoj jednofaznog autotransformatora prikazuje slika 240.

Evo kako autotransformator može sa samo jednim namotom povišavati ili snižavati napon. Uzmimo, da transformator na slici 240. ima svega 1000 zavoja, i to da je primarna strana priključena na svega 900 zavoja, a sekundarna strana na svih 1000. Narinemo li na primarne stezaljke napon 9000 V, autotransformator će se u praznom hodu vladati kao svitak sa čelikom. Struja, koju će on uzimati, bit će upravo tolika, da kroz zavoj autotransformatora proizvede magnetski tok potreban za induciranje elektromotorne sile približno jednake narinutom naponu. Elektromotorna sila inducirana u 900 zavoja iznositi će dakle približno 9000 V, odnosno približno 10 V po zavoju. No isti magnetski tok prolazi kroz još 100 zavoja uključenih u sekundarnoj strani, pa on u tim zavojima inducira također 10 V po zavoju t. j. ukupno još 1000 V. Na sekundarnim stezaljkama vladat će prema tome napon $9000 + 1000 = 10\,000$ V.



Sl. 240. Shema spoja jednofaznog autotransformatora.



Sl. 241. Shema spoja trofaznog autotransformatora.

Autotransformator iskorišćuje prema tome jedan dio primarnog namota kao sekundarni namot. I kod njega vrijedi:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}, \quad P_1 \approx P_2, \quad f_1 = f_2.$$

Osnovna prednost autotransformatora je u tome, da kroz dio namota, koji je zajednički primarnoj i sekundarnoj strani (A—B na slici 240.), teče samo razlika primarne i sekundarne struje $I_1 - I_2$, a puna struja teče samo kroz preostali dio namota (B—C na slici 240). Ako se autotransformatorom povišuje ili snižuje napon na pr. za 10%, tada samo 10% namota treba da bude dimenzionirano za punu struju, a 90% samo za razliku struja $I_1 - I_2$, koja je razmjerno vrlo mala. Kako autotransformator ktome ima svega jedan namot za primarnu i sekundarnu stranu, on je za jednaku snagu znatno manji od običnog transformatora, ako razlika primarnog i sekundarnog napona nije prevelika.

Obično se autotransformatori upotrebljavaju za povišivanje odnosno sniživanje napona do 25%.

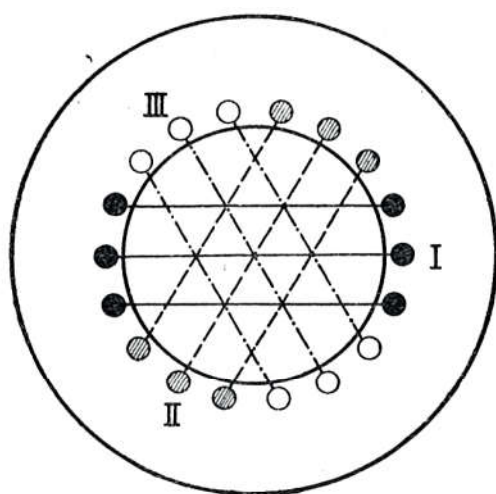
Kao i obični transformatori i autotransformatori za prijenos i razdiobu električne energije redovito se grade trofazno. Shemu spoja prikazuje slika 241.

Autotransformatori se dosta upotrebljavaju kao regulacioni transformatori.

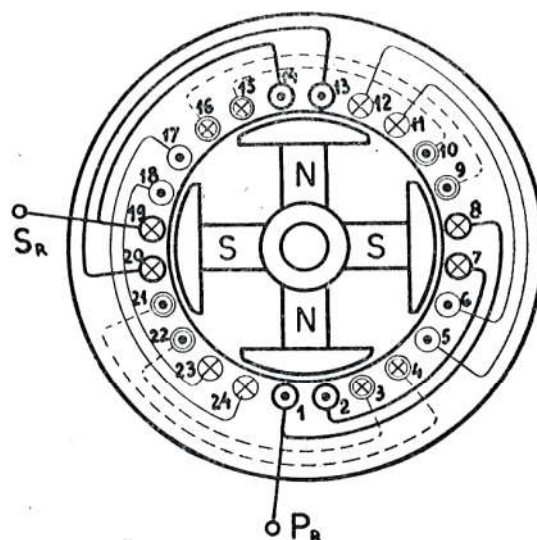
Zbog uštednje materijala prema običnoj konstrukciji autotransformatore često nazivaju štedni transformatori.

14.18. TROFAZNI SINHRONI GENERATORI

Trofazni sinhroni generatori upotrebljavaju se znatno više od svih drugih generatora. Za proizvodnju električne energije za javnu opskrbu danas se općenito upotrebljavaju gotovo samo oni. Jednofazni sinhroni generatori upotrebljavaju se rijetko, pa se na njih ne ćemo osvrnati.



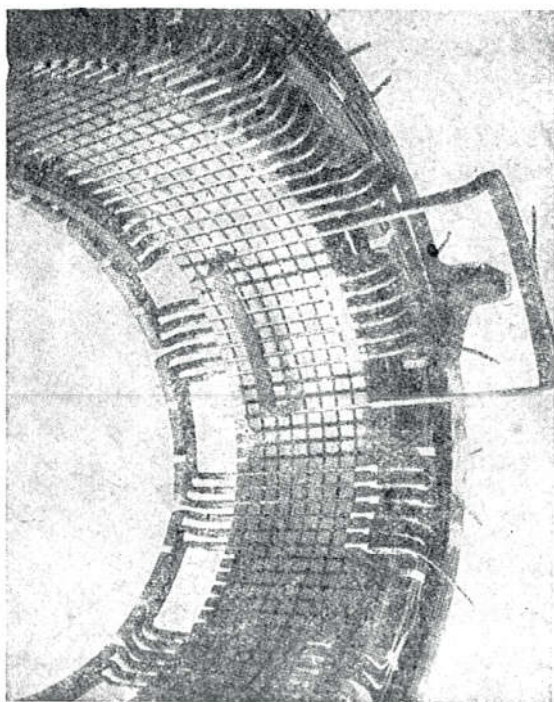
Sl. 242. Namoti statora smješteni su i kod sinhronih i kod asinhronih strojeva u utorima u statoru.



Sl. 243. Četvoropolni trofazni sinhroni stroj sa dva utora po polu i fazi.
 P_R — početak faze R, S_R — svršetak faze R.

Konstrukcija trofaznih sinhronih generatora vrlo je različita, i to ne samo s obzirom na snagu, za koju su građeni, već još više s obzirom na brzinu, kojom se okreću. No svi oni u načelu rade kao onaj primitivni generator, prikazan shematski na slici 163. Svi imaju na rotoru elektromagnete uzbuđene istosmjernom strujom, a u statoru proizvode trofaznu struju. Za razliku od istosmjernih strojeva magneti su kod njih uvijek na rotoru. Razlog za to je jednostavnija konstrukcija. Armaturom se kod sinhronih strojeva naziva stator.

No trofazni namot statora nije nikad smješten na istaknute polove kao na slici 163., već uvijek jednoliko porazdijeljen u utoke u statoru (slike 242., 243. i 244.). Namot svake faze sastoji se od jednog ili više svitaka, kojih su vodiči smješteni u utoke. Os namota svake faze nalazi se u osi svitka dotične faze uzravo tako, kao što se kod istaknutih polova nalazi u sredini odnosno u osi pola.

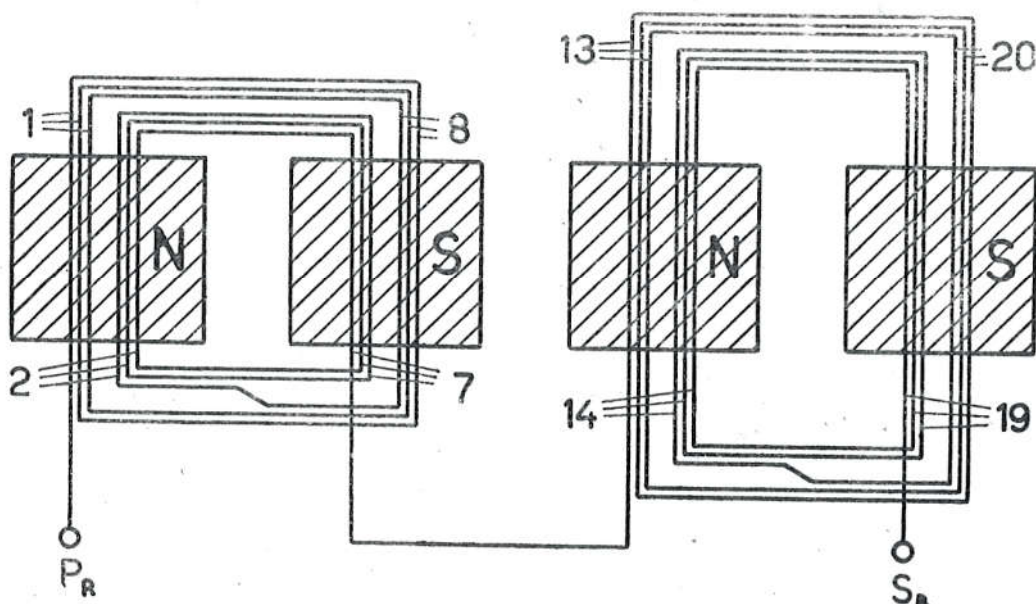


Sl. 244. Namot statora trofaznog sinhronog stroja sa 12 polova. Namot statora trofaznih strojeva uvijek je smješten u utore.

Ti pojedini svici spojeni su u seriju, kako je to shematski prikazano na slici 245. (samo za fazu R). Ostale dvije faze spojene su na isti način. Ispod pojedinih svitaka na slici 245. naznačeni su crtkano polovi, koji na slici 243. stoje uz njih.

Kao istosmjerni strojevi, i trofazni strojevi (generatori i motori) mogu imati više od dva pola. Četvoropolni trofazni sinhroni stroj prikazan je shematski na slici 243. Namot takvih strojeva može biti izveden na različite načine, ali uvijek tako, da bude (kao i kod jednofaznih strojeva, vidi sliku 135.) ispunjeno pravilo: Dok je jedna strana svitka pod jednim polom, mora druga strana svitka biti pod susjednim protivnim polom.

Stroj na slici 243. ima dva utora po polu i fazi. Redovito se u takvom utoru ne nalazi samo jedan vodič, već nekoliko međusobno izoliranih vodiča, koji zajedno čine svitak. Jedan takav svitak vidi se dobro na slici 244., jer je ponešto izvučen iz statora. Iz tog svitka strši jedan vodič, koji služi za spoj s drugim takvim svitkom. Jedan takav svitak kod generatora na slici 243. čine vodiči u utorima 1 i 8, drugi svitak čine vodiči u utorima 2 i 7, treći svitak vodiči u utorima 13 i 20, četvrti svitak vodič u utorima 14 i 19. Sve su ovo svici faze R. Svaka druga faza generatora na slici 243. ima također 4 svitka.



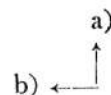
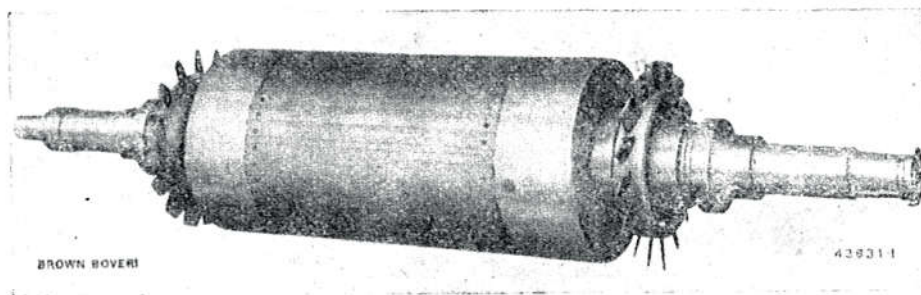
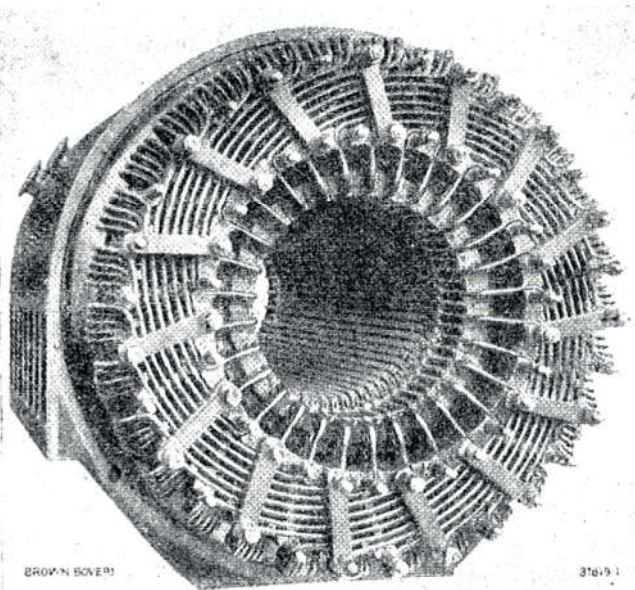
Sl. 245. Shema namota jedne faze četvoropolnog stroja sa slike 243.

U poglavlju 9.3. objasnili smo, da kod četvoropolnih strojeva izmjenične struje jedna perioda nastaje već kod polovice okretaja, kod šestoropolnih kod trećine i t. d. To isto vrijedi i kod trofaznih strojeva. Odnos između brzine

vrtnje (t. j. broja okretaja u minuti), frekvencije i broja polova možemo čak jednostavno i matematički izraziti. Ako označimo sa n broj okretaja u minuti, onda je broj okretaja u sekundi $n : 60$. A kod dvopolnih strojeva znamo: koliko okretaja u sekundi, toliko perioda u sekundi, t. j. tolika je frekvencija; označimo je sa f , pa dobijemo

$$f = \frac{n}{60}$$

Kod četvoropolnih strojeva, t. j. kod 2 para polova, frekvencija će uz istu brzinu vrtnje biti dvaput veća, jer kod svakog okretaja nastaju dvije periode. Kod šestoropol-



Sl. 246. Veliki trofazni sinhroni turbogenerator:
a) stator, b) rotor

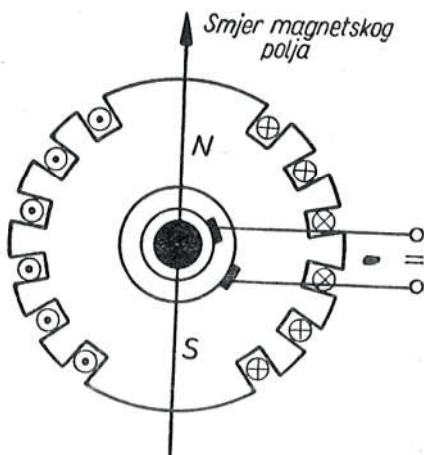
nih strojeva, t. j. kod 3 para polova, frekvencija će biti triput veća, jer sad kod svakog okretaja nastaju tri periode. Općenito će frekvencija biti toliko puta veća, koliko pari polova imamo:

$$f = \frac{np}{60}$$

gdje smo sa p označili broj pari polova. Ova jednadžba vrijedi za sinhronne generatore i za sinhronne motore. Za našu normalnu frekvenciju $f = 50$ Hz možemo izračunati brojeve okretaja kod strojeva s raznim brojem polova:

za dvopolni stroj	$p = 1, n = 3000$ okr./min
za četvoropolni stroj	$p = 2, n = 1500$ „
za šestoropolni stroj	$p = 3, n = 1000$ „
za osmoropolni stroj	$p = 4, n = 750$ „
za desetoropolni stroj	$p = 5, n = 600$ „
i t. d.	

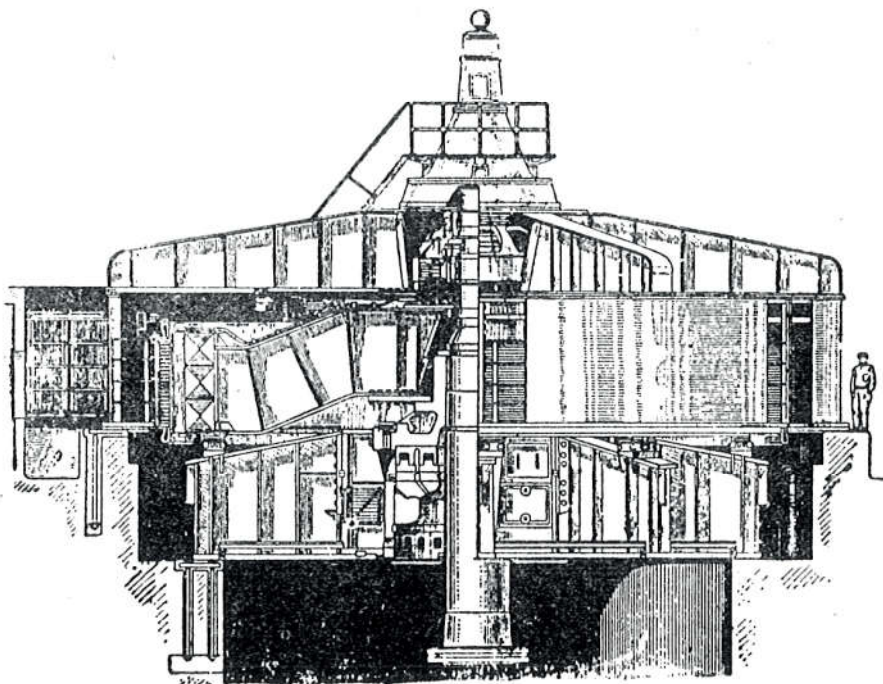
Brzina sinhronih generatora ovisi uglavnom o karakteristikama zagon-skog stroja. Ako je to parna turbina, tada će brzina vrtnje generatora redovno biti najveća moguća, dakle 3000 okr./min., jer je parna turbina to ekonomičnija, što joj je brzina veća. Ako je to vodna turbina, tada će brzina vrtnje biti mala: možda svega 300 okr./min, a možda još manje.



Sl. 247. Rotor turbogeneratora nema istaknutih polova. Namot je smješten u utore, a proizvodi magnetsko polje kao i istaknuti polovi.

Generatori velike brzine vrtnje vezani s parnim turbinama nazivaju se *turbogeneratori*, a agregat (slog) parna turbina + turbogenerator naziva se *turboagregat* (turboslog). Turbogeneratori ne smiju imati istaknute polove kao oni na slikama 134. i 243., jer bi se razletjeli zbog ogromnih sila, koje nastaju pri velikim brzinama. Stoga su rotor takvih generatora nalik na masivni čelični cilindar, kako se vidi na slici 246.b. U utorima takvog cilindra smješten je namot, koji ga magnetizira tako, da je s jedne strane plašta cilindra sjeverni, a s druge južni pol (slika 247.). Utori su zatvoreni klinovima (na pr. brončanim), koji sprečavaju, da namot pri okretanju ne izleti iz utora.

Generatori, koji tjeraju vodne turbine, imaju uvijek veliki broj polova. Osobito veliki broj polova imaju generatori u onim velikim hidroelektranama, kod kojih je pad vode malen. Takvi generatori imaju 30 do 60, pa i više po-



Sl. 248. Veliki trofazni sinhroni hidrogenerator.

lova, a nalaze se obično na vertikalnoj osovini iznad vodne turbine. Generatori spojeni s vodnim turbinama nazivaju se *hidrogeneratori*. Jedan takav hidrogenerator prikazuje slika 248.

14.19. REGULACIJA NAPONA SINHRONIH GENERATORA

Elektromotorna sila inducirana u statoru generatora to je veća, što je magnetski tok veći i što se generator brže vrti. Budući da brzina vrtnje mora biti stalna (jer o njoj ovisi frekvencija, a ona mora biti stalna), može se inducirana elektromotorna sila, a time i napon, mijenjati samo mijenjanjem magnetskog toka, t. j. mijenjanjem uzbuđene. Što će uzbuđna struja biti jača, proizvedeni napon će uz inače jednake prilike biti viši i obratno. Hoćemo li dakle regulirati napon generatora, moramo regulirati uzbuđnu struju.

No uzbuđnu struju moramo regulirati i onda, ako hoćemo držati stalan napon pri svim opterećenjima. Napon na stezaljkama mijenja se naime s opterećenjem. On opada, ako je opterećenje djelatno, a još jače opada, ako je generator induktivno opterećen. Ako je generator, naprotiv, kapacitivno opterećen*, napon na stezaljkama može, uz istu uzbuđ, biti viši nego u praznom hodu.

I kod sinhronih generatora naime dolazi pri opterećenju do reakcije armature. Struja, koja teče kroz armaturu (stator), proizvodi magnetsko polje armature, koje se zajedno sa glavnim poljem magnetastavlja u ukupno polje. Polje magnetast je rotaciono polje, jer rotira zajedno s magnetima, ali i polje armature je rotaciono polje, koje rotira istom brzinom. Znamo naime iz poglavlja 10.2, da trofazna struja u trofaznom namotu proizvodi rotaciono polje. Pri djelatnom i induktivnom opterećenju polje armature slabi polje magnetast, pa se napon na stezaljkama smanji; naprotiv, pri kapacitivnom opterećenju polje armature podupire polje magnetast.

Uzbuđna struja za sinhroni generator dobije se iz posebnog uzbuđnog istosmjernog generatora, takozvanog uzbuđnog dinamast. Turbogeneratori imaju taj uzbuđni dinamast gotovo uvijek na vlastitoj osovinu, a kod hidrogeneratora on se često nalazi posebno, tjeran od asinhronog motora. Regulacija napona sinhronog generatora svodi se ustvari na regulaciju uzbuđnog dinamast. Ona se danas kod većih generatora vrši automatski.

14.20. PARALELNI RAD SINHRONIH GENERATORA

Jedan sinhroni generator radi danas sam samo u kakvoj industrijskoj ili rudarskoj elektrani ili kod opskrbe kakvog manjeg područja, kamo još nisu doprli vodovi visokog napona, koji se napajaju od velikih elektrana. Inače gotovo uvijek radi nekoliko sinhronih generatora (u istoj ili u nekoliko elektrana) paralelno.

Da dva sinhrona generatora, koji stoje jedan kraj drugoga u istoj elektrani, mogu raditi paralelno, moraju biti ispunjena ova tri uvjeta:

1. Moraju se okretati posve jednakom brzinom,** t. j. moraju proizvoditi napon sasvim jednake frekvencije.

2. Proizvedeni naponi moraju biti u fazi, t. j. promjene napona u paralelno spojenim faznim vodičima moraju biti istovremene.

3. Proizvedeni naponi moraju biti jednaki.

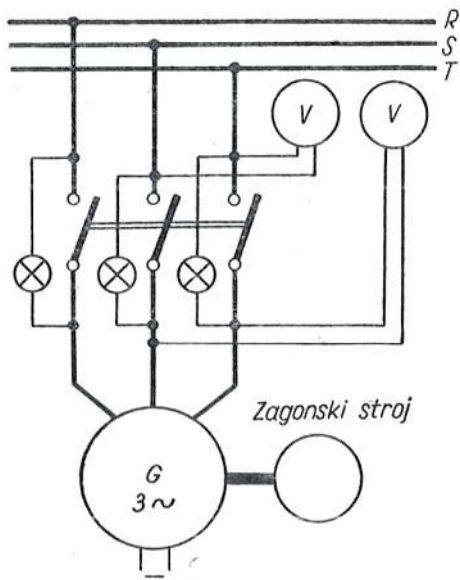
Za paralelno uklapanje služi nam uređaj za sinhroniziranje, koji nam pokazuje trenutak, u kojem su ispunjena navedena 3 uvjeta. Najjednostavniji takav uređaj pokazuje slika 249., i to za sinhroniziranje gene-

* To se dosta rijetko dešava, i to uglavnom samo onda, kad inače neopterećeni generator napaja razgranatu, a neopterećenu kabelsku mrežu ili dugačke vodove vrlo visokog napona, koji na kraju nisu opterećeni.

** Ako imaju isti broj polova; inače se moraju okretati točno onom brzinom, koja odgovara njihovom broju polova.

ratora sa sabirnicama*, na koje već rade drugi generatori. Voltmetri služe za pokazivanje jednakosti napona, a žarulje za pokazivanje jednakosti frekvencije i faze.

Hoćemo li neki generator uklopiti paralelno s drugim generatorom, koji je već u pogonu, treba da ga najprije pomoću zagonskog stroja dovedemo na približno istu (»sinhronu«) brzinu, zatim da mu udešavanjem uzbude udesimo



Sl. 249. Načelna shema spoja za sinhroniziranje generatora na sabirnice, na koje već rade drugi generatori.

približno isti napon. Dok frekvencija nije jednaka, žarulje naizmjenično trnu i pale. Kad je frekvencija već približno jednaka, one polako trnu i ponovo pale. Udešavanjem regulatora zagonskog stroja treba postići posve jednaku frekvenciju, pa u trenutku, kad žarulje utrnu, uklopiti generator, jer je u tom trenutku postignuta jednakost faza.

Kod postrojenja visokog napona voltmetri i žarulje priključene su preko naponskih transformatora**.

Kad je generator uklopljen, pa radi paralelno s drugim, on ne će bez kvara ispasti iz tog paralelnog rada ili — kako još kažemo — ispasti iz koraka. Njega u sinhronizmu, t. j. na istoj brzini, drži sinhronizirajuća sila, pa sve kad bi ga zagonski stroj i prestao tjerati, on bi se dalje vrtio kao sinhroni motor.

Nakon uklapanja generator je neopterećen. Želimo li, da generator preuzme opterećenje, treba jače potjerati zagonski stroj; ako je to na pr. parna turbina, treba djelovati na njezin regulator tako, da pusti više pare u turbinu. Ona će tada nastojati, da brže potjera generator. To joj doduše zbog sinhronizirajuće sile ne će uspjeti, ali će rotor pomaknuti nešto prema naprijed u odnosu na rotaciono polje statora, a to će uzrokovati, da će generator preuzeti opterećenje. Što više pare privedemo turbini, to će generator preuzeti veće opterećenje, i obratno. Kad hoćemo zaustaviti generator, najprije obustavimo dovod pare turbini; time ga rasteretimo, pa ga onda pomoću sklopke isključimo. Ako je to zbog hitnosti potrebno, pomoću sklopke se generator može isključiti i pod punim opterećenjem.

Nikakvim reguliranjem uzbude ne može se sinhroni generator ni opteretiti djelatnom snagom ni rasteretiti od nje.***. Ako povećamo uzbudu, povišio bi se napon generatora, kad bi on bio sam. Ako on međutim radi paralelno s mnogim generatorima u nekoj velikoj mreži, tada će se povećanjem njegove uzbude samo neznatno povišiti napon mreže, ali će se generator tim povećati

* Sabirnice su vodiči, koji su u neku ruku okosnica transformatorske stanice odn. električnog dijela elektrane. Na njih su priključeni svi pojni vodovi (na pr. od generatora) te svi odlazni vodovi. Sva energija dolazi na sabirnice i odatle se razvodi.

** To su mjerni transformatori (obično jednofazni), koji rade na posve jednakom principu kao i obični transformatori, a služe za to, da u postrojenjima visokog napona transformiraju visoki napon u niski (obično 100 V), na koji su priključeni mjerni instrumenti i releji.

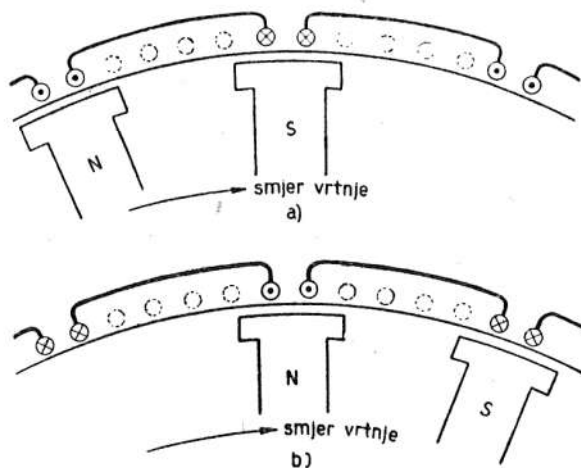
*** U tome je osnovna razlika prema istosmjernim generatorima, gdje se opterećenje udešava udešavanjem uzbude.

njem uzbude potaknuti, da u mrežu daje induktivnu jalovu snagu, t. j. da se induktivno optereti. Uz izvjesnu uzbudu generator će proizvoditi samo djelatnu snagu. Uzbudimo li ga iznad toga, on će proizvoditi induktivnu jalovu snagu, uzbudimo li ga ispod toga, proizvodit će kapacitivnu jalovu snagu. *Mijenjanjem uzbude sinhronog generatora u paralelnom radu mijenjamo njegovo jalovo opterećenje.*

Evo zašto je tome tako: Ako generatoru pojačamo uzbudu, on bi htio povisiti napon mreže, ali to drugi generatori ne daju. Ne preostaje mu drugo, nego da se induktivno optereti, jer pri induktivnom opterećenju — kako smo već rekli — reakcija armature slabi polje magneta, pa time kompenzira pojačanje uzbude. Oslabimo li uzbudu ispod neke mjere, generator će se kapacitivno opteretiti, jer pri kapacitivnom opterećenju reakcija armature jača polje magneta, pa time kompenzira oslabljenje uzbude.

14.21. SINHRONI MOTORI

Sinhroni se motori razmjerno malo upotrebljavaju, jer imaju dvije velike mane: Treba im izvor istosmjerne struje za uzbudu i teško se pokreću. Da se oni ipak ponekad upotrebljavaju, treba zahvaliti uglavnom jednoj njihovoj znatnoj prednosti. Regulacijom uzbude može se i sinhronom motoru (kao i sinhronom generatoru) po volji udesiti $\cos \varphi$. Oni mogu stoga da rade i sa $\cos \varphi = 1$, a mogu čak poslužiti i za poboljšavanje faktora snage. Ako služe samo u tu svrhu, tada se nazivaju *sinhroni kompenzatori*.



Sl. 250. Sinhroni motor mora se okretati točno onom brzinom, koja odgovara frekvenciji i broju polova. On se okreće sinhrono s rotacionim poljem.

Brzina vrtnje sinhronih motora ovisi samo i jedino o frekvenciji i broju polova, a nimalo o opterećenju i o narinutom naponu. Da to objasnimo, prikazan je na slici 250. isječak višepolnog sinhronog motora. Preglednosti radi nacrtan je samo jedan par polova N i S i namot samo jedne faze R. U momentu prikazanom na slici 250.a baš je u fazi R maksimum struje, pa se u tom momentu moraju i magnetni polovi nalaziti nasuprot tom namotu. Magnetsko polje magneta djeluje na vodiče izvjesnom silom, pa bi ih htjelo pomaknuti u smjeru određenom pravilom lijeve ruke.

No budući da su vodiči čvrsto smješteni u statoru i ne mogu se pomaknuti, a polovi su naprotiv pomični, pokretat će ta ista sila polove u suprotnom smjeru, koji je na slici 250. naznačen kao smjer vrtnje. Pola periode kasnije bit će u fazi R struja opet u maksimumu, samo u obrnutom smjeru, kako je to prikazano na slici 250.b. Da smjer sile ostane isti, moraju sada polovi N biti tamo, gdje su pola periode ranije bili polovi S, a polovi S tamo, gdje su bili polovi N. Rotor se dakle mora okretati takvom brzinom, da se za vrijeme od pola periode okrene upravo toliko, koliko je potrebno, da polovi N dođu na mjesto polova S i obratno. Brzina vrtnje rotora mora stoga sasvim točno odgovarati frekvenciji

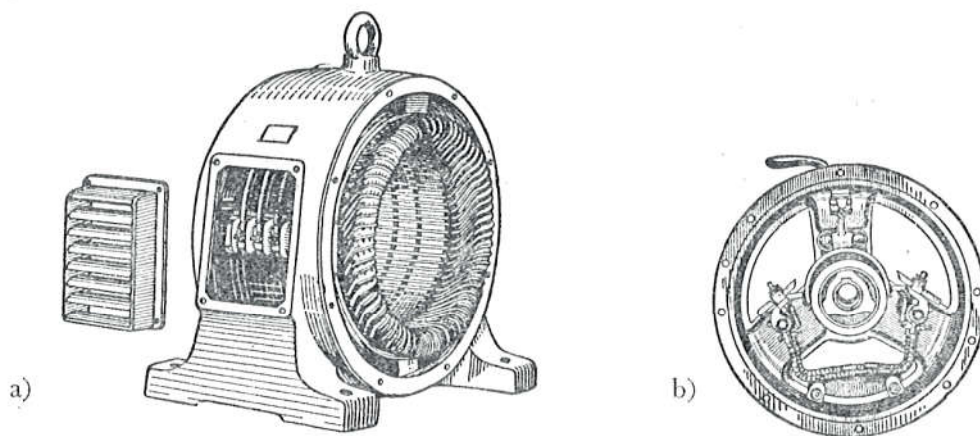
struje. Kad ona ne bi sasvim točno odgovarala, desilo bi se, da na polove djeluje sila čaš u jednom, čaš u drugom smjeru, pa se motor uopće ne bi mogao okretati.

Zašto sinhroni motor ne će sam krenuti, također je jasno iz slike 250. Uzmimo, da se rotor u čašu pokretanja nalazi u položaju prema slici 250.a. U tom bi momentu na nj djelovala sila, koja bi ga htjela pokrenuti u naznačenom smjeru vrtnje. No pola periode kasnije, a to je kod $f = 50 \text{ Hz}$ svega $1/100$ sekunde kasnije, smjer se struje promijenio, i na motor djeluje jednaka sila kao prije, samo u protivnom smjeru. Ta se promjena smjera struje, a s njom i smjera sile, zbila prije, nego što se rotor mogao iole znatnije pomaknuti. Motor bi stoga samo podrhtavao, ali ne bi mogao krenuti.

Sinhroni se motori pokreću na dva načina: ili pomoću posebnog indukcionog motora ili pomoću posebnog kratko spojenog namota. Danas se uglavnom upotrebljava ovaj drugi način, pa se sinhroni motori grade tako, da se u polna stopala umeću bakreni štapovi, koji su s jedne i druge strane međusobno spojeni bakrenim prstenovima. Tako nastaje pomoćni namot, koji je u biti jednak kaveznom rotoru asinhronog motora prema slici 169. Stroj se pokreće kao indukcionni motor, pa kad postigne svoju asinhronu brzinu, uklopi se uzbuda magneta istosmjernom strujom. Sinhronizirajuća sila povuče tada motor u sinhronizam.

14.22. TROFAZNI INDUKCIONI MOTORI

Već smo u poglavlju 10.2. objasnili u najglavnijim crtama rad trofaznih indukcionih (asinhronih) motora. Sad ćemo razmotriti još neke njihove najvažnije karakteristike. Na generatore ne ćemo se osvrnati, jer se oni vrlo



Sl. 251. Trofazni indukcionni (asinhroni) motor: a) stator, b) nosač ležaja s napravom za kratko spajanje kliznih koluta i podizanje četkica.

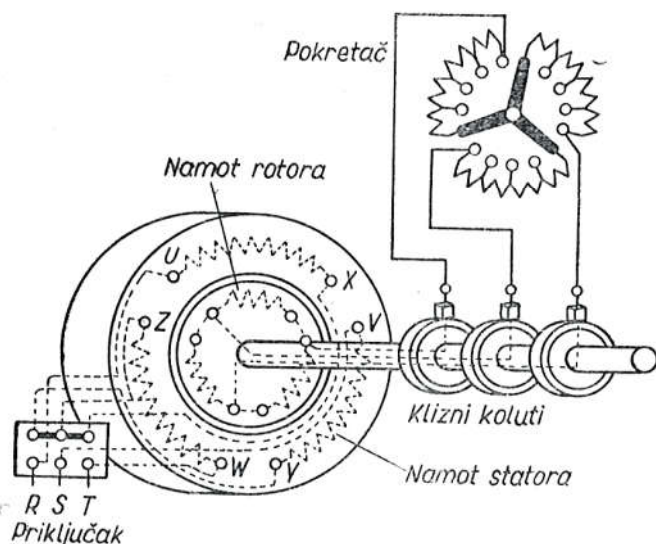
rijetko upotrebljavaju. No zato su trofazni indukcionni strojevi kao motori najjednostavniji, najjeftiniji i najsigurniji motori za većinu praktičnih potreba.

Stator indukcionih strojeva građen je u načelu jednako kao i kod sinhronih strojeva. Na statoru nema istaknutih polova, već je namot smješten u utore.

Ono međutim, u čemu se indukcionni stroj bitno razlikuje od sinhronog stroja, jest rotor. Prema konstrukciji rotora razlikujemo dvije vrste indukcionih motora:

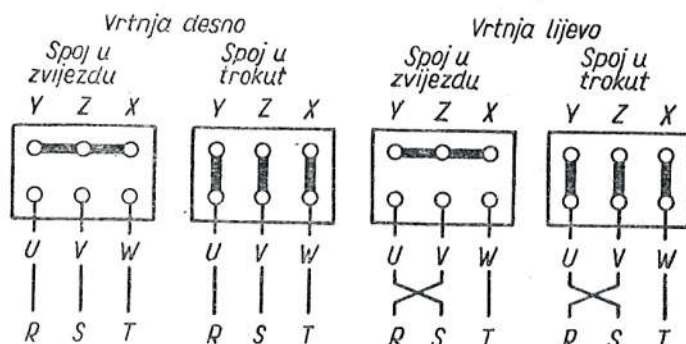
- a) kavezni motori ili motori s kaveznim rotorom,
- b) kolutni motori ili motori s kliznim kolutima.

Kavezni motori ili motori s kaveznim rotorom imaju rotor sličan kavezu poput onoga na slici 169. »Namt« tih rotora sastoji se od štapova, koji su s obje strane međusobno kratko spojeni. To su najjednostavniji i najjeftiniji elektromotori uopće.



Sl. 252. Shema spoja trofaznog indukcionog kolutnog motora: spoj statora na priključnu pločicu i rotora preko kliznih koluta na pokretač.

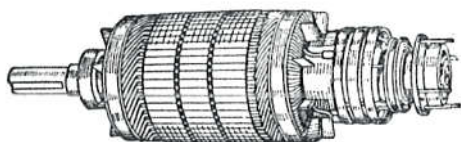
Sl. 253. Spojevi na priključnoj pločici za vrtnju lijevo i desno te za spoj statora u zvijezdu ili trokut.



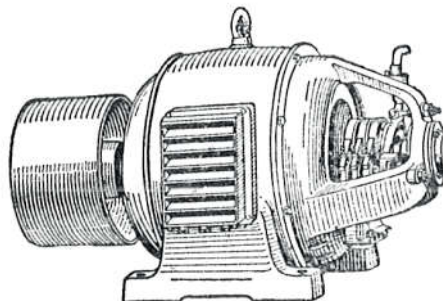
Kolutni motori ili motori s kliznim kolutima imaju na rotoru 3 klizna koluta, koji su spojeni s krajevima namota, kako je to shematski prikazano na slici 252. Preko tih kliznih koluta može se u strujni krug rotora uključiti promjenljivi otpornik, koji služi za pokretanje ili za regulaciju brzine vrtnje, o čemu ćemo još govoriti. Rotor s kliznim kolutima prikazan je na slici 254.a, a cijeli motor s takvim rotorom na slici 254.b.

Kako djeluje asinhroni motor? Objasnimo to na kaveznom motoru kao na najjednostavnijem. Čim motor uklopimo, statorom će poteći struja, koja će proizvesti rotaciono polje. Brzina vrtnje tog rotacionog polja ovisi samo o frekvenciji. Ako je frekvencija 50 Hz, rotaciono polje okreće se brzinom od 50 okretaja u sekundi, odnosno $50 \times 60 = 3000$ okretaja u minuti. Dok se rotor još nije zaletio, rotaciono će polje sjeći njegove vodiče ogrom-

nom brzinom, koja odgovara brzini rotacionog polja od 3000 okretaja u minuti. U vodičima rotora induciraju se zbog toga vrlo velike elektromotorne sile, koje u njemu prouzrokuju vrlo jake struje. Već smo kod transformatora vidjeli, da će struja i u primarnom namotu biti jača, što je struja u sekundarnom namotu jača (t. j. što je opterećenje veće), jer te dvije struje stoje u



Sl. 254.a. Rotor trofaznog indukcionog motora.



Sl. 254.b. Trofazni indukcionni motor — nezaštićena izvedba (mehanički).

točno određenom međusobnom odnosu. No i indukcionni motor je zapravo vrst transformatora, kod čega je namot rotora sekundarni, a namot statora primarni namot. Velika struja u rotoru izazvat će stoga i u statoru veliku struju, pa će takav motor u času pokretanja proizvesti u mreži, na koju je priključen, jaki udarac struje, odnosno veliki momentani gubitak napona. Vrlo slično kao što bi se to dogodilo i kod istosmjernih motora, kad bismo ih priključili direktno na mrežu, bez pokretača.

Kad se indukcionni motor jedamput zaleti, onda se njegova struja sama regulira prema trenutnom opterećenju. Svakom opterećenju odgovara naime izvjesna struja. Tu struju proizvodi elektromotorna sila inducirana u rotoru. Stoga brzina rotora mora biti upravo onoliko manja od brzine rotacionog polja, da to polje siječe vodiče rotora onom brzinom, koja je potrebna, da se inducira baš ta elektromotorna sila.

Dakle, u pogonu se indukcionni motor sam regulira (kao i svaki drugi elektromotor), ali pri pokretanju smiju se samo posve mali motori priključiti neposredno na mrežu. Veći motori uzrokovali bi tako velike momentane gubitke napona, da poduzeća, koja vrše javnu opskrbu električnom energijom, ne dopuštaju takav priključak s obzirom na ostala trošila priključena na mrežu. Iole veći indukcionni motori moraju stoga imati posebni uređaj za pokretanje ili im rotor mora biti građen na naročit način.

Kao i sinhroni strojevi, tako i indukcionni strojevi mogu imati više od dva pola. Kao i kod sinhronih strojeva tako i ovdje, što je veći broj polova, to je brzina vrtnje stroja manja. Dok se sinhroni motori okreću uvijek točno onom brzinom, koja odgovara frekvenciji struje i njihovu broju polova, dotle se indukcionni motori okreću uvijek nešto, za nekoliko procenata, manjom brzinom. Dakle kod 50 Hz ne se 3000, 1500, 1000 i t. d. okretaja u minuti, već s kojih 2880, 1440, 960 i t. d. okretaja u minuti. Uzrok tome znamo.

Stator indukcionnog motora može se spojiti u trokut ili u zvijezdu. Da se omogući jednostavno prespajanje iz spoja u trokut u spoj u zvijezdu i obratno, izvedeni su krajevi namota na priključnu pločicu motora tako, kako to prikazuju slike 252. i 253. Pomoću spojnice na priključnoj pločici

motor se lako može spojiti u trokut ili u zvijezdu. Tako se svaki trofazni indukcijski motor može upotrebiti za dva napona, na pr. za 380 i 220 V. Za viši napon motor mora biti spojen u zvijezdu.

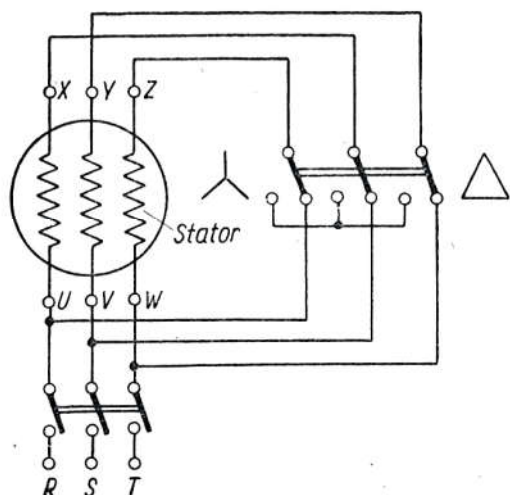
Promjena smjera vrtnje asinhronog motora lako se postigne međusobnom zamjenom priključaka na bilo koje dvije stezaljke. Time se promijeni smjer vrtnje rotacionog polja, a s njim i smjer vrtnje motora (slika 253.).

Ako se trofaznom asinhronom motoru, dok je u pogonu, prekine dovod u jednoj fazi, on će se dalje okretati kao jednofazni motor. Pritom će struja u preostale dvije faze znatno porasti, pa postoji opasnost, da motor bude preopterećen. Ako se takav motor zaustavi, on se sam više ne će pokrenuti.

14.23. POKRETANJE I REGULIRANJE BRZINE INDUKCIJSKIH MOTORA

Ima dva načina za pokretanje indukcijskih motora, koji omogućuju, da struja pri pokretanju ne prijeđe dozvoljene granice.

Prvi je: smanjenje napona narinutog statoru za vrijeme pokretanja. To se može postići pomoću otpornika u strujnom krugu statora, pokretača, slično kao kod istosmjernih strojeva, ili pomoću promjenljivog transformatora. Najjednostavnije se, međutim, smanjenje napona pri pokretanju može postići pomoću takozvane *preklopke zvijezda — trokut* (slika 255.).



Sl. 255. Preklopka zvijezda-trokut: Pri pokretanju stator asinhronog motora spojen je u zvijezdu, a nakon zaleta motora prespoji se pomoću ove preklopke u trokut.

Pri pokretanju stator je spojen u zvijezdu, pa svaka njegova faza dobiva napon 220 V (ako je napon mreže 380/220 V). Kad se je motor zaletio, preklapimo njegov statorski namot u trokut, pa sada svaka faza dobiva 1,73 puta viši napon, t. j. 380 V. Pokretanje pomoću preklopke zvijezda — trokut primjenjuje se vrlo često kod malih i srednjih motora.

No smanjenje napona narinutog statoru ima ipak jednu vrlo lošu stranu. Motori, koji se tako pokreću, ne mogu pri pokretanju povući veliki teret. Oni se stoga moraju pokretati neopterećeni ili slabo opterećeni. Uopće, motori s kaveznim rotorom, poput onoga na slici 169., ne vuku kod pokretanja najbolje. Stoga se veći motori izvode s rotorom sa kliznim kolutom (prema slikama 252. i 254.). Preko tih kliznih koluta može se u strujni krug rotora uključiti otpornik, koji može služiti i kao pokretač i kao regulator brzine vrtnje.

Pri pokretanju inducira se u rotoru velika elektromotorna sila, koja bi uzrokovala veliku struju. No ako uključimo preko kliznih koluta u strujni krug rotora dovoljno veliki otpornik, ne će ta struja moći prijeći određenu granicu. Pri zaletavanju stroja taj otpornik pomalo isklapamo, a kad se motor zaletio, isklapimo ga potpuno, jer u njemu po Jouleovu zakonu nastaju

znatni gubici zbog stvaranja topline. U normalnom pogonu poželjno je, da otpor namota rotora bude što manji, kako bi i gubici bili što manji. Stoga na vrlo mnogim motorima postoji uređaj, koji omogućuje, da se namot rotora nakon pokretanja na samom motoru kratko spoji, a četkice na kliznim kolutima da se podignu (kako bi se smanjilo trenje i njihovo trošenje).

Međutim, otpornik u strujnom krugu rotora može nam poslužiti još za nešto: za *regulaciju brzine vrtnje motora*. Brzina indukcionog motora malo se mijenja: od praznog hoda do punog opterećenja tek za nekoliko procenata. U tome je indukcionni stroj sličan porednom istosmjernom motoru. Kod frekvencije 50 Hz rotaciono polje okreće se brzinom od 3000 okretaja u minuti, a rotor indukcionog motora pri potpunom opterećenju okreće se s kojih 2880 okretaja u minuti. Smanjenje brzine motora mogli bismo postići smanjenjem frekvencije. No ona je redovito stalna i ne de sa tako lako mijenjati. Ali brzinu možemo po volji smanjiti i uključenjem dovoljno velikog otpora u strujni krug rotora. Struja u rotoru ovisi samo o opterećenju: pri velikom opterećenju ona je velika, pri malom opterećenju ona je mala. Ona ne ovisi o otporu rotorskog strujnog kruga. Ali što je veći taj otpor, to će se morati inducirati veća elektromotorna sila, da proizvede potrebnu struju. To je samo tako moguće, da se motor polaganije okreće, jer će onda rotaciono polje brže sjeći njegove vodiče. Takva regulacija brzine je vrlo jednostavna. No ona je, na žalost, i vrlo neekonomična, jer u otporniku za reguliranje nastaju zbog ugrijavanja znatni gubici energije, pa se korisnost motora jako smanjuje. Stoga, ako otpornik u strujnom krugu rotora služi ne samo za pokretanje, već i za regulaciju brzine, mora on biti znatno jače dimenzioniran, jer se u njemu trajno stvara velika toplota.

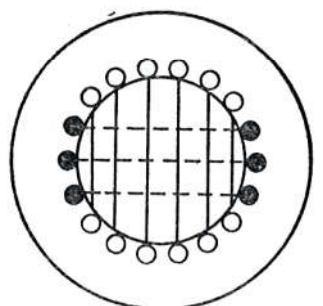
Ima i drugih, ekonomičnijih načina za reguliranje brzine indukcionog motora, ali nijedan nije baš sasvim jednostavan. Poteškoća u regulaciji brzine može se stoga smatrati najvećom manom inače tako odličnih indukcionih motora.

14.24. JEDNOFAZNI INDUKCIONI MOTORI

Rotor takvih motora je kavezni ili trofazni rotor s kliznim kolutima, a na statoru je — dvofazni namot. Budući da jednofazni namot stvara samo pulzirajuće izmjenično polje, a ne rotaciono polje, takav motor ne bi mogao sam krenuti, kao ni trofazni motor, kojemu je prekinut dovod u jednoj fazi. Međutim, iz izvjesnih razloga, u koje se ne ćemo upuštati, kad bi takav motor na neki način potjerali, on bi se dalje sam okretao. *Motor s jednofaznim namotom razvija zakretni moment samo kad se vrti.*

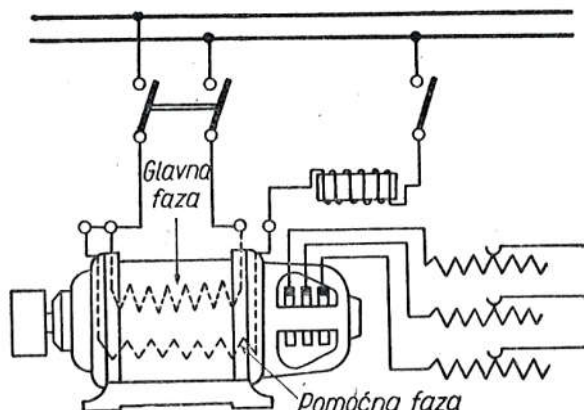
Da se omogući pokretanje jednofaznih motora, namota se na stator osim glavnog namota još i pomoćni namot. Pritom glavni namot obično zauzima 2/3 opsega statora, a pomoćni namot 1/3 (slika 256.). Struja u pomoćnom namotu mora biti pomaknuta u fazi prema struji u glavnom namotu, a to se postizava tako, da se u seriju s pomoćnim namotom spoji prigušnica (svitak sa čelikom) (slika 257.) ili kondenzator. Motor se tada pokreće kao dvofazni motor, koji također razvija rotaciono polje. Ako se za pomak faze u pomoćnom namotu upotrebi svitak, tada se on isklopi, pošto se motor zaletio, jer bi pogoršavao $\cos \varphi$ motora, a ako se upotrebi kondenzator, on ostaje stalno uklopljen, jer popravlja $\cos \varphi$.

Stator jednofaznog indukcionog motora može biti građen trofazno kao i stator trofaznog indukcionog motora, odn. i normalni trofazni motor može se upotrebiti kao jednofazni uz uvjet, da se na prikladan način spoji i da se na-



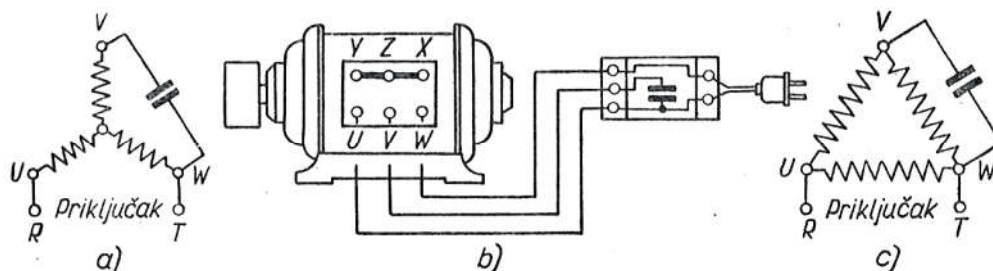
○ namot glavne faze
● namot pomoćne faze

Sl. 256. Namot statora jednofaznog indukcionog motora sastoji se od namota glavne faze i namota pomoćne faze.



Sl. 257. Priključak jednofaznog indukcionog motora s pomoćnom fazom, u kojoj je prigušnica.

mot jedne faze upotrebi kao pomoćni namot, sa svitkom u seriji ili kondenzatorom paralelno. Spoj s kondenzatorom prikazuje slika 258. Pri upotrebi trofaznog motora kao jednofaznog treba paziti na ispravan napon.



Sl. 258. Jednofazni kondenzatorski indukcioni motor s trofaznim namotom statora: a) spoj u zvijezdu, b) priključak kod spoja u zvijezdu, c) spoj u trokut. (Priključak kod spoja u trokut je jednak kao kod spoja u zvijezdu, samo na priključnoj pločici treba izmijeniti spoj prema slici 253. za spoj u trokut.)

Jednofazni motor je skuplji od jednako jakog trofaznog motora i lošiji od njega. Upotrebljava se stoga samo tamo, gdje nema mogućnosti trofaznog priključka ili je takav priključak otežčan, i to uglavnom samo za male snage.

14.25. JEDNOFAZNI I TROFAZNI KOLEKTORSKI MOTORI

Kolektorski motori, jednofazni i trofazni, mnogo su skuplji od indukcionih motora. Da se oni ipak upotrebljavaju u praksi, razlogom je činjenica, da se brzina indukcionih motora ne da jednostavno i ekonomično regulirati. Ipak se teži, da se za takve zagone, gdje je potrebna regulacija brzine, upotrebi istosmjerna struja, koja se pomoću pretvarača ili usmjerivača može dobiti iz trofazne.

a) Jednofazni serijski motori

Istosmjerni motor ne mijenja smjer, ako međusobno zamijenimo priključak dovodnih vodiča na priključnoj pločici. Prema tome čini se, da bismo ga mogli priključiti i na izmjenični napon, budući da to u biti nije drugo,

nego da mu neprestano, mnogo puta u sekundi, mijenjamo priključak. Ipak istosmjerni motor ne smijemo nikada priključiti na izmjenični napon, jer je statorski vijenac njegovog magnetskog kruga od lijevanog željeza, lijevanog ili valjanog čelika, uvijek dakle od masivnog komada, a i jezgre polova magneteta vrlo su često također masivne. Kod priključka na izmjenični napon kroz te bi masivne dijelove prolazio izmjenični magnetski tok, pa bi ih vrtložne struje ubrzo usijale.

Jednofazni serijski motor razlikuje se od istosmjernog serijskog motora po tome:

1. što mu je stator sastavljen od tankih međusobno izoliranih limova, da vrtložne struje ne budu prevelike, i

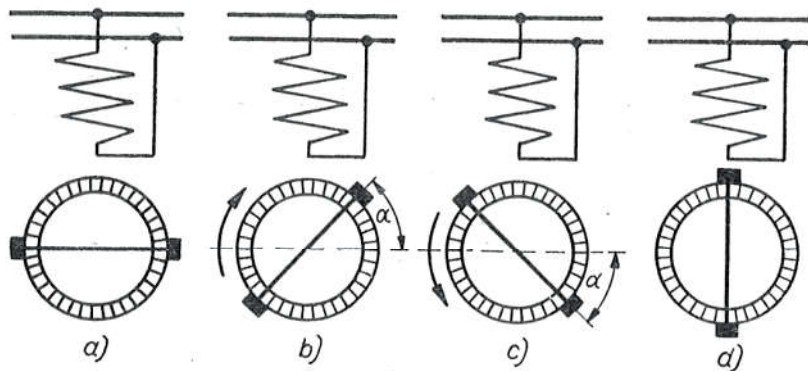
2. što uvijek mora imati kompenzacioni namot poput onoga na slici 230., jer bi inače takav motor zbog vrlo velikog induktiviteta radio s izvanredno lošim $\cos \varphi$, pa bi uzimao razmjerno vrlo veliku struju. Takvim kompenzacionim namotom struja teče u smjeru protivnom od onoga, kojim teče kroz armaturu.

Takvi se motori pokreću pomoću transformatora za pokretanje, pomoću kojega im se napon pomalo povisuje.

Po svojim karakteristikama ti su motori slični istosmjernim serijskim motorima. Mogu se upotrebiti i za istosmjernu i za izmjeničnu struju, pa ih nazivaju univerzalni motori.

b) Repulzionni motori*

Ti se motori osnivaju na principu, da se svitak prema magnetskom polju nastoji uvijek postaviti tako, da kroza nj prolazi što manji magnetski tok. Shemu spoja prikazuje slika 259. Stator stvara izmjenični magnetski tok, koji prolazi kroz motor. Četkice na rotoru kratko su spojene i mogu se pomicati. Kad su četkice u položaju prema slici 259.a (neutralni položaj), kroz namot rotora ne prolazi magnetski tok, i u njemu se ne inducira struja, on miruje. Ako četkice zakrenemo za neki kut α (slika 259. b ili 259. c), rotor će se okretati u smjeru protivnom tom zakretu,



Sl. 259. Shema spoja repulzionog motora i položaj četkica: a) pri pokretanju, b) za vrtnju desno, c) za vrtnju lijevo, d) ovaj položaj nije dozvoljen.

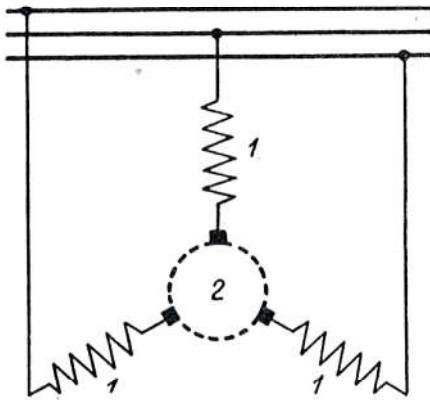
i to tim brže, što su četkice više pomaknute iz neutralnog položaja. Pomicanjem četkica repulzionog motora može se dakle jednostavno regulirati njegova brzina vrtnje, a i promijeniti smjer okretanja. U položaju četkica prema slici 259 d motor se ponaša kao kratko spojeni transformator. U tom položaju četkica motor bi ubrzo pregorio.

Repulzionni motori rijetko se upotrebljavaju u praksi zbog svoje skupoće i osjetljivosti. Više (ali još uvijek rijetko) upotrebljavaju se nešto preinačeni repulzionni motori s dva para četkica: jednim pomičnim parom, a drugim nepomičnim. Takvi se motori nazivaju Dérijevi motori.

* »Repulzija« je riječ latinskog porijekla, a znači odbijanje.

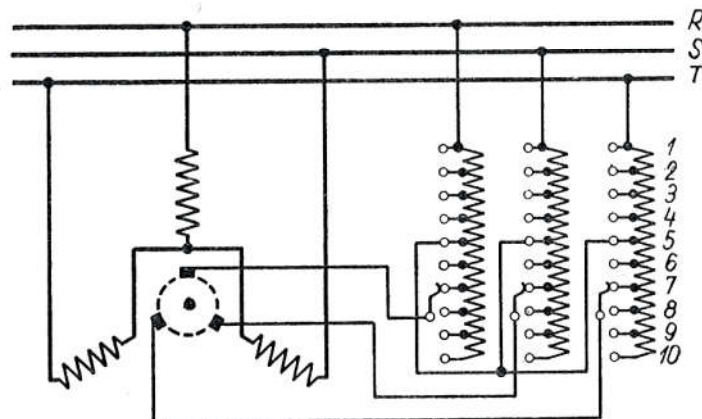
c) Trofazni kolektorski motori

Ima dosta različitih izvedaba tih motora. Svima je zajedničko to, da imaju sam u sebe zavoreni namot, koji je spojen na kolektor kao i kod istosmjernih strojeva, a po kolektoru klize 3 četkice pomaknute međusobno za 120° .



Sl. 260. Shema spoja trofaznog kolektorskog serijskog motora: 1 - namot statora, 2 - namot rotora.

Slika 260. prikazuje načelnu shemu spoja trofaznog serijskog motora, kojemu je namot rotora spojen preko četkica u seriju s namotom statora. Obično je između namota statora i namota rotora priključen transformator, koji transformira na niži napon, jer rotor ne smije dobiti previše visoki napon. Karakteristika tih motora slična je karakteristici istosmjernih serijskih motora, t. j. brzina vrtnje im se znatno smanjuje s opterećenjem. Brzina i smjer vrtnje reguliraju se pomicanjem četkica kao i kod repulzionog motora.



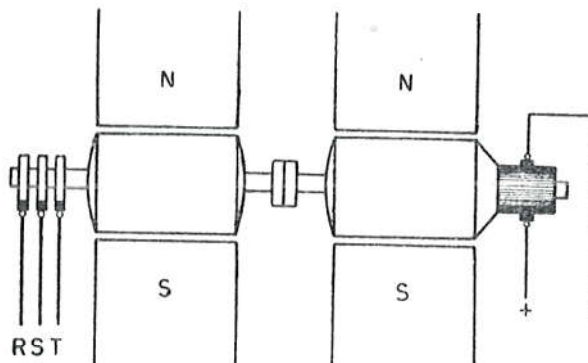
Sl. 261. Shema spoja trofaznog kolektorskog porednog motora s autotransformatorom za regulaciju brzine.

Slika 261. prikazuje trofazni poredni motor, kojemu se preko regulacionog autotransformatora na četkice može narinuti po volji veliki napon. U položaju 5 autotransformatora četkice su kratko spojene i motor se vlada kao obični indukcionni motor. U položajima 1 do 4 napon narinut četkicama u protufazi je s elektromotornom silom induciranom u rotoru. Motor se mora okretati sporije, da se inducira veća elektromotorna sila, koja može svladati taj protunapon i još proizvesti potrebnu struju. U položajima 6 do 10 napon narinut četkicama podupire elektromotornu silu induciranu u rotoru po se motor mora okretati brže, čak iznad sinhronizma, da se u rotoru proizvede elektromotorna sila obratnog smjera, koja s narinutim naponom daje baš napon nužan za proizvodnju potrebne struje. Kod tih se motora pomicanjem četkica može regulirati i $\cos \varphi$. Takav motor može raditi i s $\cos \varphi = 1$, pa čak i popravljati faktor snage. Karakteristika tih motora jednaka je karakteristici običnih indukcionnih motora, t. j. brzina vrtnje im se vrlo malo smanjuje s opterećenjem. Velika razlika je ipak u tome, što se ta brzina može u širokim granicama regulirati bez gubitaka i što je $\cos \varphi$ povoljniji.

14.26. PRETVARAČI

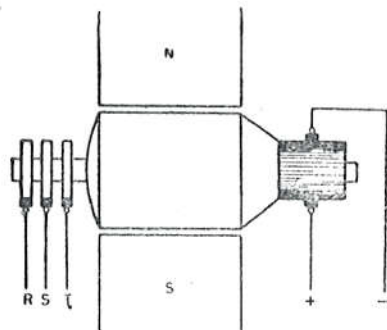
Pretvarači su takvi strojevi, koji električnu energiju jedne vrste pretvaraju u električnu energiju druge vrste, na pr. od trofazne struje u istosmjernu ili obratno.

Sl. 262. Agregat za pretvorbu trofazne struje u istosmjernu sastoji se od trofaznog sinhronog ili indukcionog stroja kao motora i istosmjernog stroja kao generatora.



Trofaznu struju možemo pretvoriti u istosmjernu najjednostavnije tako, da spojimo u jedan agregat dva stroja: trofazni sinhroni ili indukcion motor i istosmjerni generator, kako je to prikazano na slici 262. Istosmjerni generator daje nam istosmjernu struju, a za njegov zagon mora sinhroni motor uzimati iz trofazne mreže trofaznu struju.

Uređaj prema slici 262. može vršiti i obratnu funkciju: pomoću njega može se istosmjerna struja pretvarati u trofaznu. U tom slučaju istosmjerni stroj radi kao motor, a sinhroni stroj kao generator.



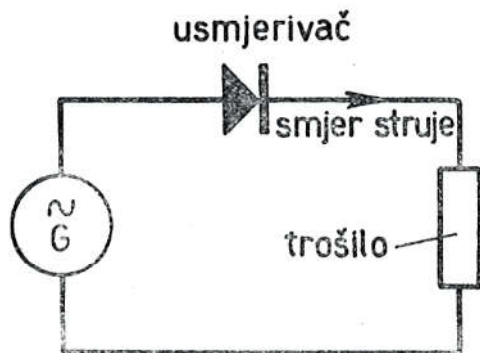
Sl. 263. Jednoarmaturni pretvarač: s jedne strane na armaturu preko kliznih koluta ulazi trofazna struja, s druge strane preko kolektora izlazi istosmjerna struja.

Pretvorba trofazne struje u istosmjernu i obratno može se vršiti ne samo pomoću dva stroja kao na slici 262. već i jednim jedinim strojem, t. zv. jednoarmaturnim pretvaračem. Jednoarmaturni pretvarač (slika 263.) kao da je nastao stapanjem trofaznog sinhronog stroja i istosmjernog stroja. Njegov namot rotora (armature) s jedne je strane spojen na 3 klizna koluta te preko njih na vodove istosmjerne struje. Treba naglasiti, da je kod jednoarmaturnog pretvarača omjer trofaznog napona prema istosmjernom potpuno određen izvedbom pretvarača te se ne može mijenjati. Ako dakle hoćemo mijenjati visinu istosmjernog napona, koji ovakav pretvarač daje, moramo — na pr. pomoću regulacionog transformatora — mijenjati visinu trofaznog napona, koji je pretvaraču narinut.

15. USMJERIVAČI I PROMJENJIVAČI

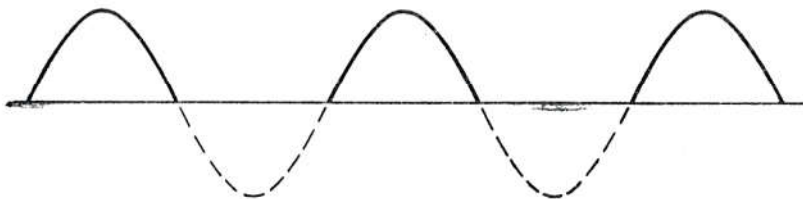
15.1. OPĆENITO O USMJERIVAČIMA

Usmjerivači* su aparati, koji služe za pretvaranje izmjenične odnosno trofazne struje u istosmjernu. Od pretvarača se razlikuju po tome, što su pretvarači strojevi. Dok pretvarači vrše pretvorbu struje jedne vrste u struju druge vrste posredstvom gibanja svojih dijelova (okretanjem), dotle usmjerivači nemaju dijelova, koji se u pogonu gibaju.



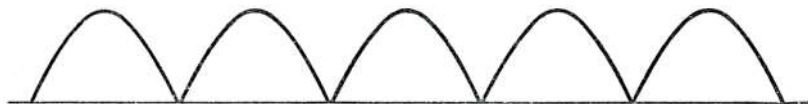
Sl. 264. Usmjerivač je ventil, koji propušta struju samo u jednom smjeru.

»progutao« usmjerivač. Takvo usmjerivanje izmjenične struje, koje se vrši samo za vrijeme jedne poluperiode, naziva se *polovično usmjerivanje*.



Sl. 265. Krivulja polovično usmjerenog napona.

Pomoću usmjerivača može se postići i to, da se usmjere obje polovine izmjenične struje. U tu svrhu treba usmjerivače spojiti na prikladan način, o čemu će biti govora pri opisu pojedinih tipova usmjerivača. Krivulja usmjerenog napona izgleda tada kao na slici 266. Ovakvo se usmjerivanje naziva *potpuno usmjerivanje*. Napon pulzira i pri takvom usmjerivanju, ali ipak znatno manje nego pri polovičnom usmjerivanju.



Sl. 266. Krivulja potpuno usmjerenog napona.

Prema principu, na kojemu se osnivaju, usmjerivači se dijele uglavnom na:

- suhe usmjerivače,
- tekućinske elektrolitske usmjerivače,
- elektronke — usmjerivače,
- usmjerivače sa živinom parom (živine usmjerivače),
- kontaktne usmjerivače.

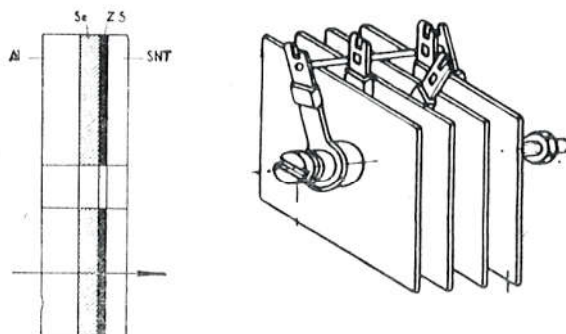
* Ili »ispravljači«, kako također nazivaju takve aparate.

15.2. SUHI USMJERIVAČI

Najjednostavniji usmjerivači jesu suhi usmjerivači. A od ovih su najjednostavniji kristalni detektori, poznati iz radiotehnike.

Takav se detektor sastoji od prikladnog kristala (na pr. olovnog sjajnika), obuhvaćenog metalom (jedna stezaljka), dok na kristal pritište metalna igla (druga stezaljka). Neki naime kristali imaju svojstvo, da propuštaju struju samo u jednom smjeru, a to se baš traži od usmjerivača. Kristalni detektori mogu, međutim, poslužiti za usmjerivanje samo vrlo slabih struja, na pr. u radiotehnici.

Suhi usmjerivači za veće struje imaju kontakte na velikoj površini. Grade se na različite načine, a svi iskorišćuju pojavu, da se na dodirnoj površini između nekih metala i poluvodiča stvara zaporni sloj, koji struju

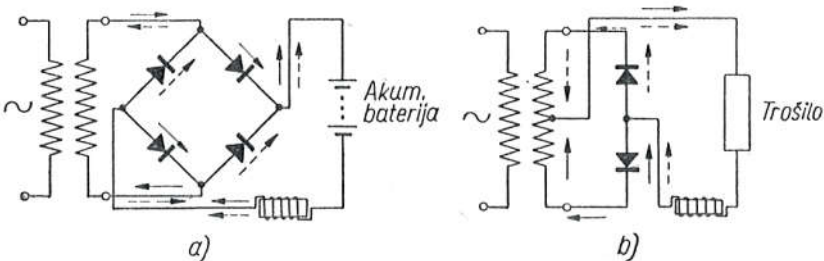


Sl. 267. Selenski usmjerivač. a) Lijevo: Principijelni sastav ploče: Al — aluminij, Se — selen, ZS — zaporni sloj, SNT — slitina niskog tališta. b) Desno: Usmjerivač sa 4 ploče za Graetzov spoj prema slici 268.

u jednom smjeru lako propušta, a u drugom gotovo nikako. Na slici 267. prikazana je principijelna građa i spoj selenskog usmjerivača. Strelica pokazuje smjer, u kojem usmjerivač propušta struju*.

Selenski usmjerivači su danas jedini suhi usmjerivači sa širokom praktičnom upotrebom. Usmjerivači sa bakrenim oksidom, koji su se prije mnogo upotrebljavali, primjenjuju se danas samo još za usmjerivanje slabih struja, i to u ograničenoj mjeri. Jedna selenska ploča prema slici 267. može podnijeti

Sl. 268. — Spojevi suhih usmjerivača za potpuno usmjerivanje: a) mosni ili Graetzov (čitaj: Grecov) spoj, b) spoj sa specijalnim transformatorom. Puna strelica pokazuje smjer struje za vrijeme jedne poluperiode, a crtkana za vrijeme druge poluperiode.



izmjenični napon do kojih 20 V efektivne vrijednosti. Viši napon ne smije se narinuti na ploču, jer bi ona propuštala znatnu struju i u drugom smjeru. Selenske ploče smiju se opteretiti sa kojih 20 mA po cm^2 (bez umjetnog hlađenja), a izrađuju se u raznim veličinama (kod nas od 2,5 do 100 cm^2). Spajanjem ploča u seriju i paralelno te ovakvih grupa u posebne spojeve za potpuno usmjerivanje mogu se dobiti usmjerivači za razne napone i struje. Obično se takvi usmjerivači izrađuju za razmjerno slabe struje i za napone od 4 do 250 V, ali ima izvedaba i za visoke napone i za struje do nekoliko hiljada A.

U najnovije vrijeme se velike nade polažu u razvoj germanijskih i silicijskih usmjerivača (na osnovu elemenata germanija odn. silicija).

* I ovdje valja imati na umu, da je smjer gibanja elektrona obratan od smjera struje (vidi stranu 58.). Smjer propuštanja elektrona prema tome je baš obratan od onoga, koji je naznačen na slici. Elektroni mogu proći kroz zaporni sloj uvijek samo od vodiča prema poluvodiču.

Slika 268.a i b prikazuje dva spoja suhih usmjerivača za potpuno usmjerivanje pri punjenju akumulatora. Spoj prema slici 268.a je običniji: to je takozvani *mosni ili Graetzov (Grecov) spoj*. Pune strelice pokazuju smjer struje za vrijeme jedne poluperiode, a crtkane strelice za vrijeme druge poluperiode. Kako se vidi, struja kroz akumulatorsku bateriju ima isti smjer za vrijeme jedne i druge poluperiode. Kod spoja prema slici 268.b transformator ima odvojak u sredini sekundarnog namota. Pune i crtkane strelice i opet pokazuju smjer struje za vrijeme jedne i druge poluperiode. Kako vidimo, za vrijeme jedne poluperiode radi jedna polovica sekundarnog namota, a druga je mrtva; za vrijeme druge poluperiode baš je obratno.



Sl. 269. Krivulja potpuno usmjerene struje izravnane prigušnim svitkom.

Na slici 268. spojena je u seriju s akumulatorskom baterijom prigušnica. Čemu to? Bez prigušnice krivulja napona, a s njom i krivulja struje punjenja izgledala bi kao na slici 266. Napon i struja bi jako pulzirali. U prigušnici se međutim inducira elektromotorna sila samoindukcije, koja se protivi takvim promjenama struje. Na taj način prigušnica izravnavala valovitost usmjerenog napona, pa krivulja napona izgleda kao na slici 269. Napon i sada pulzira, ali razmjerno manje.

Pomoću suhih usmjerivača može se usmjeriti i trofazna struja. Tada usmjereni napon znatno manje pulzira nego istosmjerni napon dobiven usmjerivanjem jednofazne struje.

15.3. TEKUĆINSKI ELEKTROLITSKI USMJERIVAČI

Stavimo li neke metale u prikladan elektrolit, oni se ubrzo prevuku slojem, koji struju propušta samo u jednom smjeru. I ta se pojava iskorišćuje za gradnju usmjerivača. Tako na pr. kod aluminija u zasićenoj otopini amonijeva sulfata ili kod tantala u sumpornoj kiselini može teći struja samo u jednom smjeru. Kao druga elektroda takvih usmjerivača upotrebljava se olovo.

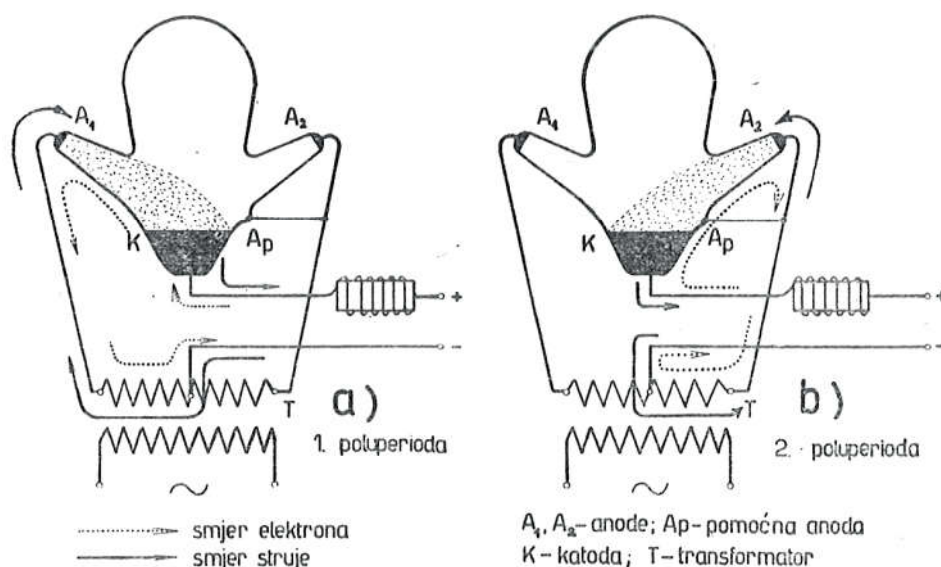
15.4. ELEKTRONKE KAO USMJERIVAČI (USMJERIVAČICE)

Djelovanje elektronke kao usmjerivača prikazano je već u 11.2. Vakuumske elektronke služe za usmjerivanje samo vrlo slabih struja, a za usmjerivanje jačih struja upotrebljavaju se elektronke punjene plinom (gazotroni). Danas se kao usmjerivačice za specijalne svrhe te za razne regulacione i komandne uređaje mnogo upotrebljavaju elektronke s malo žive, koja se pri paljenju ispari u živinu paru. Takve se elektrode nazivaju *tiratroni*.

Spoj prema slici 183. služi za polovično usmjerivanje. No i potpuno se usmjerivanje može postići pomoću elektronki. U tu se svrhu dvije elektronke spoje slično kao suhi usmjerivači prema slici 268.b. Potpuno se usmjerivanje može postići i pomoću jedne elektronke, koja ima dvije anode. Spoj je tada sličan spoju živina usmjerivača prema slici 270.

15.5. ŽIVINI USMJERIVAČI

Za usmjerivanje vrlo jakih struja za potrebe elektrokemijskih industrija, električnih željeznica te uopće tamo, gdje su potrebne jake istosmjerne struje, upotrebljavaju se danas gotovo samo usmjerivači sa živinom parom ili, kako ih možemo kraće nazvati, živini usmjerivači. Živinih usmjerivača ima vrlo različitih izvedaba. U jednu ruku možemo ih podijeliti na jednofazne (jednoanodne i dvoanodne) i trofazne (troanodne i šestanodne), a u drugu ruku na staklene i čelične živine usmjerivače.

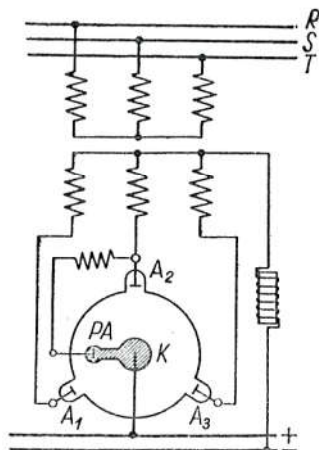


Sl. 270. Živin usmjerivač za potpuno usmjerivanje izmjenične struje. U strujni krug istosmjerne struje uključena je prigušnica za izravnanje pulzirajuće struje.

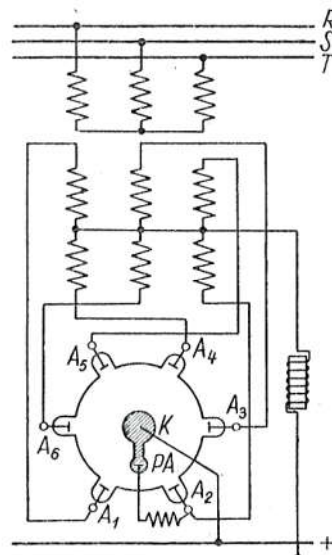
Slika 270. prikazuje dvoanodni stakleni živin usmjerivač, koji služi za potpuno usmjerivanje izmjenične struje. Na dnu balona, iz kojega je iscrpljen zrak tako, da u njemu vlada vakuum, nalazi se živa, koja služi kao katoda. U postranim izdancima smještene su dvije grafitne ili čelične elektrode, koje služe kao anode. Ispod desne anode smještena je mala pomoćna elektroda, pomoćna anoda, koja služi samo za paljenje. Struja kroz usmjerivač može teći samo onda, kad se u njemu stvore živine pare. To postignemo tako, da usmjerivač malo nagnemo, tek toliko, da živa dođe do pomoćne elektrode, pa da ga onda opet uspravimo. Kad usmjerivač nagnemo, poteče izmjenična struja između katode i pomoćne anode, a čim ga uspravimo, strujni krug se opet prekine. Na mjestu prekida nastane iskra, koja ispari nešto žive i time omogućiti, da se usmjerivač »upali«, t. j. da kroza nj počne teći struja. No struja može teći samo u jednom smjeru. Elektroni mogu izlaziti samo iz katode, i to samo na onom mjestu, gdje se živa jako ugrije i gdje iz nje izlaze pare. (To usijano mjesto na površini žive naziva se katodna mrlja; ona nije na miru, već neprestano pleše po živi.) Odatle se elektroni pod utjecajem električnog polja gibaju prema anodi. Iz anode ne mogu izlaziti elektroni. Na tom se osniva usmjerivačko djelovanje živina usmjerivača.

Katoda je preko priključenih trošila spojena na sredinu sekundarnog namota transformatora. Na taj način ona ima za vrijeme jedne polovice periode

negativni potencijal prema jednoj anodi, a za vrijeme druge polovice periode negativni potencijal prema drugoj anodi. Elektroni će se dakle za vrijeme jedne poluperiode gibati od katode prema jednoj anodi, a za vrijeme druge poluperiode od katode prema drugoj anodi. Smjer struje (kako ga mi zamišljamo, vidi stranu 58.) protivan je smjeru elektrona. Struja će dakle teći kroz usmjerivač čas od jedne, a čas od druge anode prema katodi. Na taj način dobijemo potpuno usmjereni napon kao na slici 266. Spoj prema slici 270. u suštini je jednak spoju suhih usmjerivača prema slici 268.b.



Sl. 271. Usmjerivanje trofazne struje pomoću živinog usmjerivača s 3 anode.



Sl. 272. Usmjerivanje trofazne struje pomoću živinog usmjerivača sa 6 anoda.

Živini usmjerivači mogu služiti i za usmjerivanje trofazne struje u istosmjernu, i to u troanodnom (trofaznom) spoju prema slici 271. ili u šestanodnom (šestorofaznom) spoju prema slici 272. Šestanodni spoj dobije se iz trofaznog sistema u suštini na jednak način, kao što se dvoanodni spoj sa dvije protufaze dobije iz jednofaznog sistema.

Kod trofaznih (troanodnih i šestanodnih) usmjerivača radi uvijek ona faza, kod koje je napon između anode i katode trenutno najveći, tako da luk preskače s jedne anode na drugu, čim napon te druge anode prema katodi bude veći od napona prethodne anode.

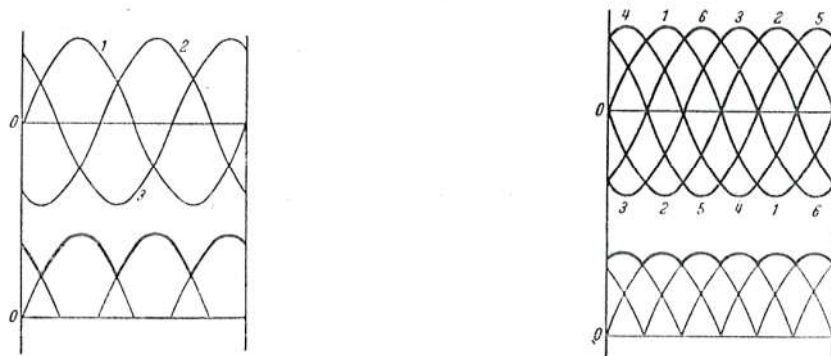
Budući da kod višeanodnih (višefaznih) usmjerivača struju vodi samo ona anoda, koja ima najveći napon prema katodi, krivulje usmjerenog napona imaju oblik prema slici 273.a i b. Kako se vidi, usmjereni napon znatno je jednoličniji nego kod dvoanodnih usmjerivača. Pomoću prigušnice postizavamo, da on bude još jednoličniji.

Treba upamtiti, da je *plus-pol kod živinih usmjerivača uvijek spojen s katodom.*

Stakleni živini usmjerivači grade se za struje do kojih 500 A*, ali se i za manju struju od ove upotrebljavaju i čelični živini usmjerivači, t. j. usmjerivači u čeličnom kotlu, koji se grade i za vrlo velike struje sve do kojih 10 000 A, većinom u izvedbi sa 6 anoda ili (u Evropi rjeđe, u Americi često) kao baterija od 6 jednoanodnih usmjerivača. Čelični živini usmjerivači rade na sasvim istom principu kao i stakleni živini usmjerivači, t. j. na ventilnom djelovanju luka između užarene katode na površini žive i hladnijih anoda.

* Ima izvedaba i za još veće struje.

Do pred kojih 20 godina čelični živini usmjerivači bili su uvijek snabdjeveni *vakuumpumpom*, jer nije bilo moguće napraviti takve usmjerivače, koji bi dulje vremena držali potrebni visoki vakuum. U novije vrijeme sve se više upotrebljavaju čelični živini usmjerivači bez *vakuumpumpe*, koji su znatno jednostavniji u pogonu. Takvi usmjerivači ne smiju stajati dulje vremena izvan pogona (ne dulje od kojih mjesec dana) bez prekida, jer inače izgube vakuum. U pogonu oni sami sebi održavaju vakuum, jer se ono malo molekula plina, što se probije u kotao, veže na stijene kotla. Ako bi takav usmjerivač ipak iz makar kojeg razloga izgubio vakuum, treba ga poslati u tvornicu na uređenje. Radi poboljšanja paljenja neki usmjerivači bez vakuum-pumpe napunjeni su s nešto plina argona pod niskim tlakom.



Sl. 273. Krivulje narinutog i usmjerenog napona:

- a) kod živinog usmjerivača s 3 anode, b) kod živinog usmjerivača sa 6 anoda.

Višeanodni usmjerivači, i stakleni i čelični, imaju anode postrance, a gornji dio staklenog balona odn. čeličnog kotla služi za kondenzaciju živinih para, koje se razvijaju zbog visoke temperature na izlasku luka iz žive. Živini usmjerivači treba da budu hlađeni, da tlak živinih para ne bi prešao dozvoljenu granicu. Samo su mali stakleni živini usmjerivači hlađeni prirodnom cirkulacijom zraka, a veći su usmjerivači hlađeni umjetno: stakleni i čelični bez vakuum-pumpe pomoću ventilatora, a čelični sa vakuum-pumpom pomoću ventilatora ili vodom. Čelični usmjerivači bez vakuum-pumpe ne smiju biti hlađeni vodom, jer bi brzo izgubili vakuum zbog prodiranja vodika iz vode u kotao.

Jednoanodni usmjerivači imaju samo jednu anodu po kotlu. Izvode se i kao stakleni i kao čelični, a spajaju se obično u bateriju po 6 takvih usmjerivača. Katode svih 6 usmjerivača spoje se paralelno, a anode se priključe upravo tako na transformator, kao da se nalaze u jednom kotlu.

Kotao čeličnih usmjerivača u pogonu je praktički na istom potencijalu kao i katoda (razlika je svega oko 20 V), a kako je napon katode prema zemlji jednak naponu plus-pola istosmjerne strane*, ima i kotao u tom slučaju pozitivni napon prema zemlji, pa treba poduzeti sigurnosne mjere. Neki proizvođači stavljaju oko kotla zaštitno okrilje, koje je izolirano i uzemljeno, pa takvi usmjerivači nisu opasni na dodir. Oko usmjerivača bez zaštitnog okrilja obično se izolira pod, kako bi se spriječila opasnost kod dodira.

Napon između anode i katode iznosi kod živinih usmjerivača oko 20 V. On je potreban za održavanje luka, t. j. struje elektrona od katode prema anodi. Taj je napon praktički nezavisan od narinutog napona i od struje opterećenja. Možemo ga smatrati unutarnjim padom napona u usmjerivaču. Istosmjerni napon, koji usmjerivač daje, prema tome je također nezavisan od

* Redovito je minus-pol uzemljen, no ima izvedaba (izuzetno), kad je obratno.

opterećenja. On je određen narinutim izmjeničnim, odnosno trofaznim naponom prema ovim formulama:

Kod izmjenične struje $U_{ist} = 0,9 U - 20$ volta

Kod trofaznog usmjerivača $U_{ist} = 1,17 U_f - 20$ volta

Kod šestorofaznog usmjerivača $U_{ist} = 1,34 U_f - 20$ volta

gdje je U_{ist} — istosmjerni (usmjereni) napon, U — izmjenični napon, U_f — fazni napon, 20 V — pad napona u usmjerivaču. Hoćemo li promijeniti visinu istosmjernog napona, koji usmjerivač daje, moramo pomoću regulacionog transformatora promijeniti visinu narinutog izmjeničnog odnosno trofaznog napona.

Ima živinih usmjerivača, kod kojih je ispred anoda ugrađena treća elektroda, takozvana *rešetka*. Reguliranjem potencijala rešetke može se po volji regulirati paljenje usmjerivača, a time i bez regulacionog transformatora regulirati istosmjerni napon. Takvi se aparati mogu upotrebiti ne samo kao usmjerivači već i za obratnu svrhu, t. j. za pretvaranje istosmjerne struje u izmjeničnu, pa i za pretvaranje struje niske frekvencije u struju visoke frekvencije, na pr. za pogon visokofrekventnih indukcionih peći. Specijalni živini usmjerivači jesu *ignitroni*, kod kojih se paljenje u svakoj periodi potiče pomoću posebne regulirane elektrode za paljenje, ignitora. Ignitroni imaju uvijek samo jednu anodu u staklenom balonu ili čeličnom kotlu, a vrlo su podesni za isprekidana opterećenja, za koja obični živini usmjerivači nisu prikladni, te za druge specijalne svrhe.

15.6. KONTAKTNI PRETVARAČI

Ti pretvarači usmjeruju struju igrom mehanički pokretanih kontakta, koji se otvaraju i zatvaraju u stanovitom ritmu. Upotrebljavaju se sve više, i to za niske napone i velike struje (do 10 000 A).

15.7. PROMJENJIVAČI

Pod nazivom promjenjivači obuhvaćene su sve one naprave, koje iskorišćuju ventilno djelovanje pri protjecanju struje kroz plinove i pare, odnosno pri izlaženju elektrona iz užarene katode. Promjenjivači se dijele na:

1. usmjerivače, koje smo opisali u poglavljima 15.1 do 15.5,
2. izmjenjivače i
3. promjenjivače frekvencije.

Izmjenjivači su takvi promjenjivači, koji pretvaraju istosmjernu struju u izmjeničnu. Oni su građeni slično kao usmjerivači, samo što moraju imati rešetku, jer se baš pomoću rešetke vrši regulacija, koja omogućuje pretvorbu istosmjerne struje u izmjeničnu. Oni se grade i kao živini izmjenjivači (za veće snage) i kao elektronke (za manje snage). Pomoću nekoliko takvih izmjenjivača može se istosmjerna struja pretvoriti i u trofaznu.

Danas se radi na tome, da bi se prijenos vrlo velikih snaga na vrlo velike daljine vršio pomoću istosmjerne struje vrlo visokog napona (oko 400 kV), jer računi pokazuju, da bi takav prijenos bio ekonomičniji. Sva proizvodnja, razdioba i prijenosni vodovi do 220 000 V ostali bi međutim trofazni. Na početku takvog prijenosnog voda istosmjerne struje bili bi usmjerivači, koji bi trofaznu struju pretvarali u istosmjernu, dok bi na kraju bili izmjenjivači, koji bi istosmjernu struju pretvarali opet u trofaznu. Zasada, međutim, čini se da nema izgleda za neposrednu primjenu ovog sistema. Naprotiv izgrađeni su trofazni vodovi za 380 000 V.

Promjenjivači frekvencije pretvaraju izmjeničnu struju jedne frekvencije u izmjeničnu struju druge frekvencije, na pr. struju od 50 Hz u struju od $16\frac{2}{3}$ Hz (koja se u nekim zemljama upotrebljava za pogon električnih željeznica). Oni su građeni u principu jednako kao izmjenjivači, samo im je regulacija mrežice drukčija.

Izmjenjivači i promjenjivači frekvencije upotrebljavaju se danas još samo izuzetno.

RJEŠENJA ZADATAKA

1. $1 \text{ A} = 1000 \text{ mA}$; $0,07 \text{ A} = 0,7 \cdot 1000 = 70 \text{ mA}$.
2. $1 \text{ mA} = 0,001 \text{ A}$; $3,5 \text{ mA} = 3,5 \cdot 0,001 = 0,0035 \text{ A}$.
3. $15 \text{ min} = 15 \times 60 = 900 \text{ s}$; $20 \text{ A} \times 900 \text{ s} = 18\,000 \text{ As}$.
4. $1 \text{ sat} = 60 \text{ min}$; $1 \text{ min} = 60 \text{ s}$; $1 \text{ sat} = 60 \times 60 = 3600 \text{ s}$; $1 \text{ Ah} = 3600 \text{ As}$.
5. $65 : 16 = 4,06 \text{ A/mm}^2$.
6. $1 \text{ kV} = 1000 \text{ V}$; $30 \text{ kV} = 30 \times 1000 = 30\,000 \text{ V}$.
7. $220\,000 \text{ V} : 1000 = 220 \text{ kV}$.
8. $1 \text{ kV} = 1000 \text{ V}$; $1 \text{ V} = 1000 \text{ mV}$; $1 \text{ kV} = 1000 \times 1000 = 1\,000\,000 \text{ mV}$.
9. $34,2 \text{ mV} : 1000 = 0,0342 \text{ V}$.
10. Napon je uvijek jednak razlici potencijala: $550 - 480 = 70 \text{ V}$.
11. I ovdje je napon jednak razlici potencijala: $3300 - 30 = 3270 \text{ V}$.
12. I ovdje je napon jednak razlici potencijala: $52 - 6 = 46 \text{ V}$.
13. $S = \frac{d^2 \pi}{4} = \frac{0,4^2 \pi}{4} = 0,126 \text{ mm}^2$, $R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,4 \cdot 100}{0,126} = 317 \, \Omega$.
14. Sve se izračunava po formuli $R = \frac{\rho l}{S}$, gdje je $\rho = 0,018$, $l = 1000 \text{ m}$, a $S = 6, 10, 16, 25, 35, 50, 70, 95 \text{ mm}^2$. Dobije se:

Presjek S	6	10	16	25	35	50	70	95	mm^2
Otpor po km R	3,00	1,80	1,12	0,72	0,51	0,36	0,257	0,19	Ω

15. Za toliko, za koliko im je specifični otpor veći. Kod bakra je $\rho = 0,018$, a kod aluminijskog $\rho = 0,029$. Specifični otpor je kod aluminijskog veći

$$\frac{0,029}{0,018} = 1,61 \text{ puta.}$$

Aluminijski vodiči moraju dakle biti 1,61 puta tako debeli kao bakreni vodiči (t. j. za 61% deblji).

16. $S = 60,0 \text{ cm}^2 = 6000 \text{ mm}^2$; $R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,13 \cdot 1000}{6000} = 0,0217 \, \Omega$.
17. $R = \frac{\rho l}{S}$; $S = \frac{\rho l}{R} = \frac{1,35 \cdot 92}{39,6} = 3,14 \text{ mm}^2$; odavle $d = 2,0 \text{ mm}$.
18. $R = \frac{\rho l}{S}$; $S = \frac{\rho l}{R} = \frac{0,018 \cdot 2 \cdot 200}{2,5} = 2,88 \text{ mm}^2$.
19. $S = \frac{d^2 \pi}{4} = \frac{1,2^2 \pi}{4} = 1,13 \text{ mm}^2$; $R = \frac{\rho l}{S}$; $l = \frac{R S}{\rho} = \frac{48 \cdot 1,13}{0,4} = 136 \text{ m}$.
20. $\gamma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{0,15} = 6,67 \text{ S}$.
21. $\rho = \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{18,2} = 0,055 \, \Omega$.

$$22. R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,029 \cdot 300}{10} = 0,87 \, \Omega; \quad G = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,87} = 1,15 \, \text{S}.$$

$$23. G = \frac{1}{R} = \frac{1}{0,0217} = 46,1 \, \text{S}.$$

$$24. \text{ Pri } 20^\circ \text{C je otpor } R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,018 \cdot 2 \cdot 1500}{16} = 3,38 \, \Omega.$$

Dalje računamo po formuli $R_t = R_h(1 + \alpha t)$.

$$a) R_{70} = R_{20}(1 + \alpha t) = 3,38(1 + 0,0038 \cdot 50) = 3,38 \cdot 1,19 = 4,02 \, \Omega.$$

$$b) R_{20} = R_{-20}(1 + \alpha t) = R_{-20}(1 + 0,0038 \cdot 40) = R_{-20} \cdot 1,154,$$

$$R_{-20} = \frac{R_{20}}{1,154} = \frac{3,38}{1,154} = 2,93 \, \Omega.$$

$$25. R_{85} + R_{20}(1 + \alpha t) = 35(1 + 0,0038 \cdot 65) = 43,6 \, \Omega.$$

$$26. \rho_{120} = \rho_{20}(1 + \alpha t) = 0,13(1 + 0,005 \cdot 100) = 0,195 \, \Omega.$$

27. Specifični otpor kromniklja pri 20°C iznosi $\rho = 1,1 \, \Omega$. Pri 20°C ne bi žica kuhala imala $71 \, \Omega$ nego manje:

$$R_{600} = R_{20}(1 + \alpha t) = R_{20}(1 + 0,00015 \cdot 580) = R_{20} \cdot 1,087; \quad R_{20} = \frac{R_{600}}{1,087} = 65,3 \, \Omega.$$

$$S = \frac{d^2 \pi}{4} = \frac{0,5^2 \pi}{4} = 0,196 \, \text{mm}^2; \quad R_{20} = \frac{\rho l}{S} \quad l = \frac{R_{20} S}{\rho} = \frac{65,3 \cdot 0,196}{1,1} = 11,6 \, \text{m}.$$

$$28. R_{105} = R_{15}(1 + \alpha t) = 0,9(1 + 0,0038 \cdot 90) = 1,21 \, \Omega.$$

$$29. R_x = R_{15}(1 + \alpha t); \quad 1 + \alpha t = \frac{R_x}{R_{15}} = \frac{0,388}{0,282} = 1,376, \quad \alpha t = 1,376 - 1 = 0,376;$$

$$t = \frac{0,376}{\alpha} = \frac{0,376}{0,0038} = 99^\circ \text{C}.$$

Motor se dakle ugrijao na $15 + 99 = 114^\circ \text{C}$ (suviše!).

30. Na posve isti način kao u prethodnom zadatku dobijemo, da se transformator ugrijao za $25 + 75 = 100^\circ \text{C}$.

$$31. I = U : R = 220 : 20 = 11 \, \text{A}.$$

$$32. I = U : R = 110 : 10 = 11 \, \text{A}.$$

$$33. I = 12 \, \text{mA} = 0,012 \, \text{A}; \quad R = U : I = 1,2 : 0,012 = 100 \, \Omega.$$

$$34. U = IR = 7,2 \cdot 34 = 245 \, \text{V}.$$

$$35. R = U : I = 220 : 2,3 = 96 \, \Omega.$$

$$36. I = U : R = 190 : 96 = 1,98 \, \text{A}.$$

$$37. \text{ Ukupni otpor } R = 5 + 4 + 3 + 2 + 6 = 20 \, \Omega. \quad I = U : R = 24 : 20 = 1,2 \, \text{A},$$

$$U_{AB} = I R_{AB} = 1,2 \cdot 4 = 4,8 \, \text{V}, \quad U_{BC} = I R_{BC} = 1,2 \cdot 3 = 3,6 \, \text{V}.$$

$$U_{CD} = I R_{CD} = 1,2 \cdot 2 = 2,4 \, \text{V}, \quad U_{DE} = I R_{DE} = 1,2 \cdot 6 = 7,2 \, \text{V}.$$

Pad napona u unutarnjem otporu baterije iznosi: $IR = 1,2 \cdot 5 = 6 \, \text{V}$, pa je prema tome:

$$U_{AE} = 24 - 6 = 18 \, \text{V}, \quad U_{CE} = U_{CD} + U_{DE} = 2,4 + 7,2 = 9,6 \, \text{V}.$$

$$38. \text{ Ukupni otpor strujnog kruga: } R = 5 + 0,05 = 5,05 \, \Omega.$$

$$\text{Struja: } I = U : R = 110 : 5,05 = 21,8 \, \text{A}.$$

39. Ukupni otpor strujnog kruga jednak je sada unutarnjem otporu baterije:

$$I = U : R = 110 : 0,05 = 2200 \, \text{A}. \quad (\text{Stvarna struja kratkog spoja bila bi zbog prelaznog otpora na mjestu kratkog spoja manja.})$$

$$40. u = 230 - 214 = 16 \, \text{V}, \quad u \% = \frac{u}{U} \cdot 100 = \frac{16}{230} \cdot 100 = 7,0 \, \%.$$

$$41. R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,018 \cdot 2 \cdot 500}{16} = 1,12 \, \Omega; \quad u = IR = 30 \cdot 1,12 = 33,6 \, \text{V}.$$

Napon na početku voda iznosi $U = 440 + 33,6 = 473,6 \, \text{V}$.

$$u \% = \frac{u}{U} \cdot 100 = \frac{33,6}{473,6} \cdot 100 = 7,1 \, \%.$$

$$42. R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,018 \cdot 2 \cdot 31}{1,5} = 0,744 \, \Omega. \quad u = IR = 5 \cdot 0,744 = 3,72 \, \text{V}.$$

$$u \% = \frac{3,72}{220} \cdot 100 = 1,69 \, \%.$$

$$43. R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,029 \cdot 2 \cdot 12}{16} = 0,0435 \, \Omega, \quad u = IR = 22 \cdot 0,0435 = 0,957 \, \text{V}.$$

$$u \% = \frac{0,957}{220} \cdot 100 = 0,43 \, \%.$$

$$44. R = 0,0217 \cdot 2,5 = 0,054 \, \Omega; \quad u = IR = 350 \cdot 0,054 = 18,9 \, \text{V}.$$

45. Od 110 V, koliko iznosi napon mreže, treba lučnica da dobije samo 40 V. Ostatak od 70 V treba »poništiti« u otporu R, t. j. pad napona u otporu R mora iznositi 70 V. Mora dakle biti:

$$IR = 70 \, \text{V},$$

a budući da je $I = 12 \, \text{A}$, mora otpor R iznositi:

$$R = 70 : 12 = 5,8 \, \Omega.$$

$$46. u = 5 \% \text{ od } 230 \, \text{V} = 0,05 \cdot 230 = 11,5 \, \text{V}, \quad R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,018 \cdot 2 \cdot 1200}{25} = 1,73 \, \Omega,$$

$$u = IR; \quad I = \frac{u}{R} = \frac{11,5}{1,73} = 6,65 \, \text{A}.$$

$$47. u = 0,015 \cdot 110 = 1,65 \, \text{V}; \quad u = IR, \text{ odavle } R = \frac{u}{I} = \frac{1,65}{4,5} = 0,367 \, \Omega.$$

$$R = \frac{\rho l}{S}; \quad S = \frac{\rho l}{R} = \frac{0,018 \cdot 2 \cdot 20}{0,367} = 1,96 \, \text{mm}^2.$$

Treba iz tablice na strani 38. uzeti naredni veći standardizirani presjek 2,5 mm².

$$48. u = 0,06 \cdot 440 = 26,4 \, \text{V} = IR; \quad R = \frac{u}{I} = \frac{26,4}{10} = 2,64 \, \Omega, \quad R = \frac{\rho l}{S};$$

$$S = \frac{\rho l}{R} = \frac{0,029 \cdot 2 \cdot 200}{2,64} = 4,4 \, \text{mm}^2.$$

Treba bi uzeti naredni veći presjek od 6 mm². No prema strani 37. ne smije se za nadzemne aluminijske vodove uzeti presjek manji od 16 mm² uže. Treba dakle uzeti taj presjek. Kod tog će presjeka biti faktični pad napona $\frac{4,4}{16}$ puta manji nego kod 4,4 mm², t. j. bit će:

$$u = \frac{4,4}{16} \cdot 6 = 1,65 \, \%.$$

$$49. u = IR; \quad R = \frac{u}{I} = \frac{2,5}{30} = 0,083 \, \Omega. \quad R = \frac{\rho l}{S}; \quad S = \frac{\rho l}{R} = \frac{0,018 \cdot 2 \cdot 70}{0,083} = 30,4 \, \text{mm}^2.$$

Odaberemo standardizirani presjek $S = 35 \, \text{mm}^2$.

$$50. u = 0,015 \cdot 220 = 3,3 \, \text{V} = IR; \quad R = \frac{u}{I} = \frac{3,3}{100} = 0,033 \, \Omega. \quad R = \frac{\rho l}{S};$$

$$S = \frac{\rho l}{R} = \frac{0,029 \cdot 2 \cdot 30}{0,033} = 52,7 \, \text{mm}^2.$$

Ne će smetati, ako uzmemo i nešto manji presjek 50 mm².

51. Kod tako male duljine voda, a tako velike struje dimenzionira se vod samo s obzirom na ugrijavanje. Iz tablice opteretivosti kabela* dobijemo, da za struju 200 A treba uzeti presjek 70 mm² Cu (za polaganje u zraku). Izračunajmo ipak, za kontrolu, pad napona:

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,018 \cdot 2 \cdot 20}{70} = 0,0103 \, \Omega,$$

$$u = IR = 200 \cdot 0,0103 = 2,06 \, \text{V}, \quad u \% = \frac{u}{U} \cdot 100 = \frac{2,06}{230} \cdot 100 = 0,9 \, \%.$$

* Vidi na pr. Kaiser, Elektrotehnički priručnik, str. 387.

$$52. \quad u = 0,02 \cdot 220 = 4,4 \text{ V} = IR; \quad R = \frac{u}{I} = \frac{4,4}{50} = 0,088 \, \Omega. \quad R = \frac{\rho l}{S};$$

$$S = \frac{\rho l}{R} = \frac{0,018 \cdot 2 \cdot 20}{0,088} = 8,2 \text{ mm}^2.$$

Trebalo bi uzeti naredni veći standardizirani presjek, t. j. 10 mm^2 . No presjek 10 mm^2 ne smije se ipak uzeti, jer on ne bi bio dovoljan s obzirom na ugrižavanje, kao što pokazuje tablica na strani 38. Prema toj tablici potrebno je uzeti presjek 16 mm^2 .

$$53. \quad \text{Otpor prve žarulje jest: } R_1 = \frac{U}{I_1} = \frac{110}{0,36} = 306 \, \Omega.$$

$$\text{Otpor druge žarulje jest: } R_2 = \frac{U}{I_2} = \frac{110}{0,91} = 121 \, \Omega.$$

$$\text{Ukupni otpor } R = R_1 + R_2 = 306 + 121 = 427 \, \Omega.$$

Struja kod priključka na 220 V iznosi:

$$I = U : R = 220 : 427 = 0,515 \text{ A}.$$

Napon, koji dobiva prva žarulja: $U_1 = IR_1 = 0,515 \cdot 306 = 158 \text{ V}$.

Napon, koji dobiva druga žarulja: $U_2 = IR_2 = 0,515 \cdot 121 = 62 \text{ V}$.

Prva žarulja dobiva znatno preveliku struju, pa bi začas pregorjela, dok druga dobiva premalu struju, pa ne bi skoro uopće svijetlila.

$$54. \quad \text{Ukupna struja jednaka je zbroju pojedinih struja:}$$

$$I = 0,63 + 0,27 + 0,18 + 0,91 + 0,34 = 2,33 \text{ A}.$$

$$55. \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{1}{5} = \frac{10 + 5 + 4}{20} = \frac{19}{20}; \quad R = \frac{20}{19} = 1,05 \, \Omega.$$

Napon na krajevima otpornika iznosi $U = IR = 7,4 \cdot 1,05 = 7,8 \text{ V}$.

Struja kroz pojedine otpornike $I_1 = U : R_1 = 7,8 : 2 = 3,9 \text{ A}$; $I_2 = 7,8 : 4 = 1,95 \text{ A}$; $I_3 = 7,8 : 5 = 1,56 \text{ A}$. Kontrola: Mora biti $I_1 + I_2 + I_3 = I$. Dakle $3,9 + 1,95 + 1,56 = 7,41 \text{ A}$. Mala razlika potječe od ne sasvim točnog računanja.

$$56. \quad I_1 = \frac{100}{5} = 20 \text{ A}, \quad I_2 = \frac{100}{10} = 10 \text{ A}, \quad I_3 = \frac{100}{20} = 5 \text{ A}, \quad I = I_1 + I_2 + I_3 = 20 + 10 + 5 = 35 \text{ A}.$$

$$57. \quad \frac{1}{r_{23}} = \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} = \frac{1}{4} + \frac{1}{5} = \frac{5 + 4}{20} = \frac{9}{20}; \quad r_{23} = \frac{20}{9} = 2,22 \, \Omega.$$

$$\frac{1}{r_{45}} = \frac{1}{r_4} + \frac{1}{r_5} = \frac{1}{8} + \frac{1}{4} = \frac{1 + 2}{8} = \frac{3}{8}; \quad r_{45} = \frac{8}{3} = 2,67 \, \Omega.$$

$$R = r_1 + r_{23} + r_{45} = 7 + 2,22 + 2,67 = 11,89 \, \Omega.$$

$$I = U : R = 100 : 11,89 = 8,41 \text{ A}.$$

$$U_{23} = Ir_{23} = 8,41 \cdot 2,22 = 18,67 \text{ V}.$$

$$I_2 = 18,67 : 4 = 4,67 \text{ A}; \quad I_3 = 18,67 : 5 = 3,73 \text{ A}$$

(ili $I_3 = 8,41 - 4,67 = 3,74$. Neznatna pogreška od ne sasvim točnog računanja).

$$U_{45} = Ir_{45} = 8,41 \cdot 2,67 = 22,5 \text{ V}.$$

$$I_4 = 22,5 : 8 = 2,81 \text{ A}; \quad I_5 = 22,5 : 4 = 5,62 \text{ A}.$$

$$58. \quad \frac{1}{R_{23}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{67,2} + \frac{1}{49,8} = 0,0149 + 0,0201 = 0,0350,$$

$$R_{23} = 1 : 0,0350 = 28,6 \, \Omega.$$

$$R = R_1 + R_{23} + R_4 = 34,8 + 28,6 + 49,8 = 113,2 \, \Omega.$$

$$I = U : R = 220 : 113,2 = 1,94 \text{ A}.$$

$$U_{AB} = IR_{23} = 1,94 \cdot 28,6 = 55,5 \text{ V}.$$

$$59. \quad \text{Otpor pojedine žarulje } R_1 = U : I = 220 : 0,63 = 349 \, \Omega.$$

$$\text{Ukupni otpor } R = \frac{R_1}{6} = \frac{349}{6} = 58,2 \, \Omega.$$

60. Ukupna elektromotorna sila jednaka je zbroju pojedinih elektromotornih sila: $E = 4 + 2 + 6 = 12$ V. Ukupni otpor $R = 3 + 1 + 2 = 6 \Omega$. Struja $I = E : R = 12 : 6 = 2$ A. Da odredimo napon između točaka A i D, možemo ovako razmišljati: Kad ne bi bilo akumulatora od 2 V, bio bi napon $IR = 2 \cdot 4 = 8$ V. Dakle 8 V napona bilo bi potrebno narinuti između točaka A i D, da kroz otpore $R_{AB} = 3 \Omega$ i $R_{CD} = 1 \Omega$ teče struja od 2 A. No kad stavimo akumulator između B i C, onda je već 2 V tu, pa treba samo još razlika $8 - 2 = 6$ V. Dakle je $U_{AD} = 6$ V.

61. Ukupna elektromotorna sila i sada je — kao i uvijek — jednaka zbroju svih elektromotornih sila u strujnom krugu. Samo što elektromotornu silu akumulatora, koji je protivno spojen, treba zbrojiti s predznakom minus:

$$E = 4 - 2 + 6 = 8 \text{ V. Struja iznosi } I = E : R = 8 : 6 = 1,33 \text{ A.}$$

$$U_{AB} = IR_{AB} = 1,33 \cdot 3 = 4 \text{ V, } U_{CD} = IR_{CD} = 1,33 \cdot 1 = 1,33 \text{ V.}$$

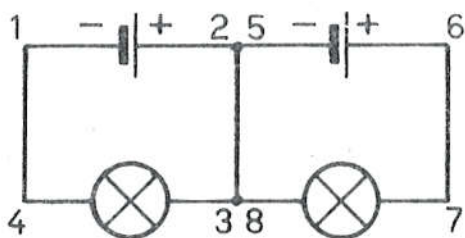
$$\text{Bez akumulatora od 2 V bio bi dakle napon } U_{AD} = 4 + 1,33 = 5,33 \text{ V.}$$

No sada taj napon mora biti za 2 V veći, jer se i akumulator (budući da je obratno spojen) odupire protjecanju struje. Dakle je:

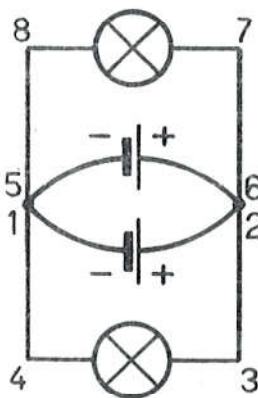
$$U_{AD} = 5,33 + 2 = 7,33 \text{ V.}$$

62. a) Svjetlost žarulja ne će se ništa promijeniti. Točke 2 i 5 došle su samo na isti potencijal, što ništa ne utječe na razdiobu struje u strujnim krugovima.

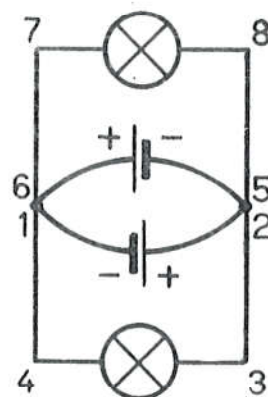
b) Spoj je sada prema slici 274. Struja I lijevog strujnog kruga tekla bi od točke 2,5 prema točki 3,8. Struja I desnog strujnog kruga, koja je posve jednaka, tekla bi baš obratno. Stoga između točaka 2,5 i 3,8 ne će teći nikakva struja. Struja će teći »okolo-naokolo«: 1 — 2,5 — 6 — 7 — 8,3 — 4 — 1. Elektromotorna sila u tom strujnom krugu dvostruka je nego prije, ali je i otpor gotovo dvostruki, umanjen jedino za dvostruki otpor između točaka 2,5 i 3,8, koji se sada nalazi izvan strujnog kruga. Žarulje će dakle dobiti nešto veći napon nego prije, toliko veći, koliko to odgovara padu napona IR_{23} i IR_{58} . No ako su otpori R_{23} i R_{58} neznatni prema otporu žarulja, one će svijetliti jednako kao i prije.



Sl. 274. Uz rješenje zadatka 62.b.



Sl. 275. Uz rješenje zadatka 62.c.



Sl. 276. Uz rješenje zadatka 62.d.

c) Spoj je prema slici 275. Napon, koji dobivaju žarulje, ništa se nije promijenio. Možemo zamisliti, da svaki akumulator i nadalje napaja svoju žarulju. Struja će ostati ista, pa se prema tome svjetlost žarulja ništa ne će promijeniti.

d) Kratki spoj akumulatora prema slici 276. Akumulatori su spojeni u seriju u strujnom krugu 6,1—2,5. Žarulje će dobiti znatno manji napon te će svijetliti slabo ili nikako — ali i to samo za trenutak, jer će struja kratkog spoja ubrzo oštetiti akumulatore.

63. Električna struja ne čini ništa ptici, kad sjedne na vod, jer ne prolazi kroz nju. I mi možemo golom rukom uhvatiti vod pod naponom, ako stojimo na podlozi, koja je dovoljan izolator s obzirom na napon voda. U tom se slučaju ne može strujni krug zatvoriti preko našeg tijela, struja ne teče kroz nas, pa nam ne može ništa.

64. Budući da su oba generatora jednako opterećena, ne teče nulvodičem nikakva struja. Pad napona nastaje samo u otporu R vanjskih vodiča:

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,018 \cdot 500}{25} = 0,36 \, \Omega, \quad u = IR = 30 \cdot 0,36 = 10,8 \, \text{V}.$$

Napon na kraju voda je $230 - 10,8 = 219,2 \, \text{V}$.

65. Gornja polovina trovodičnog sistema na slici 45. vlada se sada kao običan dvovodični sistem. Pad napona nastaje sada i u nulvodiču. Ukupni pad napona dvaput je veći nego u zadatku 64:

$$u = 10,8 \cdot 2 = 21,6 \, \text{V}, \quad U = 230 - 21,6 = 208,4 \, \text{V}.$$

Na donjoj polovini trovodičnog sistema prema slici 45. napon se — povisuje! Donji vanjski vodič ima potencijal $-230 \, \text{V}$. Nulvodič ima kod generatora potencijal 0, jer je uzemljen, a kod trošila potencijal $+10,8 \, \text{V}$, t. j. toliki, koliko iznosi pad napona u nulvodiču. Napon između vanjskog vodiča i nulvodiča kod trošila jednak je razlici potencijala, t. j.

$$10,8 - (-230) = 240,8 \, \text{V},$$

dakle viši, nego kad generatori nisu uopće opterećeni.

66. Struja, koju treba mjeriti, jest $I = 1 \, \text{A}$. Struja, koja smije teći kroz ampermetar: $i_a = 5 \, \text{mA} = 0,005 \, \text{A}$. Kroz šent treba dakle da teče razlika između ukupne struje i struje kroz ampermetar:

$$i_s = I - i_a = 1 - 0,005 = 0,995 \, \text{A}.$$

Napon na stezaljkama ampermetra i šenta:

$$U = i_a r_a = 0,005 \cdot 100 = 0,5 \, \text{V}.$$

Otpor šenta treba prema tome da bude:

$$r_s = \frac{U}{i_s} = \frac{0,5}{0,995} = 0,5025 \, \Omega.$$

67. Račun je jednak kao i u prethodnom zadatku:

$$i_s = I - i_a = 30 - 0,15 = 29,85 \, \text{A}, \quad U = i_a r_a = 0,15 \cdot 1 = 0,15 \, \text{V}.$$

$$r_s = \frac{U}{i_s} = \frac{0,15}{29,85} = 0,00503 \, \Omega.$$

68. Napon na stezaljkama ampermetra:

$$U = i_a r_a = 0,01 \cdot 10 = 0,1 \, \text{V}.$$

Ukupni otpor ampermetra i šenta iznosi

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_a} + \frac{1}{r_s} = \frac{1}{10} + \frac{1}{10/99} = \frac{1}{10} + \frac{99}{10} = \frac{100}{10} = 10.$$

$$R = 1 : 10 = 0,1 \, \Omega.$$

Uz napon $0,1 \, \text{V}$ tekla bi dakle kroz ampermetar i kroz šent struja:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{0,1}{0,1} = 1 \, \text{A}.$$

Mogu se dakle mjeriti struje do $1 \, \text{A}$.

69. Spojit ćemo oba ampermetra paralelno i zbrojiti struje, koje oni mjere.

70. Najveća struja, koju ampermetar mjeri, iznosi $i_a = 10 \, \text{mA} = 0,01 \, \text{A}$. Pritom je napon na stezaljkama ampermetra $U = i_a r_a = 0,01 \cdot 10 = 0,10 \, \text{V}$. Ampermetar može dakle direktno mjeriti napone do $0,1 \, \text{V}$. Svaki viši napon prouzrokovao bi kroza nj prejaku struju, koju on više ne može mjeriti, a koja za nj može biti i opasna. Napon $30 \, \text{V}$ je $30 : 0,1 = 300$ puta viši nego napon $0,1 \, \text{V}$. Taj bi napon kroz otpor ampermetra prouzrokovao 300 puta jaču struju. No ako i otpor 300 puta povećamo, struja će ostati ista. 300 puta veći otpor oznosi:

$$R = 300 r_a = 300 \cdot 10 = 3000 \, \Omega.$$

A budući da se $10 \, \Omega$ nalazi već u samom instrumentu, moramo ostatak do $3000 \, \Omega$ dodati kao serijski otpor:

$$R_s = R - r_a = 3000 - 10 = 2990 \, \Omega.$$

71. Skalu treba povećati $240 : 30 = 8$ puta. Za 8 puta viši napon treba i 8 puta veći otpor: $R = 8 \cdot 500 = 4000 \Omega$. Budući da je u voltmetru samom već ugrađeno $R_v = 500 \Omega$ (R_v = otpor voltmetra), mora serijski otpor iznositi:
- $$R_s = R - R_v = 4000 - 500 = 3500 \Omega.$$
72. Bez serijskog otpornika iznosi otpor 100Ω . Sa serijskim otpornikom iznosi on $100 + 900 = 1000 \Omega$, t. j. 10 puta više. Kod 10 puta većeg otpora može napon biti 10 puta viši, da struja ostane ista. Na taj se dakle način može mjeriti do $10 \cdot 1,5 = 15 \text{ V}$.
73. Spojimo oba voltmetra u seriju i zbrojimo napone, koje oni mjere.
74. $1 \text{ F} = 1\,000\,000 \mu\text{F}$; $0,000\,022 \text{ F} = 0,000\,022 \cdot 1\,000\,000 = 22 \mu\text{F}$.
75. $1 \mu\text{F} = \frac{1}{1\,000\,000} \text{ F}$; $247 \mu\text{F} = \frac{247}{1\,000\,000} = 0,000\,247 \text{ F}$.
76. $1 \text{ pF} = 0,9 \text{ cm}$; $82 \text{ pF} = 82 \cdot 0,9 = 73,8 \text{ cm}$.
77. $1 \text{ cm} = \frac{1}{0,9} \text{ pF}$; $84 \text{ cm} = \frac{84}{0,9} = 93,3 \text{ pF}$.
78. Polje iznosi $500 : 0,1 = 5000 \text{ V/mm}$ ili $500 : 0,0001 = 5\,000\,000 \text{ V/m}$.
79. $C = C_1 + C_2 + C_3 = 0,4 + 0,7 + 0,2 = 1,3 \mu\text{F}$.
80. $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} = \frac{1}{0,4} + \frac{1}{0,7} + \frac{1}{0,2} = 2,5 + 1,43 + 5 = 8,93$, $C = \frac{1}{8,93} = 0,112 \mu\text{F}$.
81. Spojili bismo 3 kondenzatora po $1 \mu\text{F}$ paralelno. Njihov bi ukupni kapacitet bio $3 \cdot 10 = 30 \mu\text{F}$.
82. Prije svega spojimo 5 kondenzatora za 100 V u seriju, da ih možemo priključiti na napon 500 V . Lako je izračunati, da je kapacitet ovakve serije kondenzatora 5 puta manji nego kapacitet svakog kondenzatora pojedinačno. Ovakva serija od 5 kondenzatora ima kapacitet $250 : 5 = 50 \mu\text{F}$. Da dobijemo kapacitet $500 \mu\text{F}$, treba 10 ovakvih serija spojiti paralelno. Trebali bismo dakle ukupno $5 \cdot 10 = 50$ kondenzatora.
83. a) Da mu kapacitet bude veći: nekoliko pločica znači nekoliko paralelno spojenih kondenzatora.
b) Kapacitet je najveći, kad su ploče najbliže jedna drugoj, a to je onda, kad su pomične ploče posve unutar nepomičnih. Obratno, kapacitet je najmanji, kad su ploče međusobno najdalje, a to je onda, kad su pomične ploče posve izvan nepomičnih.
c) Kapacitet bi se povećao oko 2,3 puta, jer je prema strani 62. relativna dielektričnost transformatorskog ulja 2,3.
84. Potrebna količina niklja: $4 \text{ dm}^2 \times 0,01 \text{ mm} = 400 \text{ cm}^2 \times 0,001 \text{ cm} = 0,4 \text{ cm}^3$; $0,4 \text{ cm}^3 \times 8,9 \text{ g/cm}^3 = 3,56 \text{ grama}$.
Potrebna količina elektrike je $3,56 : 1,09 = 3,27 \text{ Ah}$.
Struja treba da iznosi: $I = 0,5 \cdot 4 = 2 \text{ A}$.
Nikljanje prema tome traje: $3,27 \text{ Ah} : 2 \text{ A} = 1,64 \text{ sata} = 1 \text{ sat i } 38 \text{ min}$.
85. Potrebna količina bakra: $5,4 \text{ dm}^2 \times 0,02 \text{ mm} = 540 \text{ cm}^2 \times 0,002 \text{ cm} = 1,08 \text{ cm}^3$; $1,08 \text{ cm}^3 \times 8,9 \text{ g/cm}^3 = 9,6 \text{ grama}$.
Potrebna količina elektrike: $9,6 : 1,18 = 8,15 \text{ Ah}$.
Struja treba da iznosi: $I = 0,4 \cdot 5,4 = 2,16 \text{ A}$.
Trajanje bakrenja: $8,15 \text{ Ah} : 2,16 \text{ A} = 3,78 \text{ h} = 3 \text{ sata i } 47 \text{ min}$.
86. $110 : 2 = 55$ ćelija.
87. $110 : 1,83 = 60$ ćelija. Treba dakle dodati $60 - 55 = 5$ ćelija.
88. a) Kod paralelnog spoja napon ostaje 12 V , kapacitet se potrostručuje: $50 \cdot 3 = 150 \text{ Ah}$.
b) Kod serijskog spoja napon se potrostručuje: $12 \cdot 3 = 36 \text{ V}$. Kapacitet ostaje isti, t. j. 50 Ah .
89. $55 \text{ ćelija} \times 2,7 \text{ V} = 148,5 \text{ V}$.
90. Kad bi kapacitet iznosio 30 Ah , pražnjenje bi trajalo $30 : 10 = 3 \text{ h}$. Međutim pri trosatnom pražnjenju kapacitet se smanjuje na 75% , t. j. $0,75 \cdot 30 = 22,5 \text{ Ah}$. Pražnjenje bi dakle trajalo $22,5 : 10 = 2,25 \text{ h}$, a pri tako kratkotrajnom pra-

- žnjenju kapacitet bi se smanjio na kojih 70%. Faktični kapacitet pri pražnjenju strujom 10 A iznosio bi dakle $0,70 \cdot 30 = 21 \text{ Ah}$, a pražnjenje bi trajalo $21 : 10 = 2,1 \text{ h}$.
91. $30 \text{ A} \times 4 \text{ h} = 120 \text{ Ah}$. Pri četvorosatnom pražnjenju kapacitet iznosi približno 80% kapaciteta pri 10-satnom pražnjenju, pa 10-satni kapacitet te baterije treba da iznosi: $120 : 0,80 = 150 \text{ Ah}$.
92. Sila $F = 50 \text{ kg}$. Put sile $l = 1,80 \text{ m}$. Rad A iznosi dakle:

$$A = Fl = 50 \cdot 1,80 = 90 \text{ kgm.}$$
93. $P = A : t = 90 : 3 = 30 \text{ kgm/s.}$
94. $1 \text{ kWh} = 367\,000 \text{ kgm}$; $15 \text{ kWh} = 15 \cdot 367\,000 = 5\,500\,000 \text{ kgm.}$
95. $1 \text{ kWh} = 270\,000 \text{ mkp}$; $0,22 \text{ KSh} = 0,22 \cdot 270\,000 = 59\,400 \text{ mkp.}$
96. Sila $F = 10 \text{ kg}$, put $l = 3 \text{ km} = 3000 \text{ m}$, vrijeme $t = 1 \text{ sat } 40 \text{ min} = 100 \text{ min} = 6000 \text{ s}$. Rad:

$$A = Fl = 10 \cdot 3000 = 30\,000 \text{ kgm.}$$
- Snaga:

$$P = \frac{A}{t} = \frac{30\,000}{6\,000} = 5 \text{ kgm/s.}$$
- $1 \text{ kW} = 102 \text{ kgm/s}$; $1 \text{ kgm/s} = \frac{1}{102} = 0,0098 \text{ kW}$; $5 \text{ kgm/s} = 0,0098 \cdot 5 = 0,049 \text{ kW.}$
 $1 \text{ KS} = 75 \text{ kgm/s}$; $1 \text{ kgm/s} = \frac{1}{75} = 0,01333 \text{ KS}$; $5 \text{ kgm/s} = 0,01333 \cdot 5 = 0,067 \text{ KS.}$
97. a) Rad obavljen kroz $1 \text{ min} = 60 \text{ s}$:

$$A = Fl = 1000 \cdot 5 = 5000 \text{ kgm.}$$
- Snaga:

$$P = \frac{A}{t} = \frac{5000}{60} = 83,3 \text{ kgm/s.}$$
- b) $P = 83,3 : 102 = 0,817 \text{ kW.}$
c) $P = 83,3 : 75 = 1,11 \text{ KS.}$
98. Sisaljka vrši rad protiv sile teže. $F = 30 \text{ tona} = 30\,000 \text{ kg}$, put $l = 15 \text{ m}$. Rad u 1 minuti:

$$A_{\text{min}} = Fl = 30\,000 \cdot 15 = 450\,000 \text{ kgm.} \quad P = \frac{A}{t} = \frac{450\,000}{60} = 7500 \text{ kgm/s.}$$

 $P = 7500 : 102 = 73,5 \text{ kW.}$
Rad za vrijeme 5 sati: $A = 73,5 \cdot 5 = 367 \text{ kWh.}$
99. $S = 300 + 4 \cdot 75 = 600 \text{ kg}$; $l = 15 \text{ m}$; $A = 600 \cdot 15 = 9000 \text{ kgm.}$
(Redovito lift ima protuteg, pa dio potrebnog rada obavlja protuteg.)
100. $F = 3 \text{ kgm/s}$; $t = 8 \text{ sati} = 8 \cdot 60 = 480 \text{ min} = 480 \cdot 60 = 28\,800 \text{ s.}$
 $A = 3 \cdot 28\,800 = 86\,400 \text{ kgm} = 86\,400 : 367\,000 = 0,235 \text{ kWh.}$
Radnik izvrši za 8 sati rad od samo 0,235 kWh. A razmjerno mali motor od 10 kW može za 8 sati izvršiti rad od 80 kWh, dakle $80 : 0,235 = 340$ puta više nego radnik. I odavle se vidi ogromna pomoć, koju stroj pruža čovjeku.
101. Energija je jednaka onom radu, koji bi trebalo obaviti, da količinu od $200\,000 \text{ m}^3 = 200\,000\,000 \text{ kg}$ vode dignemo na visinu od 150 m. Dakle

$$W = 200\,000\,000 \cdot 150 = 30\,000\,000\,000 \text{ kgm.}$$

A budući da je $1 \text{ kWh} = 367\,000 \text{ kgm}$, to je

$$W = 30\,000\,000\,000 : 367\,000 = 81\,700 \text{ kWh.}$$
102. $c = 1 \text{ kcal/kg}$, $G = 10 \text{ kg}$, $t = 75 - 12 = 63^\circ \text{ C}$,

$$Q = cGt = 1 \cdot 10 \cdot 63 = 630 \text{ kcal.}$$
103. $c = 0,093 \text{ kcal/kg}$, $G = 10 \text{ kg}$, $t = 1083 - 20 = 1063^\circ \text{ C}$,

$$Q = cGt = 0,093 \cdot 10 \cdot 1063 = 989 \text{ kcal.}$$
104. Pri padanju kamena potencijalna energija postepeno prelazi u kinetičku tako, da se na kraju pada sva potencijalna energija pretvorila u kinetičku. Kinetička energija na kraju pada bit će prema tome točno jednaka potencijalnoj, koju je kamen imao prije početka padanja, jer bi inače dio energije ili propao

ili bi iz ničega nastao, a to je prema zakonu o održanju energije nemoguće. Potencijalna energija, koju je kamen imao prije početka padanja, jednaka je radu, koji je potrebno izvršiti, da se taj kamen digne na tu visinu. Taj rad iznosi:

$$W = A = 100 \cdot 10 = 1000 \text{ kgm.}$$

Kinetička energija kamena časa prije, nego što se on dotakne zemlje, bit će dakle također 1000 kgm.

105. Snaga motora iznosi:

$$P = 75 \cdot 10 = 750 \text{ kgm/s (jer je 1 KS = 75 kgm/s).}$$

Za 1 min = 60 s motor izvrši rad:

$$A = Pt = 750 \cdot 60 = 45\,000 \text{ kgm.}$$

A budući da je 1 kcal = 427 kgm, razvijena toplina iznosi:

$$Q = 45\,000 : 427 = 105 \text{ kcal.}$$

106. 5 žarulja po 40 W troši $5 \times 40 = 200 \text{ W}$. Potrošak za vrijeme od 10 sati:

$$A = 200 \cdot 10 = 2000 \text{ Wh} = 2 \text{ kWh.}$$

107. $100 \text{ W} \times 1000 \text{ h} = 100\,000 \text{ Wh} = 100 \text{ kWh}$ po Din 15,—, dakle ukupno Din 1500,—.

108. $8 \text{ kW} \times 20 \text{ h} = 160 \text{ kWh}$ dnevno po Din 15,— daje ukupno Din 2400,— dnevno.

109. Volumen sobe iznosi $5 \cdot 5 \cdot 3 = 75 \text{ m}^3$. Za grijanje svakog m^3 potrebno je 50 W, dakle $75 \cdot 50 = 3750 \text{ W} = 3,75 \text{ kW}$. 8 sati dnevno kroz 30 dana (1 mjesec) daje $8 \cdot 30 = 240$ sati. Mjesečni bi potrošak iznosio dakle.

$$A = 3,75 \cdot 240 = 900 \text{ kWh.}$$

Uz cijenu od Din 5,— po kWh ovaj potrošak stoji $900 \cdot 5 = 4500$ dinara mjesečno. Kako se vidi, električna energija mora biti vrlo jeftina, ako njome hoćemo grijati prostorije, a da to ne bude preskupo.

$$110. \frac{10,8 \text{ kWh}}{6 \text{ h}} = 1,8 \text{ kW.}$$

$$111. \text{ Potrošak iznosi } 3577,7 - 3576,8 = 0,9 \text{ kWh. } \frac{0,9 \text{ kWh}}{2 \text{ h}} = 0,45 \text{ kW} = 450 \text{ W.}$$

$$112. 30 \text{ min} = 0,5 \text{ sati. } 6,2 \text{ kWh} : 0,5 \text{ h} = 12,4 \text{ kW, dakle je motor preopterećen.}$$

$$\begin{array}{l} 113. 1 \cdot 60 \text{ W kroz } 5 \cdot 30 = 150 \text{ sati; } 60 \cdot 150 = 9000 \text{ Wh} = 9 \text{ kWh} \\ 1 \cdot 40 \text{ W kroz } 2 \cdot 30 = 60 \text{ sati; } 40 \cdot 60 = 2400 \text{ Wh} = 2,4 \text{ kWh} \\ 1 \cdot 700 \text{ W kroz } 0,5 \cdot 30 = 15 \text{ sati; } 700 \cdot 15 = 10500 \text{ Wh} = 10,5 \text{ kWh} \\ 1 \cdot 450 \text{ W kroz } 5 \text{ sati; } 450 \cdot 5 = 2250 \text{ Wh} = 2,25 \text{ kWh} \end{array}$$

Ukupni mjesečni potrošak 24,15 kWh

Obračun:

$$\begin{array}{l} 15 \text{ kWh po Din 15,—; } 5 \cdot 15 = \text{Din } 75,— \\ 19,15 \text{ kWh po Din } 8,—; 19,15 \cdot 8 = \text{Din } 153,20 \end{array}$$

Ukupni mjesečni troškovi Din 228,20

$$114. 6000 \text{ t} = 6\,000\,000 \text{ kg. Potrebna električna energija } 6\,000\,000 \cdot 20 = 120\,000\,000 \text{ kWh.}$$

$$115. \eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{7,5}{9,0} = 0,834 = 83,4 \%.$$

$$116. P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{3,3}{0,78} = 4,23 \text{ kW.}$$

$$\begin{array}{l} 117. \text{ Energija primljena iz mreže iznosi: } W_1 = 14 \cdot 24 = 336 \text{ kWh.} \\ \text{Korisno upotrebljena energija iznosi: } W_2 = 2600 \cdot 30 = 78\,000 \text{ tm.} \\ \text{A budući da je 1 kWh} = 367 \text{ tm, bude:} \end{array}$$

$$W_2 = 78\,000 : 367 = 213 \text{ kWh, } \eta = \frac{W_2}{W_1} = \frac{213}{336} = 63,4 \%.$$

118. Uzevši u obzir $\eta = 0,7$ bit će pri dizanju vršena snaga:

$$P = 55 \cdot 0,7 = 38,5 \text{ KS} = 38,5 \cdot 75 = 2890 \text{ kgm/s.}$$

Brzina dizanja = 1 m/min = 1 : 60 = 0,0167 m/s. $P = Gl$, gdje je l put prevaljen u 1 s, t. j. brzina = 0,0167 m/s. Odavle:

$$G = \frac{P}{l} = \frac{2890}{0,0167} = 173\,000 \text{ kg} = 173 \text{ tone.}$$

119. Po kWh se troši $4,2 \cdot 3200 = 13\,400$ kcal. Kad ne bi bilo nikakvih gubitaka, 1 kWh bi se mogao proizvesti sa 860 kcal, jer je 1 kWh = 860 kcal. Dakle je:

$$\eta = \frac{860}{13\,400} = 0,064 = 6,4\%.$$

120. Po kWh se troši $2,2 \cdot 1800 = 3960$ kcal, pa je korisnost

$$\eta = \frac{860}{3960} \cdot 100 = 21,7\%$$

prema svega 6,4% u elektrani iz zadatka 119. Ugljen se prema tome iskorišćuje $21,7 : 6,4 = 3,4$ puta bolje.

121. $P_2 = 70$ kW. $P_1 = 2,5 \cdot 4 = 10$ tm/s = 10 000 kgm/s = 10 000 : 102 = 98 kW.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{70}{98} = 0,715 = 71,5\%.$$

122. $Q = cGt$; $c = 1$ kcal/kg; $G = 1$ kg; $t = 100 - 14 = 86^\circ\text{C}$. $Q = 1 \cdot 1 \cdot 86 = 86$ kcal. A budući da je 1 kWh = 860 kcal, bila bi potrebna električna energija:

$$A = 86 : 860 = 0,1 \text{ kWh.}$$

No to bi bilo potrebno, kad ne bi bilo gubitaka. Uz $\eta = 0,7$ potrebno je:

$$A = \frac{0,1}{0,7} = 0,143 \text{ kWh po Din 8, — = Din 1,14.}$$

123. Potrebna toplina za grijanje vode iznosi $Q = cGt$, gdje je $c = 1$ kcal/kg, $G = 30$ kg, $t = 90 - 10 = 80^\circ\text{C}$.

$$Q = 1 \cdot 30 \cdot 80 = 2400 \text{ kcal} : 860 = 2,79 \text{ kWh.}$$

Uz $\eta = 0,85$ iznosi potrebna energija: $A = \frac{2,79}{0,85} = 3,28 \text{ kWh.}$

$A = Pt$, gdje je $t = 8$ sati. Odavle: $P = \frac{A}{t} = \frac{3,28}{8} = 0,41 \text{ kW} = 410 \text{ W.}$

124. $W = 1 \text{ kWh} \cdot 0,75 = 0,75 \text{ kWh}$; $Q = 0,75 \cdot 860 = 645 \text{ kcal.}$

$Q = cGt$, odavle $t = \frac{Q}{cG}$, gdje je $c = 1$ kcal/kg, $G = 100$ kg.

$$t = \frac{645}{1 \cdot 100} = 6,45^\circ\text{C.}$$

125. $P = UI = 220 \cdot 5 = 1100 \text{ W} = 1,1 \text{ kW.}$

126. $P = UI$; $I = \frac{P}{U} = \frac{100}{220} = 0,455 \text{ A.}$

127. $P = UI = 110 \cdot 4,5 = 495 \text{ W} \sim 0,5 \text{ kW.}$ $A = Pt = 0,5 \cdot 1,5 = 0,75 \text{ kWh.}$

128. $P_2 = 20 \text{ KS} \cdot 0,736 = 14,7 \text{ kW.}$ $\eta = \frac{P_2}{P_1}$, odavle:

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{14,7}{0,845} = 17,4 \text{ kW} = 17\,400 \text{ W. } P = UI; I = \frac{P}{U} = \frac{17\,400}{440} = 39,5 \text{ A.}$$

129. $P = UI$; $U = \frac{P}{I} = \frac{2000}{9,1} = 220 \text{ V.}$

130. $P = I^2 R = 5^2 \cdot 200 = 5000 \text{ W} = 5 \text{ kW}$; $t = 17 \cdot 60 = 1020 \text{ s.}$

$$Q = 0,24 Pt = 0,24 \cdot 5000 \cdot 1020 = 1\,220\,000 \text{ cal} = 1220 \text{ kcal.}$$

A možemo računati i ovako. Potrošak električne energije iznosi:

$$A = 5 \text{ kW} \times 1020 \text{ s} = 5100 \text{ kW} \cdot \text{s} : 3600 = 1,42 \text{ kWh.}$$

$$Q = 1,42 \cdot 860 = 1220 \text{ kcal.}$$

$$131. P = I^2 R; R = \frac{P}{I^2}; I = \frac{P}{U} = \frac{2000}{220} = 9,1 \text{ A.}$$

$$R = \frac{P}{I^2} = \frac{2000}{9,1^2} = 24,2 \Omega \text{ ili } R = \frac{U}{I} = \frac{220}{9,1} = 24,2 \Omega.$$

$$132. P = I^2 R = 100^2 \cdot 0,0006 = 6 \text{ W}; t = 1 \text{ h} = 3600 \text{ s.}$$

$$Q = 0,24 \cdot 6 \cdot 3600 = 5180 \text{ cal} = 5,18 \text{ kcal.}$$

1 kcal ugrije 1 litru vode za 1 °C, pa je 5,18 kcal ugrije za 5,18 °C.

$$133. p = I^2 R; R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,029 \cdot 2 \cdot 500}{25} = 1,16 \Omega. p = 30^2 \cdot 1,16 = 1044 \text{ W} = 1,04 \text{ kW.}$$

$$134. \text{ Snaga, koju motor daje, iznosi: } P_2 = 15 \text{ KS} = 15 \cdot 0,736 = 11,0 \text{ kW.}$$

Snagu, koju motor uzima, izračunamo iz formule:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}; P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{11,0}{0,83} = 13,3 \text{ kW.}$$

$$\text{Struja: } I = \frac{P}{U} = \frac{13\,300}{440} = 30,2 \text{ A. Otpor: } R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,018 \cdot 2 \cdot 800}{25} = 1,15 \Omega.$$

$$\text{Gubitak snage: } p = I^2 R = 30,2^2 \cdot 1,15 = 1050 \text{ W} = 1,05 \text{ kW.}$$

$$p \% = \frac{p}{P} \cdot 100 = \frac{1,05}{13,3} \cdot 100 = 7,9 \%.$$

135. Kao i u prethodnom zadatku:

$$P_2 = \frac{P_1}{\eta} = \frac{15}{0,845} = 17,75 \text{ kW}; I = \frac{P}{U} = \frac{17\,750}{440} = 40,3 \text{ A.}$$

Gubitak snage može iznositi do 7 % od snage, t. j.

$$p = 0,07 P = 0,07 \cdot 17,75 = 1,24 \text{ kW} = 1240 \text{ W.}$$

$$p = I^2 R, \text{ a odavle } R = \frac{p}{I^2} = \frac{1240}{40,3^2} = 0,764 \Omega.$$

$$R = \frac{\rho l}{S}; S = \frac{\rho l}{R} = \frac{0,018 \cdot 2 \cdot 660}{0,764} = 31,1 \text{ mm}^2.$$

Treba uzeti standardizirani presjek $S = 35 \text{ mm}^2$.

136. S istog razloga, s kojega nema magnetskog polja oko vodiča na slici 98. Uvijek su zajedno 2 žice, u kojima struja teče u suprotnom smjeru, pa se magnetska djelovanja tih struja poništavaju.

$$137. H = \frac{IN}{l} = \frac{3 \cdot 50}{0,10} = 1500 \text{ A/m.}$$

$$138. \text{ Sada bi bilo: } H = \frac{IN}{l} = \frac{1,5 \cdot 50}{0,10} = 750 \text{ A/m.}$$

Jakost magnetskog polja bi se također smanjila na polovinu.

$$139. \text{ Sada bi bilo } H = \frac{IN}{l} = \frac{3 \cdot 50}{0,20} = 750 \text{ A/m.}$$

Jakost magnetskog polja bi se i sada smanjila na polovinu.

140. Duljina svitka po osi: $l = d\pi = 30\pi = 94,2 \text{ cm} = 0,942 \text{ m}$. Jakost magnetskog polja H izračunamo po formuli $H = \frac{IN}{l}$. Magnetsku indukciju B očitamo za pripadno polje iz krivulje magnetiziranja na slici 111., a B_0 izračunamo po formuli $B_0 = 1,25 H / 1\,000\,000$ (vidi str. 107). Magn. propustljivost μ dana je omjerom B/B_0 . Magn. tok $\Phi = BS$, gdje je $S = 100 \text{ cm}^2 = 0,01 \text{ m}^2$. Na taj način izračunamo redom za svaku struju:

	$I =$	0,1	0,3	1	A
a)	$H =$	106	318	1060	A/m
b)	$B =$	0,72	1,10	1,38	T
c)	$B_0 =$	$\frac{1,325}{10\,000}$	$\frac{3,97}{10\,000}$	$\frac{13,25}{10\,000}$	T
	$\mu =$	5440	2770	1040	
d)	$\Phi =$	7,2	11,0	13,8	mWb

141. Magnetski tok $\Phi = 1,2 \text{ mWb} = 0,0012 \text{ Wb}$. Presjek $S = 10 \text{ cm}^2 = 0,001 \text{ m}^2$. Magnetska indukcija $B = \frac{\Phi}{S} = \frac{0,0012}{0,001} = 1,2 \text{ T}$. Da se proizvede ova magnetska indukcija, potrebna je prema slici 111. jakost magnetskog polja $H = 500 \text{ A/m}$. Struju izračunamo iz formule:

$$H = \frac{IN}{l}; \text{ odavle } I = \frac{Hl}{N}; l = d\pi = 0,15\pi = 0,471 \text{ m}, I = \frac{500 \cdot 0,471}{200} = 1,18 \text{ A}.$$

142. a) Kad pritisnemo tipkalo T, strujni krug je zatvoren, struja poteče i namagnetizira čelik elektromagneta. Elektromagnet privuče kotvu.

b) Kad elektromagnet privuče kotvu, prekine se kontakt K, a time i strujni krug. Struja više ne teče, elektromagnet se razmagnetizira, pa opruga O privuče kotvu u prvotni položaj.

c) Elektromagnet i kotva moraju biti od mekog dinamo-čelika. Kad bi bili na pr. od drva, magnetizam bi bio daleko slabiji, preslab, a da bi zvonice radilo. Tvrdi čelik također nije nikako podesan, jer se on teško namagnetizira i teško razmagnetizira.

d) Po pravilu desne ruke, obuhvatajući u misli magnet kao na slici 100. tako, da prsti pokazuju smjer struje, ustanovimo, da je smjer magnetskog toka suprotan smjeru kazaljke na satu.

e) Polarnost elektromagneta bi se izmijenila, ali bi on kotvu posve jednako privlačio.

143. Ukupna duljina magnetskog kruga iznosi kao i u zadatku 141.: $l = 0,471 \text{ m}$. Od toga u zraku $2 \text{ mm} = 0,002 \text{ m}$, a u čeliku $0,471 - 0,002 = 0,469 \text{ m}$. Jakost magnetskog polja H u čeliku je jednaka, kao što smo izračunali u zadatku 141., t. j. $H = 500 \text{ A/m}$. Prema tome je potrebna magnetomotorna sila za čelik:

$$Hl = 500 \cdot 0,469 = 235 \text{ A}.$$

Za zrak izračunamo H iz formule:

$$B_0 = \frac{1,25 H}{1\,000\,000}; H = \frac{1\,000\,000 B_0}{1,25} = 960\,000 \text{ A/m}.$$

Za zrak je dakle potrebna magnetomotorna sila: $Hl = 960\,000 \cdot 0,002 = 1920 \text{ A}$. Ukupna magnetomotorna sila iznosi: $IN = 235 + 1920 = 2155 \text{ A}$.

Odavle:

$$I = \frac{IN}{N} = \frac{2155}{200} = 10,8 \text{ A}.$$

Potrebna struja je dakle $10,8 : 1,18 = 9,1$ puta veća nego onda, kad nije bilo zračnog raspora.

144. Označimo: Φ — magnetski tok, B — magnetska indukcija, H_z — jakost magnetskog polja u čeliku, H_z — jakost magnetskog polja u zraku, S — presjek magneta, l_z — duljina magnetskih linija u čeliku, l_z — duljina magnetskih linija u zraku, N — broj zavoja, I — struja magnetiziranja. Poznato je $\Phi = 1\,300\,000 \text{ M}$, $S = 100 \text{ cm}^2$, $l_z = 120 \text{ cm}$, $l_z = 2 \text{ cm}$, $N = 1000$.

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{1\,300\,000}{100} = 13\,000 \text{ G}.$$

Iz krivulje magnetiziranja na slici 111. dobijemo za $B = 13\,000 \text{ G} (= 1,3 \text{ T})$, da je $H_z = 750 \text{ A/m} = 7,5 \text{ A/cm}$. $H_z = \frac{B}{1,25} = 13\,000 : 1,25 = 10\,400 \text{ A/cm}$.

$$H_z l_z = 10\,400 \cdot 2 = 20\,800 \text{ A}$$

$$H_z l_z = 7,5 \cdot 120 = 900 \text{ A}$$

Ukupno 21 700 A

$$I = \frac{21\,700}{N} = \frac{21\,700}{1000} = 21,7 \text{ A}.$$

145. $F = 0,102 BI = 0,102 \cdot 1,2 \cdot 0,5 \cdot 60 = 3,67 \text{ kg}$.

146. Računamo kao u 34. primjeru:

$$B = \frac{2I}{10\,000\,000\,a} = \frac{2 \cdot 15\,000}{10\,000\,000 \cdot 0,15} = 0,02\,T,$$

$$F = 0,102\,B\,l\,I = 0,12 \cdot 0,02 \cdot 1,5 \cdot 15\,000 = 46\,kg.$$

$$147. B = \frac{2I}{10\,000\,000\,a} = \frac{2 \cdot 5000}{10\,000\,000 \cdot 0,5} = 0,002\,T,$$

$$F = 0,102\,B\,l\,I = 0,102 \cdot 0,002 \cdot 35 \cdot 5000 = 35,7\,kg.$$

$$148. B = \frac{2I}{10\,000\,000\,a} = \frac{2 \cdot 4000}{10\,000\,000 \cdot 2,5} = 0,000\,32\,T,$$

$$F = 0,102\,B\,l\,I = 0,102 \cdot 0,000\,32 \cdot 140 \cdot 4000 = 18,3\,kg.$$

149. Za to je potrebno $\frac{1}{4}$ periode. Kod 50 Hz jedna perioda traje 1/50 sekunde. $\frac{1}{4} \cdot \frac{1}{50} = \frac{1}{200}$ sekunde.

$$150. \frac{1}{42} = 0,0238\,s.$$

151. 3600 okretaja u minuti = 3600 : 60 = 60 okretaja u sekundi. Kod dvopolnog generatora jedan okretaj znači jednu periodu. Frekvencija struje bit će dakle 60 Hz.

152. 10 000 V je efektivni napon. Maksimalni napon je 1,41 puta viši:

$$1,41 \cdot 10\,000 = 14\,100\,V.$$

153. Za proizvodnju topline važna je efektivna vrijednost struje, koja je 1,41 puta manja od maksimalne, dakle iznosi 10 : 1,41 = 7,1 A.

$$A = I^2 R t = 7,1^2 \cdot 10 \cdot 1 = 504\,Wh = 0,504\,kWh,$$

$$Q = 0,504 \cdot 860 = 433\,kcal.$$

$$154. P = UI \cos \varphi = 220 \cdot 12 \cdot 0,72 = 1900\,W = 1,9\,kW.$$

$$155. P = UI \cos \varphi; \quad \cos \varphi = \frac{P}{UI} = \frac{2100}{440 \cdot 7,6} = 0,63.$$

$$156. P_2 = 4\,KS = 4 \cdot 0,736 = 2,94\,kW, \quad \eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{2,94}{0,80} = 3,68\,kW.$$

$$P = UI \cos \varphi, \quad I = \frac{P}{U \cos \varphi} = \frac{3680}{220 \cdot 0,75} = 22,3\,A.$$

157. Kod istosmjerne struje: $P = UI = 110 \cdot 8,7 = 957\,W$.

Kod izmjenične struje: $P = UI \cos \varphi = 110 \cdot 2,7 \cdot 0,31 = 92\,W$.

$$158. P_z = UI = 230 \cdot 50 = 11\,500\,VA = 11,5\,kVA.$$

$$P = UI \cos \varphi = 230 \cdot 50 \cdot 0,70 = 8050\,W \approx 8\,kW.$$

$$159. P_z = UI = 2000 \cdot 82,5 = 165\,000\,VA = 165\,kVA.$$

Generator ne može trajno davati viši napon ni jaču struju od onih, za koje je građen. Stoga generator uz $\cos \varphi = 0,7$ nije trajno mogao davati snagu veću od one, koja odgovara tom naponu i toj struji:

$$P = UI \cos \varphi = 2000 \cdot 82,5 \cdot 0,7 = 115\,500\,W = 115,5\,kW.$$

A uz $\cos \varphi = 1$ on je mogao davati:

$$P = UI \cos \varphi = 2000 \cdot 82,5 \cdot 1 = 165\,000\,W = 165\,kW.$$

Uz $\cos \varphi = 1$ djelatna snaga je jednaka prividnoj.

$$160. \text{Kao i kod istosmjerne struje: } U = IR; \quad I = \frac{U}{R} = \frac{220}{100} = 2,2\,A.$$

$$161. X_L = 2\pi fL = 314 \cdot 0,1 = 31,4\,\Omega; \quad U = I X_L; \quad I = \frac{U}{X_L} = \frac{110}{21,4} = 3,5\,A.$$

$$162. X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{314 \cdot 8,1} \cdot 1\,000\,000 = 393\,\Omega. \quad \left(C = 8,1\,\mu F = \frac{8,1}{1\,000\,000} F; \quad \frac{1}{C} = \frac{1\,000\,000}{8,1} \right)$$

$$U = I X_C; \quad I = \frac{U}{X_C} = \frac{110}{393} = 0,28\,A.$$

$$163. X_L = 2\pi fL = 314 \cdot 0,01 = 3,14\,\Omega; \quad U = I X_L = 90 \cdot 3,14 = 283\,V.$$

164. $R = 20 \Omega$; $X = 2\pi fL = 314 \cdot 0,1 = 31,4 \Omega$. Da odredimo ukupni otpor Z , poslu-
žimo se grafičkom konstrukcijom sasvim jednakom kao na slici 147. Za tu kon-
strukciju odredimo mjerilo $1 \text{ cm} = 2 \Omega$. Na taj način dobijemo $Z = 18,6 \text{ cm} =$
 $= 37,2 \Omega$. Isto možemo dobiti i pomoću Pitagorina poučka:

$$Z^2 = R^2 + X_L^2$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{20^2 + 31,4^2} = \sqrt{400 + 987} = 37,2 \Omega.$$

$$U = IZ; \quad I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{37,2} = 5,91 \text{ A}.$$

Napon na stezaljkama otpornika: $U_R = IR = 5,91 \cdot 20 = 118,2 \text{ V}$.

Napon na stezaljkama svitka: $U_L = IX_L = 5,91 \cdot 31,4 = 186 \text{ V}$.

165. $R = 350 \Omega$; $X_c = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{314 \cdot 12} \cdot 1\,000\,000 = 266 \Omega$.

Mjerilo za grafičku konstrukciju $1 \text{ mm} = 5 \Omega$. Dakle $R = 350 : 5 = 70 \text{ mm}$; $X_c =$
 $= 266 : 5 = 53 \text{ mm}$. Za R povučemo vodoravnu dužinu od 70 mm , a na kraju
te dužine spustimo okomicu prema dolje od 53 mm , kojom je predstavljen otpor
 X_c . Kraj te okomice spojimo s početkom vodoravne duljine. Ta je spojnica
dugačka 88 mm , a predstavlja ukupni otpor Z . Otpor Z iznosi prema tome
 $Z = 88 \cdot 5 = 440 \Omega$. Otpor Z možemo dobiti i pomoću Pitagorina poučka:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_c^2} = \sqrt{350^2 + 266^2} = \sqrt{122\,500 + 70\,200} = 440 \Omega.$$

$$U = IZ; \quad I = \frac{U}{Z} = \frac{220}{440} = 0,5 \text{ A}.$$

Napon na stezaljkama otpornika: $U_R = IR = 0,5 \cdot 350 = 175 \text{ V}$.

Napon na stezaljkama kondenzatora: $U_c = IX_c = 0,5 \cdot 266 = 133 \text{ V}$.

166. $R = 200 \Omega$. $X_L = 2\pi fL = 314 \cdot 1,5 = 471 \Omega$.

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{314 \cdot 10} \cdot 1\,000\,000 = 318 \Omega.$$

Uzmimo opet mjerilo $1 \text{ mm} = 5 \Omega$. Grafičkom konstrukcijom vrlo sličnom onoj
na slici 149. dobijemo: $Z = 50,4 \text{ mm}$, a tome kod mjerila $1 \text{ mm} = 5 \Omega$ odgovara
 $Z = 50,4 \cdot 5 = 252 \Omega$. Isto možemo dobiti i pomoću Pitagorina poučka:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}; \quad X = X_L - X_c = 471 - 318 = 153 \Omega.$$

$$Z = \sqrt{200^2 + 153^2} = \sqrt{40\,000 + 23\,400} = 252 \Omega.$$

$$U = IZ; \quad I = \frac{U}{Z} = \frac{100}{252} = 0,397 \text{ A}.$$

Pojedini naponi iznose:

$$U_R = IR = 0,397 \cdot 200 = 79,4 \text{ V}.$$

$$U_L = IX_L = 0,397 \cdot 471 = 187 \text{ V}.$$

$$U_c = IX_c = 0,397 \cdot 318 = 126 \text{ V}.$$

167. Načinimo jednaku grafičku konstrukciju kao na slici 152. Uzmimo mjerilo
 $1 \text{ mm} = 1 \text{ kVA}$ odnosno kW. Djelatnu snagu $65 \text{ kW} = 65 \text{ mm}$ crtamo vodoravno,
a na njezinu kraju kao okomicu prema gore nanesimo jalovu snagu $60 \text{ kVar} =$
 $= 60 \text{ mm}$. Za prividnu snagu dobijemo $88,5 \text{ mm}$, pa je prema tome $P_z = 88,5 \text{ kVA}$.

Prividnu snagu P_z možemo dobiti i pomoću Pitagorina poučka:

$$P_z^2 = P^2 + P_x^2;$$

$$P_z = \sqrt{P^2 + P_x^2} = \sqrt{65^2 + 60^2} = \sqrt{4225 + 3600} = 88,5 \text{ kVA}.$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{P_z} = \frac{65}{88,5} = 0,734.$$

Struju izračunamo iz: $P_z = UI$; $I = \frac{P_z}{U} = \frac{88\,500}{440} = 201 \text{ A}$.

168. $P_z = UI = 205 \cdot 17,4 = 3570 \text{ VA} = 3,57 \text{ kVA}$. Jalovu snagu izračunamo grafički,
jednako kao na slici 153. Mjerilo uzmimo $1 \text{ mm} = 50 \text{ VA}$ odnosno W, pa je

$P = 2,6 \text{ kW} = 52 \text{ mm}$, $P_z = 3,57 \text{ kVA} = 71,4 \text{ mm}$. Iz takve slike dobijemo: $P_x = 49,0 \text{ mm} = 2,43 \text{ kVar}$. P_x možemo dobiti i po Pitagorinu poučku:

$$P_z^2 = P^2 + P_x^2; \quad P_x^2 = P_z^2 - P^2,$$

$$P_x = \sqrt{P_z^2 - P^2} = \sqrt{3,57^2 - 2,6^2} = \sqrt{12,74 - 6,76} = 2,45 \text{ kVar},$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{P_z} = \frac{2,6}{3,57} = 0,73.$$

$$169. \cos \varphi = \frac{P}{P_z}; \quad P_z = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{78}{0,65} = 120 \text{ kVA}.$$

Na jednaki način kao u prethodnom zadatku (uz mjerilo od na pr. $1 \text{ mm} = 2 \text{ kVA}$ odnosno kW) dobijemo:

$$P_x = 91 \text{ kVar}.$$

Isto možemo dobiti i pomoću Pitagorina poučka.

$$P_z = UI; \quad I = \frac{P_z}{U} = \frac{120\,000}{3000} = 40 \text{ A}.$$

$$170. X_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{314 \cdot 167} \cdot 1\,000\,000 = 19,1 \Omega.$$

Struja, koju uzima kondenzator:

$$U_c = I_c X_c; \quad I_c = \frac{U_c}{X_c} = \frac{205}{19,1} = 10,7 \text{ A}.$$

$P_c = U_c I_c = 205 \cdot 10,7 = 2190 \text{ Var} = 2,19 \text{ kVar}$. Ovu kapacitivnu jalovu snagu treba odbiti od induktivne jalove snage, da se dobije ukupna jalova snaga:

$$P_x = 2,43 - 2,19 = 0,24 \text{ kVar}.$$

Grafičkom konstrukcijom jednakom kao na slikama 153.—155. dobijemo sada za $P = 2,6 \text{ kW}$ i $P_x = 0,24 \text{ kVar}$, da je:

$$P_z = 2,61 \text{ kVA}. \quad \cos \varphi = \frac{P}{P_z} = \frac{2,6}{2,61} \approx 1, \quad I = \frac{P_z}{U} = \frac{2610}{205} = 12,7 \text{ A}.$$

171. Kondenzator bi morao proizvesti upravo toliku kapacitivnu jalovu snagu, koliko iznosi induktivna jalova snaga opterećenja.

$$P_c = 91 \text{ kVar}.$$

Da izračunamo potrebni kapacitet kondenzatora, moramo prije toga izračunati kapacitivni otpor:

$$X_c = \frac{U}{I_c};$$

struja I_c može se izračunati iz $P_c = UI_c$:

$$I_c = \frac{P_c}{U} = \frac{91\,000}{3000} = 30,3 \text{ A}, \quad X_c = \frac{U}{I_c} = \frac{3000}{30,3} = 99,0 \Omega.$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}; \quad C = \frac{1}{2\pi f X_c} = \frac{1}{314 \cdot 99,0} = 0,000\,032\,2 \text{ F} = 32,2 \mu\text{F}.$$

172. Kod električne peći je $\cos \varphi = 1$, pa je račun posve jednak kao i kod isto-smjerne struje. Struja u vodu iznosi:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{2000}{220} = 9,1 \text{ A}.$$

Otpor voda:

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,018 \cdot 2 \cdot 15}{2,5} = 0,216 \Omega.$$

I gubitak napona računa se kao kod istosmjerne struje, jer je induktivitet voda položenog pod žbuku neznan, pa ga možemo zanemariti.

$$u = IR = 9,1 \cdot 0,216 = 1,97 \text{ V}; \quad u\% = \frac{u}{U} \cdot 100 = \frac{1,97}{220} \cdot 100 = 0,9\%.$$

$$173. \quad u = IR \cos \varphi = 1,97 \cdot 0,68 = 1,34 \text{ V}, \quad u\% = \frac{u}{U} \cdot 100 = \frac{1,34}{220} \cdot 100 = 0,61\%.$$

$$174. \quad P_2 = 10 \text{ KS} \cdot 0,736 = 7,36 \text{ kW}, \quad P_1 = P = \frac{P_2}{\eta} = \frac{7,36}{0,67} = 11 \text{ kW}.$$

$$P = UI \cos \varphi; \quad I = \frac{P}{U \cos \varphi} = \frac{11\,000}{220 \cdot 0,76} = 65,8 \text{ A}. \quad R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,018 \cdot 2 \cdot 170}{35} = 0,175 \Omega.$$

$$u' = IR \cos \varphi = 65,8 \cdot 0,175 \cdot 0,76 = 8,75 \text{ V}.$$

Iz tablice na strani 153. dobijemo za $S = 35 \text{ mm}^2$ Cu i $\cos \varphi = 0,76$, da u' treba pomnožiti s 1,53:

$$u = 8,75 \cdot 1,53 = 13,4 \text{ V}. \quad u\% = \frac{u}{U} \cdot 100 = \frac{13,4}{220} \cdot 100 = 6,1\%.$$

$$p = I^2 R = 65,8^2 \cdot 0,175 = 758 \text{ W}, \quad p\% = \frac{p}{P} \cdot 100 = \frac{758}{11\,000} = 6,9\%.$$

$$175. \quad P = UI \cos \varphi; \quad I = \frac{P}{U \cos \varphi} = \frac{3800}{220 \cdot 0,8} = 21,6 \text{ A}.$$

Uzmimo presjek $S = 16 \text{ mm}^2$ pa provjerimo, da li bi on bio dovoljan.

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,018 \cdot 2 \cdot 350}{16} = 0,788 \Omega.$$

$$u' = IR \cos \varphi = 21,6 \cdot 0,788 \cdot 0,8 = 13,6 \text{ V}.$$

Iz tablice na strani 153. dobijemo za $S = 16 \text{ mm}^2$ i $\cos \varphi = 0,8$, da u' treba pomnožiti sa 1,23.

$$u = 13,6 \cdot 1,23 = 16,7 \text{ V}. \quad u\% = \frac{u}{U} \cdot 100 = \frac{16,7}{220} \cdot 100 = 7,6\%.$$

Presjek 16 mm^2 prema tome zadovoljava.

$$176. \quad P = UI \cos \varphi; \quad I = \frac{P}{U \cos \varphi} = \frac{100\,000}{3000 \cdot 0,7} = 47,6 \text{ A}; \quad R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,018 \cdot 2 \cdot 2500}{25} = 3,6 \Omega.$$

$$p = I^2 R = 47,6^2 \cdot 3,6 = 8150 \text{ W} = 8,15 \text{ kW}. \quad p\% = \frac{p}{P} \cdot 100 = \frac{8,15}{100} \cdot 100 = 8,2\%.$$

$$177. \quad I = \frac{P}{U \cos \varphi} = \frac{100\,000}{3000 \cdot 1} = 33,3 \text{ A}, \quad p = I^2 R = 33,3^2 \cdot 3,6 = 4000 \text{ W} = 4 \text{ kW}; \quad p\% = 4\%.$$

Nakon kompenzacije smanjio se gubitak snage u vodu kod prijenosa iste djelatne snage za više od polovice.

$$178. \quad N_1 = 10\,000; \quad N_2 = 110; \quad U_1 = 20 \text{ kV} = 20\,000 \text{ V}; \quad U_2 = ?$$

$$U_2 : U_1 = N_2 : N_1. \quad U_2 = U_1 \frac{N_2}{N_1} = 20\,000 \cdot \frac{110}{10\,000} = 220 \text{ V}.$$

$$179. \quad N_2 : N_1 = U_2 : U_1, \quad N_2 = N_1 \frac{U_2}{U_1} = 100 \cdot \frac{3000}{220} = 1364.$$

$$180. \quad \text{Primarno: } P_{z1} = U_1 I_1, \quad I_1 = \frac{P_{z1}}{U_1} = \frac{10\,000}{6000} = 1,67 \text{ A},$$

$$\text{sekundarno: } P_{z2} = U_2 I_2; \quad I_2 = \frac{P_{z2}}{U_2} = \frac{10\,000}{230} = 43,5 \text{ A} \quad (P_{z1} \approx P_{z2}).$$

181. Napon prema zemlji jednak je faznom naponu, a taj je:

$$U_f = \frac{U}{1,73} = \frac{30\,000}{1,73} = 17\,300 \text{ V}.$$

182. Maksimalni napon je i kod trofazne struje kao i kod jednofazne izmjenične struje 1,41 puta veći od efektivnog:

$$U_{\max} = 1,41 U = 1,41 \cdot 30\,000 = 42\,300 \text{ V}.$$

$$183. \text{ Kod } 220 \text{ V bilo bi: } I = \frac{P}{U} = \frac{1000}{220} = 4,55 \text{ A}; R = \frac{U}{I} = \frac{220}{4,55} = 48,4 \Omega.$$

Kod priključka na linijski napon od 380 V bilo bi:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{380}{48,4} = 7,85 \text{ A}, P = UI = 380 \cdot 7,85 = 2980 \text{ W} \approx 3 \text{ kW}.$$

Grijalo od 1000 W ne bi naravno takvo preopterećenje moglo dulje vremena izdržati, već bi ubrzo stradalo.

$$184. P = 1,73 UI \cos \varphi = 1,73 \cdot 380 \cdot 32 \cdot 0,86 = 18\,100 \text{ W} = 18,1 \text{ kW}.$$

$$185. P = P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{5,5}{0,83} = 6,63 \text{ kW}.$$

$$P = 1,73 UI \cos \varphi; I = \frac{P}{1,73 U \cos \varphi} = \frac{6630}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,82} = 12,3 \text{ A}.$$

$$186. P = 1,73 UI \cos \varphi; \cos \varphi = \frac{P}{1,73 UI} = \frac{9750}{1,73 \cdot 487 \cdot 13,9} = 0,83.$$

187. Žaruljama ne treba struja magnetiziranja, pa je $\cos \varphi = 1$. Stoga je:

$$P = P_z, \text{ t. j. kW} = \text{kVA}.$$

$$P = P_z = 1,73 UI = 1,73 \cdot 383 \cdot 23,4 = 15\,500 \text{ W} = 15,5 \text{ kW}.$$

$$188. \cos \varphi = \frac{P}{P_z}; P = P_z \cos \varphi = 160 \cdot 0,7 = 112 \text{ kW}.$$

$$189. \text{ Kapacitivni otpor po fazi: } X_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{314 \cdot 250} \cdot 1\,000\,000 = 12,7 \Omega.$$

Trofazni kondenzator sastoji se od 3 jednofazna kondenzatora, koji su u ovom slučaju spojeni u zvijezdu. 380 V je linijski napon, a fazni napon, koji djeluje na svaki od ta tri kondenzatora, iznosi $380 : 1,73 = 220 \text{ V}$ (slika 277.). Struja u svakoj fazi bit će:

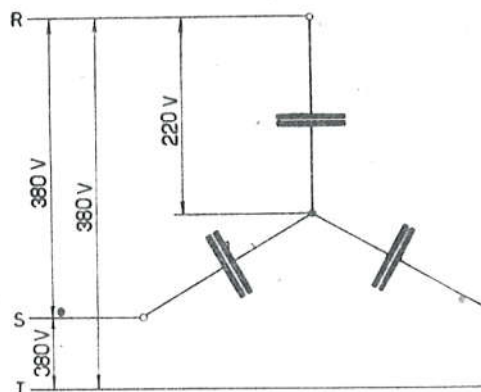
$$I_c = \frac{U_f}{X_c} = \frac{220}{12,7} = 17,3 \text{ A},$$

a kapacitivna jalova snaga po fazi:

$$P_c = U_f I_c = 220 \cdot 17,3 = 3800 \text{ Var} = 3,8 \text{ kVar po fazi}.$$

Budući da ovu jalovu snagu uzima svaka faza, bit će ukupna jalova snaga 3 puta veća, t. j.

$$P_c = 3,8 \cdot 3 = 11,4 \text{ kVar}.$$



Sl. 277. Uz rješenje zadatka 189.

$$190. \cos \varphi = \frac{P}{P_z}; P_z = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{330}{0,75} = 440 \text{ kVA}.$$

Jalovu snagu dobijemo grafičkom konstrukcijom posve jednakom kao na slici 153. (vidi 37. primjer na strani 147.). Mjerilo možemo uzeti na pr. $1 \text{ mm} = 5 \text{ kVA}$, pa dobijemo:

$$P_x = 58 \text{ mm} = 290 \text{ kVar},$$

$$\text{odnosno po fazi: } P_x = 290 : 3 = 97 \text{ kVar}.$$

Ako hoćemo posve kompenzirati tu induktivnu jalovu snagu, mora kondenzator uzimati iz mreže isto toliku kapacitivnu jalovu snagu. Uzmimo u tu svrhu trofazni kondenzator spojen u zvijezdu kao i u prethodnom zadatku. Fazni napon iznosi:

$$U_f = U : 1,73 = 10\,000 : 1,73 = 5780 \text{ V}.$$

$$P_c = U_f I_c; I_c = \frac{P_c}{U_f} = \frac{97\,000}{5780} = 16,8 \text{ A}. \quad X_c = \frac{U_f}{I_c} = \frac{5780}{16,8} = 34,4 \Omega \text{ po fazi},$$

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C}; C = \frac{1}{2\pi f X_c} = \frac{1}{314 \cdot 34,4} = 0,000\,009\,2 \text{ F} = 9,2 \mu\text{F po fazi}.$$

191. Upravo tako, kao što se prividna snaga može odrediti pomoću trokuta snaga prema slici 152., može se i prividni potrošak odrediti pomoću »trokuta potrošaka«. Djelatni potrošak nanesimo kao vodoravnu dužinu, na kraju te vodoravne dužine nanesimo kao okomicu jalovi potrošak, a prividni potrošak dobijemo onda baš tako, kao što smo na slici 152. dobili prividnu snagu. Ako uzmemo mjerilo 1 mm = 100 kWh, dobijemo:

$$\text{prividni potrošak} = 213 \text{ mm} = 21\,300 \text{ kWh},$$

$$\text{prosječni } \cos \varphi = \frac{\text{djelatni potrošak}}{\text{prividni potrošak}} = \frac{16\,875}{21\,300} = 0,79.$$

192. Transformator se može upotrebiti i za transformaciju od 5000 V na 190/110 V, jer je:

$$\frac{10\,000}{380} = \frac{5000}{190}$$

No struja transformatora ne smije nikako prijeći onu struju, za koju je on građen, a ta struja iznosi primarno (prema $P_z = 1,73 UI$):

$$I = \frac{P_z}{1,73 U} = \frac{100\,000}{1,73 \cdot 10\,000} = 5,78 \text{ A}.$$

Kod 5000 V iznosi prividna snaga uz tu struju:

$$P_z = 1,73 UI = 1,73 \cdot 5000 \cdot 5,78 = 50\,000 \text{ VA} = 50 \text{ kVA},$$

dakle je (kao i napon) za polovicu manja.

193. Otpornici su spojeni u zvijezdu kao kondenzatori u zadatku 189., te na njihovim krajevima vlada fazni napon $U_f = U : 1,73 = 380 : 1,73 = 220 \text{ V}$. Kroz svaki otpornik teče struja:

$$I = \frac{U_f}{R} = \frac{220}{30} = 7,33 \text{ A}.$$

Snaga, koju peč uzima, jest:

$$P = 3 U_f I = 3 \cdot 220 \cdot 7,33 = 4840 \text{ W} = 4,84 \text{ kW}.$$

194. Napon na krajevima otpornika bio bi sada 380 V, pa bi struja iznosila:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{380}{30} = 12,67 \text{ A},$$

$$\text{a snaga: } P = 3 UI = 3 \cdot 380 \cdot 12,67 = 14\,400 \text{ W} = 14,4 \text{ kW}.$$

195. $P = 1,73 UI \cos \phi$; $\cos \varphi = 1$ (žarulje!),

$$I = \frac{P}{1,73 U} = \frac{16\,000}{1,73 \cdot 380} = 24,3 \text{ A}, \quad u = 1,73 I R \cos \varphi; \quad R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,018 \cdot 600}{50} = 0,216 \Omega.$$

$$u = 1,73 \cdot 24,3 \cdot 0,216 \cdot 1 = 9,1 \text{ V}, \quad u \% = \frac{9,1}{380} \cdot 100 = 2,4 \%.$$

196. $P = 1,73 UI \cos \varphi$; $I = \frac{P}{1,73 U \cos \varphi} = \frac{11\,000}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,75} = 22,3 \text{ A}.$

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,018 \cdot 750}{35} = 0,386 \Omega. \quad u' = 1,73 I R \cos \varphi = 1,73 \cdot 22,3 \cdot 0,386 \cdot 0,75 = 11,2 \text{ V}.$$

Iz tablice na strani 153. dobijemo za $S = 35 \text{ mm}^2$ i $\cos \varphi = 0,75$ broj 1,57:

$$u = 11,2 \cdot 1,57 = 17,6 \text{ V}, \quad u \% = \frac{17,6}{380} \cdot 100 = 4,6 \%.$$

$$I = \frac{P}{1,73 U \cos \varphi} = \frac{32\,000}{1,73 \cdot 380 \cdot 0,8} = 60,8 \text{ A}.$$

Gubitak napona smije biti najviše: $u = 0,04 U = 0,04 \cdot 380 = 15,2 \text{ V}.$

Uzmimo za prvo približenje, da je $u = u'$: $u' = 1,73 I R \cos \varphi,$

$$R = \frac{u}{1,73 I \cos \varphi} = \frac{15,2}{1,73 \cdot 60,8 \cdot 0,8} = 1,18 \Omega. \quad R = \frac{\rho l}{S}; \quad S = \frac{\rho l}{R} = \frac{0,018 \cdot 370}{0,18} = 37 \text{ mm}^2.$$

Morali bismo dakle uzeti presjek 50 mm^2 . No uzevši u obzir, da je prema tablici na strani 153. gubitak napona u kod 50 mm^2 i $\cos \varphi = 0,8$ čak 1,64 puta veći od u' treba uzeti presjek 70 mm^2 . Kod toga je:

$$R = \frac{\rho l}{S} = \frac{0,018 \cdot 370}{70} = 0,095 \Omega. \quad u' = 1,73 \cdot 60,8 \cdot 0,095 \cdot 0,8 = 8,0 \text{ V}.$$

$$u = 8,0 \cdot 1,84 \text{ (vidi tablicu na strani 153.)} = 14,7 \text{ V}.$$

$$u \% = \frac{14,7}{380} \cdot 100 = 3,9 \%.$$

$$198. \quad P = 1,73 U I \cos \varphi; \quad I = \frac{P}{1,73 U \cos \varphi};$$

$$\text{a) } I = \frac{500\,000}{1,73 \cdot 5000 \cdot 0,75} = 77,0 \text{ A.} \quad \text{b) } I = \frac{500\,000}{1,73 \cdot 10\,000 \cdot 0,75} = 38,5 \text{ A}.$$

Gubitak snage ne smije biti veći od 5%, t. j.

$$p = 0,05 P = 0,05 \cdot 500 = 25 \text{ kW.} \quad p = 3 I^2 R, \quad \text{a odavle } R = \frac{p}{3 I^2}.$$

$$\text{a) } R = \frac{25\,000}{3 \cdot 77,0^2} = 1,4 \Omega. \quad \text{b) } R = \frac{25\,000}{3 \cdot 38,5^2} = 5,6 \Omega.$$

$$R = \frac{\rho l}{S}; \quad S = \frac{\rho l}{R}.$$

$$\text{a) } S = \frac{0,018 \cdot 10\,000}{1,4} = 128,5 \text{ mm}^2, \quad \text{b) } S = \frac{0,018 \cdot 10\,000}{5,6} = 32,1 \text{ mm}^2.$$

Presjek kod 5 kV mora biti $128,5 : 32,1 = 4$ puta deblji nego kod 10 kV. (Općenito vrijedi: kod dvaput višeg napona potrebni presjek je uz inače jednake uvjete $2^2 = 4$ puta manji, kod 3 puta višeg napona $3^2 = 9$ puta manji i t. d.).

$$199. \quad \text{a) Prije kompenzacije: } I = \frac{P}{1,73 U \cos \varphi} = \frac{330\,000}{1,73 \cdot 10\,000 \cdot 0,75} = 25,4 \text{ A}.$$

$$\text{b) Nakon kompenzacije: } I = \frac{330\,000}{1,73 \cdot 10\,000} = 19,1 \text{ A}.$$

Gubici a) Prije kompenzacije:

$$p = 3 I^2 R = 3 \cdot 25,4^2 \cdot 12,3 = 23\,800 \text{ W} = 23,8 \text{ kW};$$

$$p \% = \frac{23,8}{330} \cdot 100 = 7,2 \%.$$

b) Nakon kompenzacije:

$$p = 3 I^2 R = 3 \cdot 19,1^2 \cdot 12,3 = 13\,500 \text{ W} = 13,5 \text{ kW};$$

$$p \% = \frac{13,5}{330} \cdot 100 = 4,1 \%.$$

Gubici u kWh:

$$\text{a) Prije kompenzacije: } 23,8 \cdot 4000 = 95\,200 \text{ kWh.}$$

$$\text{b) Nakon kompenzacije: } 13,5 \cdot 4000 = 54\,000 \text{ kWh.}$$

$$\text{Razlika} = 41\,200 \text{ kWh.}$$

Uštednja: $41\,200 \cdot 7,0 = 288\,400$ dinara godišnje.

$$200. \quad \Phi = ES = 40 \cdot 30 = 1200 \text{ lm.}$$

$$201. \quad \Phi = ES; \quad \text{odavle } E = \frac{\Phi}{S}; \quad S = 5 \cdot 5 = 25 \text{ m}^2, \quad E = \frac{1500}{25} = 60 \text{ lx.}$$

$$202. \quad E = \frac{I}{a^2} = \frac{4500}{20^2} = 11,25 \text{ lx.}$$

203. $S = 5 \cdot 4,60 = 23,0 \text{ m}^2$; $\Phi_k = ES = 30 \cdot 23 = 690 \text{ lm}$. Iz tablice na strani 207. za pretežno direktnu rasvjetu, polusvijetli strop i tamne zidove dobijemo $\eta = 30\%$, pa je:

$$\Phi = \frac{\Phi_k}{\eta} = \frac{690}{0,30} = 2300 \text{ lm.}$$

Prema tablici na strani 190. treba uzeti žarulju od 200 W, koja daje svjetlosni tok 2730 lm.

204. Sada bi bila korisnost $\eta = 40\%$. Rasvjeta bi se pojačala u omjeru korisnosti $40 : 30 = 1,33$, t. j. za $33,3\%$.

205. Sada bi bila korisnost $\eta = 55\%$, pa bi bilo:

$$\Phi = \frac{\Phi_k}{\eta} = \frac{690}{0,55} = 1250 \text{ lm.}$$

Mogli bismo uzeti žarulju od 100 W i zadovoljiti se s nešto slabijom rasvjetom.

206. $S = 10 \cdot 6,3 = 63 \text{ m}^2$; $\Phi_k = ES = 80 \cdot 63 = 5040 \text{ lm}$; $\eta = 35\%$;

$$\Phi = \frac{\Phi_k}{\eta} = \frac{5040}{0,35} = 14\,400 \text{ lm.}$$

Žarulje se nalaze oko 0,7 m ispod stropa. Prema tome je udaljenost žarulja od osvijetljene plohe $4 - 1 - 0,7 = 2,3 \text{ m}$. Razmak između svjetiljaka trebalo bi da bude oko $1,5 \cdot 2,3 = 3,5 \text{ m}$. Treba uzeti dva reda svjetiljaka po tri svjetiljke u svakom redu, ukupno dakle 6 svjetiljaka:

$$\Phi_1 = \frac{14\,400}{6} = 2400 \text{ lm.}$$

Prema tablici na strani 190. treba uzeti žarulje od po 200 W.

207. $S = 24 \cdot 10 = 240 \text{ m}^2$; $\Phi_k = ES = 20 \cdot 240 = 4800 \text{ lm}$; $\eta = 50\%$;

$$\Phi = \frac{\Phi_k}{\eta} = \frac{4800}{0,5} = 9600 \text{ lm.}$$

Svjetiljke zavjesimo neposredno (50 cm) ispod stropa. Visina svjetiljaka iznad osvijetljene plohe iznosi $6 - 1 - 0,5 = 4,5 \text{ m}$. Razmak svjetiljaka $l \approx h \approx 4,5 \text{ m}$. Uzet ćemo dakle dva reda svjetiljaka sa po 5 svjetiljaka u svakom redu, to jest ukupno 10 svjetiljaka.

$$\Phi_1 = \frac{9600}{10} = 960 \text{ lm.}$$

Prema tablici na strani 190. treba dakle uzeti žarulje po 100 W.

208. $S = 16 \cdot 8 = 128 \text{ m}^2$; $\Phi_k = ES = 90 \cdot 128 = 11\,500 \text{ lm}$; $\eta = 35\%$;

$$\Phi = \frac{\Phi_k}{\eta} = \frac{11\,500}{0,35} = 32\,800 \text{ lm.}$$

Svjetiljke zavjesimo 80 cm ispod stropa. Visina svjetiljaka iznad osvijetljene plohe iznosi $l = 4 - 1 - 0,80 = 2,20 \text{ m}$. Razmak između svjetiljaka $l = 1,5 \text{ h}$ do $2 \text{ h} = 3,30$ do $4,40 \text{ m}$. Treba prema tome uzeti 2 reda po 4 svjetiljke, ukupno 8 svjetiljaka.

$$\Phi_1 = \frac{32\,800}{8} = 4100 \text{ lm.}$$

Prema tablici na strani 190. treba uzeti žarulje po 300 W.

PREGLED OZNAKA U FORMULAMA

A — rad	P_2 — predana snaga
a — razmak, udaljenost	p — gubitak snage
B — magnetska indukcija	Q — količina topline
B_0 — magnetska indukcija u zraku	R — otpor
C — kapacitet	R_h — »hladni« otpor
c — specifična toplina	R_t — »topli« otpor
d — promjer	r — otpor jedne od paralelnih grana
E — 1. elektromotorna sila	S — presjek, površina
2. osvijetljenost	t — 1. razlika temperature, 2. vrijeme
F — sila	U — napon (linijski napon)
f — frekvencija	U_f — fazni napon
G — 1. provod, 2. težina	u — pad ili gubitak napona
g — vodljivost paralelnih grana	v — brzina
H — jakost magnetskog polja	W — energija
h — visina	Z — prividni otpor
I — struja	X — jalovi otpor
i — struja u paralelnim granama	X_C — kapacitivni jalovi otpor
L — induktivitet	X_L — induktivni jalovi otpor
l — duljina, put	α — temperaturni koeficijent
N — broj zavoja	γ — vodljivost
n — brzina vrtnje, broj okretaja	η — korisnost (stupanj djelovanja)
u minuti	μ — magnetska propustljivost
P — snaga	ρ — specifični otpor
P_z — prividna snaga	Φ — 1. magnetski tok, 2. svjetlosni tok
P_x — jalova snaga	Φ_k — korištan svjetlosni tok
P_1 — primljena snaga	φ — fazni pomak

Opaska: Oznake u formulama (»simboli«) štampane su kurzivnim (kosim) slovima. Izuzetak su od toga neka grčka slova, kod kojih to iz tehničkih razloga (zbog pomanjkanja slova u štampariji) nije bilo moguće provesti.

PREGLED OZNAKA JEDINICA

(Brojevi označuju strane, gdje je rastumačeno značenje dotične jedinice)

A — amper 14	l — litra
A/cm — amperi po centimetru 100	lm — lumen 186
A/m — amperi po metru 100	lx — luks 198
A/mm² — amperi po kvadratnom milimetru 16	M — meksvel 104
Ah — ampersat 73	MVA — megavoltamper 139
As — ampersekunda 15	MW — megavat 85
at — atmosfera	MWh — megavatsat 85
C — kulon 16	MΩ — megom 24
°C — stupanj Celzija 14	m — metar 14
c — kandela 186	mA — miliamper 15
cal — kalorija 82	min — minuta
cm — centimetar 15	mkg — metarkilogram 77
dl — decilitra	mkp — metarkilopond 77
dln — dekalumen 187	mm — milimetar 15
dm — decimetar 15	mT — militesla 105
F — farad 59	mV — milivolt 22
G — gaus 105	mWb — miliveber 104
g — gram	N — njuton 76
H — henri 117	Nm — njuton-metar 78
HS — Hefnerova svijeća 186	Nm/s — njuton-metar na sekundu 78
Hz — herc 126	okr/min — okretaji u minuti 126
h — sat 15	nF — nanofarad 59
IS — internacionalna, svijeća 186	per/S — perioda na sekundu 126
J — džul 78	pF — pikofarad 59
J/s — džul na sekundu 78	S — simens 25
KS — konjska snaga 79	s — sekunda
KSh — konjska snaga sat 79	sb — stilb 188
kA — kiloamper 15	T — tesla 105
kcal — kilokalorija 82	t — tona
kg — kilogram 76	tm — tonametar 79
kgm — kilogrammetar 77	V — volt 21
kgm/s — kilogrammetar na sekundu 78	VA — voltamper 139
kp — kilopond 76	Var — var 145
kpm — kilopondmetar 77	W — vat 78, 85
kpm/s — kilopondmetar na sekundu 78	Wb — veber 104
kV — kilovolt 22	Wb/m² — veber po kvadratnom metru 105
kV/mm — kilovolti po milimetru 63	Wh — vatsat 79, 85
kVA — kilovoltamper 139	Ws — vatsekunda 78, 79, 85
kVar — kilovar 145	μA — mikroamper 15
kW — kilovat 78, 85	μF — mikrofarad 59
kWh — kilovatsat 79, 85	μV — mikrovolt 22
kWs — kilovatsekunda 79	μWb — mikroveber 104
	Ω — om 24

O p a s k a: Oznaka jedinica treba se strogo pridržavati, jer su one međunarodno standardizirane. Oznake jedinica pišu se uspravno. Izuzetak u ovoj knjizi je oznaka Ω , koja je često (zbog pomanjkanja slova) napisana koso. Nazivi jedinica pišu se malim slovom fonetski, t. j. onako, kako se izgovaraju (dakle na pr. vat, a ne watt ili Watt).

KAZALO

(Brojevi označuju strane)

- Akumulatori alkalijski 73
- olovni 70
- akumulatorska baterija 30, 73
- Al 34
- aluminij, dobivanje 68
- amper 14
- amperi po metru 100
- ampermetri 17
- , povećanje mjernog opsega 47
- , priključak 50
- ampersati 73
- ampersekunda 15
- amperzavoji 101, 110
- anoda 11, 66, 69
- apsorpcija 199
- armatura 211
- asinhroni motori jednofazni 246
- — trofazni 165, 242
- atomi 8, 122
- atomska energija 87
- automatske sklopke 37
- autotransformatori 234
- baterija akumulatorska 30, 73
- džepna 70
- bifilarno namatanje 100
- bliještenje 202
- busola 95
- centimetar kapaciteta 59
- Coulombov zakon 52
- Cu 34
- četkice 126, 213
- članci galvanski 32, 68
- čvorište 41
- čvrstoća dielektrična 62
- dekalumen 187
- depolarizator 70
- Derijevi motori 248
- dielektrična čvrstoća 62
- svojstva 62
- dielektrični gubici 161
- dielektričnost 62
- dielektrik 62
- dijamagnetične tvari 95
- dinamo 223, 239
- dinamo-čelik 108
- dioda 176
- djelatna snaga 139
- djelatni otpor 139
- djelatno opterećenje 140
- djelovanja struje 9
- djelovanje magn. polja na vodiče 119
- struje na čovjeka 182—185
- dozemni vod 46
- džul 78
- efektivna vrijednost 130
- električna energija 84
- električno polje 53, 57, 61
- elektrika 7, 51
- pozitivna i negativna 52, 58
- statička 51
- elektriziranje 51
- elektrokemija 11, 65
- elektroliti 12, 65
- elektrolitska kupka 67
- elektrolitske peći 68
- elektrolitski usmjerivači 253
- elektroliza 12, 65, 67
- elektromagneti 106, 221
- elektromagnetska indukcija 102, 104, 113, 122
- elektrometri 57
- elektromotori 164, 210
- indukcioni jednofazni 246
- — trofazni 165, 242
- istosmjerni 221
- kolektorski jednofazni 247
- — trofazni 249
- , promjene napona 35
- sinhroni 165, 241
- s kaveznom rotorom 243
- s kliznim kolutima 243
- univerzalni 248
- elektromotorna sila 19
- — inducirana 103, 104, 113, 115, 134
- elektroni 8, 16, 20, 122
- elektronke 175, 176, 253
- elektronske cijevi → elektronke
- elektropeći 158
- elektroskop 56
- elektrotoplina 11, 89
- elementarni magneti 122
- elementi galvanski 32, 68
- kemijski 8
- energija 80—87
- atomska (nuklearna) 87
- električna 84
- gibanja 80
- kinetička 80
- mehanička 80
- položaja 80
- potencijalna 80
- toplinska 82
- faktor snage 139
- farad 59
- Faradayevi zakoni 65
- faza 161
- fazni napon 166
- pomak 134
- vodiči 163
- feromagnetične tvari 95
- fluks magnetski → tok
- fluorescencija 191
- fluorescentne sijalice 190
- svjetlosne cijevi 192
- fotocijevi 175, 178

- fotočelije 76
 fotoelektronska emisija 175
 fotoelementi 75
 fotometričke krivulje 203
 fotonke 175, 178
 frekvencija 124, 126, 237
 galvanoplastika 67
 galvanostegija 66
 galvanski elementi 32, 68
 gaus 105
 gazotroni 253
 generatori 210
 — istosmjerne struje 212
 — izmjenične struje 126
 — sinhroni 235
 — trofazni 161, 235
 Graetzov spoj 252
 grafičko računanje kod izmjenične struje 141
 grananje struje 41
 gubici praznog hoda 227, 231
 — u bakru 227, 231
 — u željezu 159, 227, 231
 gubitak napona 32
 — — kod istosmjerne struje 91
 — — — izmjenične struje 151
 — — — trofaznog sistema 172
 gubitak snage kod istosmjerne struje 90
 — — — izmjenične struje 154
 — — — trofaznog sistema 172
 gustoća struje 16, 160
 Hefnerova svijeća 186
 henri 117
 herc 126
 hidrogenatori 238
 histereza 159
 — dielektrična 161
 IEC 228
 ignitroni 257
 indukcija elektromagnetska 102, 104, 113, 122
 — magnetska 102, 105
 — međusobna 118
 inducirana elektromotorna sila 103, 104, 113, 115, 134
 indukcione peći 158
 indukcionni motori jednofazni 246
 — — trofazni 165, 242
 indukt 211
 induktivitet 117
 — u krugu izmjenične struje 131
 induktivni otpor 140
 — — nadzemnih vodova 152
 — strujni krugovi 134
 influencija 55
 internacionalna svijeća 186
 ioni 179
 ionizacija 179
 iskorišćenje svjetlosno 187
 ispravljači → usmjerivači
 istiskivanje struje 160
 istosmjerna struja 13
 istosmjerni generatori 212
 — motori 221
 izbijanje u plinu i pari 179
 — u zraku 180
 izmjenična struja 13, 123
 izmjenjivači 257
 izolatori 9, 62
 izolirani vodiči, opteretivost 38
 izvori struje 10, 19
 — svjetlosti 188
 jaka struja 14
 jakost električnog polja 61
 — magnetskog polja 95, 98, 100, 105
 — rasvjete → osvijetljenost
 — svjetlosti 186
 jalova snaga 145
 jalovi otpor 145
 javna rasvjeta 204
 jedinice 14
 jednoarmaturni pretvarač 250
 jednofazni sistem 167
 — motori indukcionni 246
 — — repulzionni 248
 — — serijski 247
 Jouleov zakon 89
 kalorija 82
 kandela 186
 kapacitet 58
 — akumulatora 73
 — u krugu izmjenične struje 136
 kapacitivni otpor 140
 — strujni krugovi 137
 katoda 11, 66, 69
 kavezni motori 243
 kemijski elementi 8
 kemijsko djelovanje struje 11, 65
 kenotron 176
 kiloamper 15
 kilogram 76
 kilogrammetar 77
 kilokalorija 82
 kilopond 76
 kilopondmetar 77
 kilovar 145
 kilovat 78, 85
 kilovatsat 79, 85
 kilovolt 22
 kilovoltamper 139
 kinetička energija 80
 Kirchhoffov zakon za napone 44
 — — — struje 41
 klizni koluti 126
 kolektor 212
 količina elektrike 15
 — svjetlosti 187
 — topline 82
 kolutni motori 243
 kompas 95
 kompaundni strojevi 226
 kompenzacija 146
 kompenzacioni namot 219
 kompenzatori sinhroni 241
 komutacija 218

- komutator 212
- kondenzatori 60, 63
- , uklapanje i isklapanje 135
- kontakti usmjerivači 257
- konjska snaga 79
- korisnost 87
- električnih strojeva 227
- rasvjete 206
- korona 181
- kosinus fi 139
- kotva 211
- kratki spoj 31, 34
- krivulje magnetiziranja 106
- razdiobe svjetlosti 203
- kulon 16
- lampe → sijalice
- Léclanchéov element 70
- Lenzov zakon 115
- linijski napon 166
- lučnice 188, 197
- luk električni 182
- luks 198
- lumen 186
- luminescencija 186
- luminofoori 190, 192
- magneti 94
- permanentni 123
- magnetičnost 122
- svitka 99
- Zemlje 94
- magnetizam 122
- magnetiziranje 106
- magnetni polovi 94
- magnetomotorna sila 110
- magnetska igla 94, 95
- indukcija 102, 105
- propustljivost 108
- zasićenost 108, 123
- magnetske linije 102
- magnetski krug 110
- otpor 110
- tok 102, 104
- magnetsko djelovanje struje 12
- polje 93, 96, 98
- — , jakost 95, 98, 100, 105
- maksimalna vrijednost 130
- maksvel → meksvel
- masa 77
- međufazni napon 166
- međusobna indukcija 118
- megavat 85
- megavatsat 85
- megavoltamper 139
- megom 24
- mehanička energija 80
- zaštita elektr. strojeva 230
- mehanički rad 78
- meksvel 104
- metarkilogram 77
- metarkilopond 77
- miješano svijetlo 195
- mikroamper 15
- mikrofarad 59
- mikroveber 104
- mikrovolt 22
- miliamper 15
- militesla 105
- miliveber 104
- milivolt 22
- mjerjenje napona 21, 49, 131
- snage 91
- struje 17, 47, 131
- mjerni transformatori 240
- molekule 7
- moment potezni 229
- zakretni 228
- monofazni → jednofazni
- motori električni → elektromotori
- munja 182
- naboj električni 51
- najmanji dozvoljeni presjeci 37
- najveće dozvoljeno opterećenje
- vodova 38
- — — kabela 39
- namatanje strojeva 128, 214, 236
- nanofarad 59
- napon 20
- fazni 166
- kratkog spoja 231
- linijski 166
- paljenja 179
- prema zemlji 22, 167
- natrijeve sijalice 195
- nazivna snaga 211
- nazivni 228
- negativna električnost 52, 58
- neonske cijevi 192
- neutralni vodič 163
- nominalni → nazivni
- nova svijeća 186
- nultočka 168
- nulvodič kod trofaznog sistema 163, 167
- — trovodičnog sistema 47
- njihalo 81
- njuton 76
- odbijanje svjetlosti 199
- ogrjevnost 86
- Ohmov zakon 29
- — za izmjeničnu struju 140
- om 24
- omski otpor 139
- omsko opterećenje 140
- opća rasvjeta 201
- opterećenje djelatno 140
- induktivno 146
- najveće dozvoljeno 37
- opteretivost 38
- osigurači 37, 38
- osvijetljenost 198
- potrebna 201
- proračun 206
- osvijetljenje → rasvjeta
- otpor 23
- djelatni 139
- induktivni 140

otpor ind. nadzem. vodova 152
 — jalovi 145
 — kapacitivni 140
 — magnetski 110
 — omski 139
 — , ovisnost o temperaturi 27
 — prividni 132, 142
 — reaktivni 146
 — specifični 24
 — unutarnji 33
 pad napona kod istosmjerne struje
 32, 38, 91
 — — — izmjenične struje 151
 — — procentualni 35
 paralelni otpornik 48
 — rad sinhronih generatora 239
 — — transformatora 233
 — spoj 40, 41
 paramagnetične tvari 95
 peći indukcione 158
 pentoda 178
 perioda 126
 permanentni magneti 123
 permeabilnost 108
 pikofarad 59
 poboljšanje faktora snage 146
 počela 8
 pojačalo 178
 pokretač 243
 pokretanje asinhronih motora 245
 — istosmjernih motora 221
 — sinhronih motora 242
 polarizacija 69
 polovi električni 19
 — magnetni 94
 — pomoćni 219
 polje električno 53, 57, 61
 — — , jakost 61
 — magnetsko 93, 96, 98
 — — , jakost 95, 98, 100
 — rotaciono 164
 pomoćni polovi 219
 poredni istosmjerni strojevi 224
 — motori trofazni 249
 potencijal 22
 potencijalna energija 80
 potezni moment 229
 pozitivna elektrika 52, 58
 pravilo desne ruke za smjer induc.
 elektromotorne sile 115
 — — — — magn. polja 99
 — lijeve ruke 120
 preklopka zvijezda-trokut 245
 premagnetiziranje 159
 prenaponi 150
 presjeci vodiča 36
 — — standardizirani 38
 pretvarači 210, 250
 prijenosni omjer 156
 priključak trošila 167
 prividna snaga 139
 prividni otpor 132, 142
 probojna čvrstoća izolatora 62

promjene napona 34
 promjenjivači 257
 — frekvencije 257
 propustljivost magnetska 108
 propuštanje svjetlosti 199
 proračun vodova istosmjerne
 struje 36
 — — izmjenične struje 151
 — — trofaznog sistema 172
 — rasvjete 206, 208
 protuelektromotorna sila 211
 provod 25
 prva pomoć 185
 pulziranje struje 215
 rad električni 89
 rafinacija metala 67
 rasvjeta 185
 — prostorija 206, 208
 ravnoteža sila 76
 razlika potencijala 22
 reakcija armature 217
 reaktancija 146
 reaktivna snaga 146
 reaktivni → jalovi
 refleksija 199
 regulacija brzine vrtnje asinhronih
 motora 246
 — — — istosmjernih motora 221
 regulacija napona istosmjernih
 generatora 221
 — — sinhronih generatora 239
 regulacioni transformatori 234
 remanentni magnetizam 227
 repulzioni motori 248
 resonancija 150
 rešetka 178, 257
 rotaciono polje 164
 rotor 126, 213
 sabirnice 240
 salmijakov element 70
 samoindukcija 116
 samouzbudni strojevi 227
 segnetoelektrične tvari 62
 selenovi usmjerivači 252
 serijski istosmjerni strojevi 225
 — motori jednofazni 247
 — — trofazni 249
 — otpornik 49
 — spoj 40, 41, 64, 141
 sijalice 47, 189
 — fluorescentne 190
 — natrijeve 195
 — za miješano svjetlo 195
 — živine 193
 sila 76
 silnice električne 54
 — magnetske 96
 simens 25
 simetrično opterećenje 163
 sinhroni generatori 235
 — kompenzatori 241
 — motori 165, 241

- sinhronizam 240
 sinhroniziranje 239
 sinusoida 125
 sjaj 187
 skin-efekt 160
 slaba struja 14
 smjer inducirane elektromotorne
 sile 115
 — strujanja energije 130
 — struje 58
 snaga djelatna 139
 — jalova 145
 — kod istosmjerne struje 88
 — — izmjenične struje 137
 — — trofazne struje 171
 — mehanička 78
 — nazivna 211
 — prividna 139
 — reaktivna 146
 specifična toplina 82
 — vodljivost → vodljivost
 specifični otpor 24, 26
 spojevi transformatora 232
 — kod trofaznog sistema 168
 spoj u trokut 232
 — — zvijezdu 232
 starter 191
 statička električna 51
 stator 126, 213
 stepen djelovanja → korisnost
 stilb 188
 stroboskopski efekt 191
 strojevi električni 210
 struja 8
 — istosmjerna 13
 — izmjenična 13, 123
 — jalova 145
 strujni krug 19
 — — induktivni 134, 138
 — — kapacitivni 137, 138
 stupanj djelovanja → korisnost
 suhi elementi 70
 — usmjerivači 251
 svijeća Hefnerova 186
 — internacionalna 186
 — nova 186
 svitak sa čelikom 106
 svjetiljke 202
 — , visina zavješanja 206, 208
 svjetlosne cijevi 179, 192
 svjetlosni tok 186
 svjetlosno djelovanje struje 13
 — iskorišćenje 187
 štedni transformatori → auto-
 transformatori
 šent 48
 temperatura 82
 temperaturni koeficijent 27
 temperaturno isijavanje 186
 termoelektronska emisija 175
 termoelementi 74
 tesla 105
 tetroda 178
 težina 76
 tiratron 253
 tinjalice 196
 tinjavo izbijanje 181
 tok magnetski 102, 104
 — svjetlosni 186
 tonametar 79
 toplina 82
 toplinska energija 82
 toplinsko djelovanje struje 10, 89
 tovar električni → naboj
 trajni magneti 123
 trakasto izbijanje 181
 transformatori 155, 230
 — regulacioni 234
 — štedni → autotransformatori
 trioda 178
 trofazni sistem 161
 trovodični sistem 46
 turboagregat 238
 turbogeneratori 237
 turboslog 238
 ugrijavanje strojeva 227
 univerzalni motori 248
 unutarjni otpor 33
 upijanje svjetlosti 199
 usmjerivači 251
 usmjerivačice 177
 usmjerivanje struje 177, 251
 uzbuda 221, 223
 uzbudni generator 223, 239
 uzemljenje 46
 uzemljivač 46
 var 145
 vat 78, 85
 vatmetri 91
 vatno opterećenje 140
 vatsat 79, 85
 vatsekunda 78, 79, 85
 VDE 228
 veber 104
 visoki napon 92, 168
 visokofrekventne peći 158
 višepolni strojevi 128, 216, 236
 vodiči 9, 25, 27
 vodljiva vrijednost → provod
 vodljivost 25
 volt 21
 voltamper 139
 Voltin element 21, 69
 voltmetri 49
 — elektrostatski 56
 vrtložne struje 157
 zagoni strojevi 210
 zakon o održanju energije 83
 zakretni moment 228
 zasićenost magnetska 108, 123
 zaštita mehanička el. strojeva 230
 zvjezdaste 168
 žarulje 47, 189
 — , promjene napona 34
 živine sijalice 193
 živini usmjerivači 254

S A D R Ź A J

	Strana
1. Električna struja i njezina djelovanja	7
1.1. Što je to — elektrika?	7
1.2. Vodiči i izolatori	9
1.3. Djelovanja struje	9
1.4. Toplinsko djelovanje struje	10
1.5. Kemijsko djelovanje struje	11
1.6. Magnetsko djelovanje struje	12
1.7. Svjetlosno djelovanje struje	13
1.8. Istosmjerna i izmjenična struja	13
1.9. Jaka i slaba struja	14
1.10. Jedinice za mjerenje struje	14
1.11. Količina elektrike	15
1.12. Gustoća struje	16
1.13. Mjerenje struje	17
2. Strujni krug, napon, otpor	18
2.1. Električni strujni krug, elektromotorna sila	18
2.2. Električni napon	20
2.3. Jedinice za mjerenje napona	21
2.4. Električni potencijal	22
2.5. Otpor	23
2.6. Specifični otpor	24
2.7. Provod i vodljivost	25
2.8. Izračunavanje otpora	26
2.9. Ovisnost otpora o temperaturi	27
3. Zakoni za izračunavanje struje i napona	29
3.1. Ohmov zakon	29
3.2. Pad ili gubitak napona	32
3.3. Određivanje presjeka vodiča	36
3.4. Serijsko i paralelno spajanje	40
3.5. Serijski spoj otpora	41
3.6. Kirchhoffov zakon za struje (grananje struje, paralelni spoj otpora)	41
3.7. Kirchhoffov zakon za napone	44
3.8. Uzemljenje	46
3.9. Trovodični sistem razdiobe	46
3.10. Povećavanje mjernog opsega ampermetara	47
3.11. Mjerenje napona	49
4. Statička elektrika	51
4.1. Električni naboji	51
4.2. Pozitivni i negativni električni naboji	52
4.3. Električno polje	53
4.4. Influcija	55
4.5. Elektroskop i elektrostatski voltmetar	56
4.6. Električno polje u vodičima	57
4.7. Pozitivna i negativna elektrika i smjer struje	58
4.8. Kapacitet	58
4.9. Kondenzatori	60
4.10. Jakost električnog polja	61

	Strana
4.11. Dielektrična svojstva	62
4.12. Spajanje i upotreba kondenzatora	63
5. Primjene kemijskog djelovanja struje	65
5.1. Elektroliza	65
5.2. Faradayevi zakoni	65
5.3. Galvanotehnika	66
5.4. Dobivanje i čišćenje metala u elektrolitskim kupkama	67
5.5. Dobivanje metala u elektrolitskim pećima	68
5.6. Galvanski elementi (članci)	68
5.7. Olovni akumulatori	70
5.8. Alkalijski akumulatori	73
6. Električna struja iz topline i svjetlosti	74
6.1. Termoelementi	74
6.2. Fotoelementi	75
7. Električna energija i druge vrste energije	76
7.1. Sila	76
7.2. Rad	77
7.3. Snaga	78
7.4. Različite jedinice snage i rada	78
7.5. Mehanička energija	80
7.6. Toplinska energija	82
7.7. Zakon o održanju energije	83
7.8. Električna energija	84
7.9. Neke druge vrste energije	86
7.10. Korisnost (stupanj djelovanja)	87
7.11. Električna snaga i rad	88
7.12. Jouleov zakon, stvaranje topline	89
7.13. Gubitak snage	90
7.14. Mjerenje snage	91
7.15. Čemu visoki napon?	92
8. Magnetsko polje i njegovi učinci	93
8.1. Magnetsko polje	93
8.2. Magnetizam	94
8.3. Jakost i smjer magnetskog polja, magnetske silnice	95
8.4. Magnetsko polje pruženog vodiča	96
8.5. Magnetsko polje svitka	98
8.6. Izračunavanje jakosti magnetskog polja svitka	100
8.7. Magnetska indukcija, magnetske linije, magnetski tok	102
8.8. Elektromagnetska indukcija promjenom toka	102
8.9. Jedinice magnetskog toka i magnetske indukcije	104
8.10. Odnos između jakosti magnetskog polja i magnetske indukcije	105
8.11. Utjecaj željeza, krivulje magnetiziranja	106
8.12. Magnetski krug	110
8.13. Elektromagnetska indukcija siječenjem magnetskih linija	113
8.14. Smjer inducirane elektromotorne sile	115
8.15. Samoindukcija	116
8.16. Međusobna indukcija	118
8.17. Djelovanje magnetskog polja na vodič, kojim teče struja	118
8.18. Uzajamno djelovanje dviju struja	120
8.19. Načelo energije kod elektromagnetske indukcije	122
8.20. Zbog čega je željezo magnetski?	122
9. Izmjenična struja	123
9.1. Postanak i prikazivanje izmjenične struje	123
9.2. Perioda, frekvencija	126
9.3. Izvedba generatora izmjenične struje	126
9.4. Mogućnost upotrebe izmjenične struje	128
9.5. Maksimalna i efektivna vrijednost struje i napona	130
9.6. Induktivitet u krugu izmjenične struje	131

	Strana
9.7. Veličina inducirane elektromotorne sile kod priključka svitka na izmjeničnu struju	134
9.8. Uklapanje i isklapanje kondenzatora	135
9.9. Kapacitet u krugu izmjenične struje	136
9.10. Snaga izmjenične struje	137
9.11. Ohmov zakon za izmjeničnu struju	140
9.12. Jalova struja, jalovi otpor, jalova snaga	145
9.13. Kompenzacija — poboljšanje faktora snage	146
9.14. Resonancija	150
9.15. Gubitak napona i proračun presjeka vodiča	151
9.16. Gubitak snage	154
9.17. Transformator	155
9.18. Vrtložne struje	157
9.19. Histereza, gubici zbog premagnetiziranja, gubici u željezu	159
9.20. Istiskivanje struje (skin-efekt)	160
9.21. Dielektrički gubici	161
10. Trofazni sistem	161
10.1. Postanak trofaznog sistema	161
10.2. Rotaciono polje, trofazni elektromotori	164
10.3. Fazni i linijski napon	166
10.4. Priključak trošila, upotreba nulvodiča	167
10.5. Spoj u zvijezdu i spoj u trokut	168
10.6. Snaga trofazne struje	171
10.7. Proračun vodova	172
11. Prolaz struje kroz vakuum, plinove i pare	175
11.1. Prolaz struje kroz vakuum	175
11.2. Elektronke	176
11.3. Fotonke	178
11.4. Izbijanje u plinu i pari	179
11.5. Izbijanje u zraku	180
12. Djelovanje električne struje na čovjeka	182
12.1. Ljudsko tijelo u strujnom krugu	182
12.2. Djelovanje struje raznih jakosti	184
12.3. Prva pomoć	185
13. Električna rasvjeta	185
13.1. Općenito o svjetlosti	185
13.2. Jakost svjetlosti, svjetlosni tok, količina svjetlosti	186
13.3. Svjetlosno iskorišćenje	187
13.4. Sjaj izvora svjetlosti	187
13.5. Razvoj i vrste izvora svjetlosti	188
13.6. Žarulje	189
13.7. Fluorescentne sijalice	190
13.8. Svjetlosne cijevi (neonske cijevi)	192
13.9. Živine sijalice	193
13.10. Natrijeve sijalice	195
13.11. Tinjalice	196
13.12. Lučnice	197
13.13. Osvjetljenost (jakost rasvjete)	198
13.14. Propuštanje, odbijanje i upijanje svjetlosti	199
13.15. Zahtjevi na dobru rasvjetu	200
13.16. Zadatak svjetiljaka, krivulje razdiobe svjetlosti	202
13.17. Javna rasvjeta	204
13.18. Rasvjeta prostorija	205
13.19. Proračun rasvjete prostorija	208
14. Električni strojevi i transformatori	210
14.1. Općenito	210
14.2. Princip istosmjernih generatora (generatora istosmjerne struje)	212
14.3. Izvedba i djelovanje istosmjernih generatora	213

	Strana
14.4. Reakcija armature istosmjernih strojeva	217
14.5. Komutacija istosmjernih strojeva	218
14.6. Inducirana elektromotorna sila i napon istosmjernih generatora	220
14.7. Izvedba i djelovanje istosmjernih motora	221
14.8. Pokretanje istosmjernih motora	221
14.9. Mijenjanje brzine vrtnje istosmjernih motora	222
14.10. Kako elektromotor regulira struju opterećenja?	223
14.11. Vrste istosmjernih strojeva s obzirom na način uzbude	223
14.12. Ugrijavanje, gubici i korisnost električnih strojeva	227
14.13. Zakretni moment motora	228
14.14. Mehanička zaštita električnih strojeva	230
14.15. Transformatori	230
14.16. Paralelni rad transformatora	233
14.17. Regulacioni transformatori i autotransformatori	234
14.18. Trofazni sinhroni generatori	235
14.19. Regulacija napona sinhronih generatora	239
14.20. Paralelni rad sinhronih generatora	239
14.21. Sinhroni motori	241
14.22. Trofazni indukcioni motori	242
14.23. Pokretanje i reguliranje brzine indukcionih motora	245
14.24. Jednofazni indukcioni motori	246
14.25. Jednofazni i trofazni kolektorski motori	247
14.26. Pretvarači	250
15. Usmjerivači i promjenjivači	251
15.1. Općenito o usmjerivačima	251
15.2. Suhi usmjerivači	252
15.3. Tekućinski elektrolitski usmjerivači	253
15.4. Elektronke kao usmjerivači (usmjerivačice)	253
15.5. Živini usmjerivači	254
15.6. Kontaktni usmjerivači	257
15.7. Promjenjivači	257
Rješenja zadataka	258
Pregled oznaka u formulama	278
Pregled oznaka jedinica	279
Kazalo	280

Znak: 164 S
 Izdanje:
 ING. DRAGUTIN KAISER:
 »Elektrotehnika-osnovi«
 IV. izdanje
 Izdavač:
 »TEHNIČKA KNJIGA«
 Zagreb, Jurišićeva 10
 Za izdavača odgovara:
 KUZMAN RAŽNJEVIĆ
 Urednik:
 ING. VLADISLAV ŠARIĆ
 Korigirao:
 Autor
 Tisak:
 GRAFIČKI ZAVOD HRVATSKE
 Tisak dovršen
 prosinac 1955

OGLASNI DIO

KAZALO OGLASNOG DIJELA

	Strana
»Braća Kavurić«, Zagreb	XIV
»Dalekovod«, Zagreb	XX
»Elektrana«, Rijeka	VII
»Električno poduzeće«, Šibenik	VI
»Elektrojug«, Dubrovnik	VI
»Elektrokovina«, Maribor	XVI
»Elektronabava«, Ljubljana	X
»Elektronabavka«, Sarajevo	XI
»Elektroopskrba«, Zagreb	V
»Elektroprojekt«, Sarajevo	VIII
»Elektroprojekt«, Zagreb	IX
»Elektrotehničar«, Zagreb	XX
»Elma« Črnuče pri Ljubljani	XVI
»Fabrika elektroporcelana«, Novi Sad	XII
»Industrija elektroporcelana«, Aranđelovac	XV
»Institut za elektroprivredu«, Zagreb	VII
»Iskra«, Kranj	XIII
»Kontakt«, Zagreb	XVII
»Nikola Tesla«, Zagreb	XVIII
»Rade Končar«, Zagreb	XXIV i XXV
»Radiocentar«, Zagreb	XVIII
»Antikvarijat« — Tehničke knjige — Zagreb	XXI
»Tehnoservis«, Beograd	X
»Tvornica električnih žarulja«, Zagreb	XIX

ELEKTROOPSKRBA

PODUZEĆE ZA NABAVKE ELEKTROPRIVREDE NR HRVATSKE

Adresa: Zagreb, Gundulićeva 32, adresa za listove: Zagreb 2, pošt. pretinac 289

Telefoni 34-641 do 34-647 — Telegrami: Elektroopskrba Zagreb

Teleprinter: 02-131 Elopskrba Zagreb

d o b a v l j a

elektroprivrednim, industrijskim, rudarskim, građevnim i drugim poduzećima opremu za električna i energetska postrojenja te sav materijal **iz domaće proizvodnje i uvoza**, i to

- za elektrane i energetska postrojenja
- za transformatorske stanice, razvodna postrojenja i električne vodove
- za električne instalacije za snagu i svijetlo
- za specijalne industrijske električne uređaje
- za dojavne (telekomunikacione) uređaje
- za kinematografe, uređaje za električno svarivanje, stanice za punjenje akumulatora, ispitne laboratorije, kontrolne stanice i dr.

PROIZVODI DOMAĆIH TVORNICA DOBAVLJAJU SE UZ TVORNIČKE CIJENE.

NAJPOVOLJNIJI UVOZ INOZEMNOG MATERIJALA ZBOG RAZGRANATIH MEĐUNARODNIH VEZA I ISKUSNIH REFERENATA.

SKLADIŠTE MATERIJALA DOMAĆE PROIZVODNJE I UVOZA.

NARUDŽBE SE OBRADUJU STRUČNO U TEHNIČKOM I KOMERCIJALNOM POGLEDU.

BRZA I TOČNA ISPORUKA U SVE NAŠE REPUBLIKE.

ELEKTRIČNO PODUZEĆE ŠIBENIK

TELEFONI: 211, 212, 213

PROIZVODI I PRENOSI ELEKTRIČNU ENERGIJU,
TE VRŠI DISTRIBUCIJU ZA ŠIROKU POTROŠNJU
INDUSTRIJU NA PODRUČJU OKRUGA ŠIBENIK
I DRNIŠ.

VRŠI LOKALNU MONTAŽU TRAFOSTANICA I DA-
LEKOVODA DO 10 kV.

POGONI: HE „JARUGA“, POGON DISTRIBUCIJE
I TERENSKA GRUPA DRNIŠ.

ELEKTROPRIVREDNO PODUZEĆE

„Elektrojug“

DUBROVNIK

*SNABDIJEVA POTROŠAČE GRADA I KOTARA DUBROVNIK
ELEKTRIČNOM ENERGIJOM I VRŠI ELEKTRIFIKACIJU*

„Elektrana“

PODUZEĆE ZA PROIZVODNJU, TRANSPORT, KUPNJU I PRODAJU
ELEKTRIČNE ENERGIJE

RIJEKA

VODOVODNA UL. 26

Uprava Rijeka, telefon 30-16

Sekretarijat, telefon 27-35

POGONI: TE RIJEKA	telefon 30-08
TE VLAŠKA	„ 226
TS MATULJI	„ 232
AUTOPARK	„ 40-71
DE OPATIJA	„ 335

Institut za elektroprivredu

Zagreb

Adresa: Selska cesta br. 83

Telefon: 25-441, 25-442, 25-443, 37-732 (direktor)

Poštanski pretinac: 451 — Tekući račun: 414-T-338

ELEKTROENERGETSKI ODJEL:

Preuzima narudžbe iz područja elektroprivrede i toplinskog gospodarstva.

Izrađuje:	elektroenergetske bilance za svako opskrbno područje ili tvornicu.
Rješava:	sve električne probleme kod opskrbe električnom energijom.
Vrši:	preuzimanja i ispitivanja visokonaponskih uređaja, i električnih mreža, releja i električne zaštite, kao i visoko frekventnih telekomunikacionih uređaja za elektroprivredu i industriju.

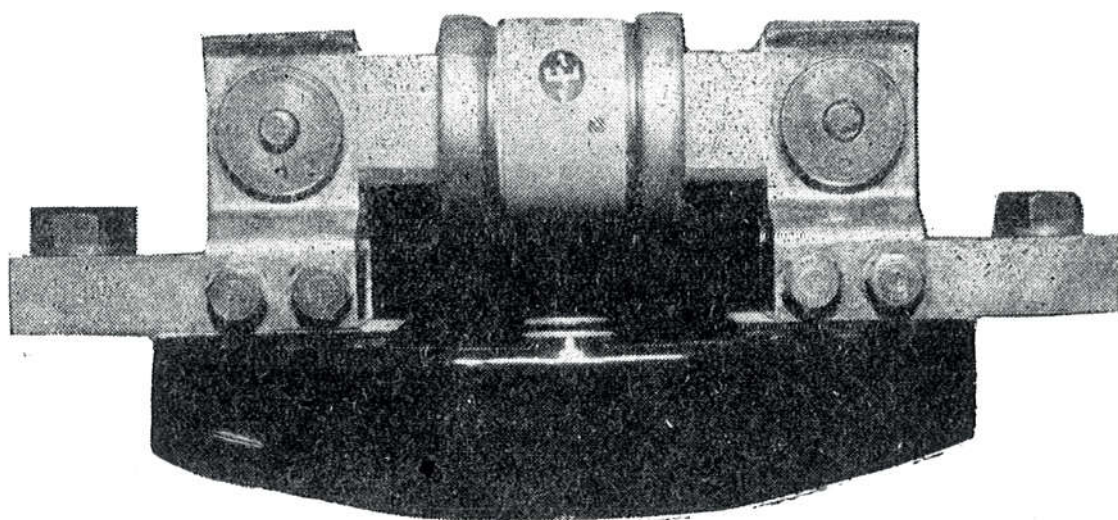
TOPLINSKI ODJEL: sa toplinskim laboratorijem:

Baždari i ispituje:	sve vrste termometara i pirometara.
Vrši:	toplinska ispitivanja izolacionih materijala i daje prijedloge za toplinske izolacije.
Obavlja:	toplinska mjerenja i ispitivanja u pogonu, te izrađuje toplinske bilance za elektroprivredu i industriju.

Niskonaponske osigurače

velike snage prekidanja za istosmjernu struju 220V i izmjeničnu struju 250-500V, sa ulošcima 20-500A; učina do 100.000A; sa kontaktima za signalizaciju pregaranja osigurača, kompletne sa postoljima i ulošcima.

proizvodi i isporučuje uz fiksne cijene i rokove isporuke



»Elektroprojekt« – Sarajevo

Šaloma Albaharija 6

»Elektroprojekt«

PODUZEĆE ZA PROJEKTIRANJE ELEKTRO-
ENERGETSKIH POSTROJENJA

Z A G R E B
Gundulićeva 32

Telefon: 34-641 do 34-647 — Pošt. pretinac 233

Izrađuje idejne i glavne projekte

za novogradnje, proširenja i rekonstrukcije
hidroelektrana, termoelektrana transformator-
skih i rasklopnih stanica, industrijskih i dru-
gih energetskih postrojenja te svih pripadnih
uređaja i objekata

Vrši sve istražne radove i sve radove koji prethode projektiranju

navedenih objekata, vrši laboratorijska ispi-
tivanja, daje tehničke konzultacije i ekspertize
iz svih područja energetike i energetskih po-
strojenja

Vrši nadzor nad gradnjom i montažom

i vrši kvalitativno preuzimanje opreme te ko-
laudacije energetskih postrojenja

Raspolaže s jakim specijaliziranim i iskusnim stručnim kadrom

i ima najbolje reference iz dosadašnjih radova

Vrši radove za sve naše narodne republike i za inozemstvo

„Elektronabava“

PODJETJE ZA UVOZ ELEKTROOPREME IN ELEKTROMATERIJALA

Sedež: **Ljubljana, Resljeva 14a/II**

Telefon: 31-058 in 31-059

Telegram: ELEKTRONABAVA LJUBLJANA

Lastno skladišče v Črnučah, telefon 31-530

**NABAVLJAMO IN DOBAVLJAMO IZ UVOZA
IN DOMAČEGA TRGA:**

*Opremo trafo-postaj in elektrarn,
ves električni material za daljnovode in
omrežja,
instalacijski material,
instrumente, izolatorje, drogove itd.*

PRI INOZEMSKIH NAROČILAH NABAVIMO DEVIZE.

» TEHNOSERVIS «

**inozemna zastupstva
B E O G R A D**

Predstavništva: Zagreb, Sarajevo, Ljubljana, Skopje i Rijeka

*je generalni zastupnik za FNRJ renomiranih inozemnih firmi iz
elektro-grane:*

FELTEN & GUILLEAUME A. G., WIEN - kablovi, dinamo-žica,
užad za dalekovode, sve vrste čelične užadi

FEDERICO PALAZZOLI, BRESCIA - Elektromaterijal

BRAUN & BRAUN, WIEN - Proizvodi sve vrste odporne žice,
Volfram žice, Minivolt katode, električne alate

DANUBIA A. G., WIEN - Plinski, rasvjetni i mjerni aparati

„ELEKTRIM“, **WARSAWA** - Izvozna organizacija NR Poljske
po elektro-grani

„LA TELEMMECCANICA ELETTRICA“, **MILANO** - Proizvodi
automatske elektroaparate za ugrađivanje u zemlju i brodove.

»elektronabavka«

PREDUZEĆE ZA PROMET ELEKTROTEHNIČKIM MATERIJALOM
I OPREMOM
SARAJEVO

Uprava: Sarajevo, Maršala Tita 6, poštanski pretinac 24
Telefon 25-40, 25-50, 38-40
Telegrami: Elektronabavka — Sarajevo
Tekući račun kod Narodne banke 702-T-96

Skladište: Sarajevo, Alipašin Most i Banja Luka, Maršala Tita 111

DOBAVLJA :

elektroprivrednim, industrijskim, rudarskim, građevnim i drugim poduzećima opremu za električna i energetska postrojenja te sav materijal iz domaće proizvodnje i uvoza, i to:

- za elektrane i energetska postrojenja
- za transformatorske stanice, razvodna postrojenja i električne vodove
- za električne instalacije za snagu i svjetlo
- za specijalne industrijske električne uređaje
- za dojavne (telekomunikacione) uređaje
- za kinematografe, uređaje za električno svarivanje, stanice za punjenje akumulatora, ispitne laboratorije, kontrolne stanice i dr.
- sav materijal iz grane 114, 117 i 119

Proizvodi domaćih tvornica dobavljaju se uz tvorničke cijene.

Skladište materijala domaće proizvodnje i iz uvoza.

Narudžbe se obrađuju stručno u tehničkom i komercijalnom pogledu.

Brza i točna isporuka u sve naše republike.



Fabrika elektroporcelana

NOVI SAD

M. Miljanova 15

Telefon: 30-84, 33-61

PROIZVODI:

*sve vrste niskonaponskih izolatora
visokonaponske linijske izolatore
aparatni porcelan u svim tipovima
specijalne izolatore prema nacrtima
ili uzorcima · presovani porcelan
artikle iz livenog porcelana*

ISPORUČUJE:

*ispitane izolatore priznatog kva-
liteta po najpovoljnijim uslovima*

Za sva obaveštenja obratite nam
se preko telefona 30-84

**KOD KUPOVINE OBRATITE PAŽNJU NA NAŠ ZAŠTITNI
ZNAK!**



ISKRA

TOVARNA ELEKTROTEHNIČNIH IN
FINOMEHANIČNIH IZDELKOV

K R A N J

proizvodi i isporučuje:

sve vrste automatskih telefonskih centrala,
telefonske aparate: automatske i induktorske,
električne satove i signalne uređaje,
zvučne kinoaparature za filmove 35 mm i 16 mm,
električne ručne bušilice — EVS 1 Ø 10 mm, EVS 3 Ø 32 mm,
električne mjerne instrumente: električna brojila, precizne laboratorijske instrumente, instrumente za ugradnju,
električni pribor za automobile: auto-dinamo, regulatore napona, pokretače, indukcione svitke, dinamo i reflektore za bicikle,
selenske ispravljače,
instalacioni materijal.



Tražite specijalne prospekte i ponude!



»Braća Kavurić«

PODUZEĆE ZA MONTAŽU I REMONTE ELEKTROENERGETSKIH
I INDUSTRIJSKIH POSTROJENJA

Z A G R E B — Kesterčankova ul. 1
Telefon 41-024, 41-215 i 41-605

MONTIRA:

Elektroenergetska i industrijska postrojenja:
Kotlove visokog pritiska,
Visokonaponska rasklopna postrojenja,
Transformatorske stanice,
Kotlovske, toplinske i rashladne mjerne i regulacione uređaje
u industrijskim poduzećima i elektranama.

IZRAĐUJE U VLASTITOM POGONU:

Transportne uređaje, sve vrste željeznih konstrukcija i svu
doknadnu opremu za montažne radove.

VRŠI REMONT I BAŽDARENJE U SVOME LABORATORIJU:

Kotlovske, toplinske i rashladne mjerne instrumente za potrebe
elektroprivrede i industrije.

OZIDAVALA:

Kotlove, industrijske dimnjake, razne industrijske peći i t. d.

RASPOLAŽE:

Modernom mehanizacijom, specijalnim dizalicama, dizalicama
gusjeničarima, specijalnim vozilima za transport teških dijelova
opreme i t. d.

VRŠI:

Razne transportne usluge vlastitim prevoznim sredstvima.

Industrija

Elektroporcelana

ARANĐELOVAC

Telegram: Porcelan Arandjelovac — Tekući račun 165-T-9 Filijala NB
Telefon 32

GLAVNI PROIZVOĐAČ U ZEMLJI:

- a) Visokonaponskih liniskih izolatora
 - b) Visokonaponskih aparatnih izolatora
 - v) Niskonaponskih izolatora
 - g) Osiguravajućih elemenata sa i bez metalne armature
 - d) Instalacionog porcelana
 - đ) Tehničkog porcelana
-
- Svojim kapacitetima pokriva potrebe zemlje, a dobrim delom istih učestvuje u izvozu.
 - Za artikle svoje proizvodnje daje odgovarajuće ateste zasnovane na međunarodnim propisima.
 - Preporučuje svoje kvalitetne proizvode osobito lančaste izolatore tipa K-3 za vodove od 110 KV
 - U mogućnosti smo da prometno liferujemo liniske potrebne izolatore tipa I i N te zatezne izolatore tipa S
 - Naši osiguravajući elementi montirani sa metalnim delovima na našem i inostranom tržištu uživaju najsolidniji glas, kako u pogledu kvaliteta, tako isto i u pogledu najnižih dnevnih cena.

Za sva obavještenja obratiti se pismeno na fabriku u Aranđelovcu —
— prodajno odeljenje, ili na telefon br. 32 lokal 44.

ELEKTROPORCELAN — ARANĐELOVAC



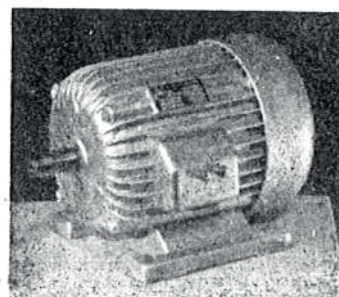
Elektrovina

MARIBOR

TELEFON 30-60

PROIZVODI:

*asinhronne elektromotore za jednofaznu
i trofaznu struju, svetiljke svih vrsta
i elektrospojni materijal.*



novo!

novo!

Tražite u knjižarama priručnik „Električne predspojne sprave i spojne sheme za luorescentne sijalice“
u nakladi Elektrokovine.



TOVARNA ELEKTROMATERIJALA

ČRNUČE pri Ljubljani

Telefon 382-105, 382-138

PROIZVODI: sve vrste prekidača, utikača, utikačkih kutija, tipkala,
sponki, okova za žarulje, sigurnostnih elemenata,
pešeli cevi i pribora te ostale artikle ove struke
električne pegle
izolacioni materijal
transformatore
aparate za zavarivanje

VRŠI:

remont svih vrsti elektromotora i generatora

»kontakt«

ZAGREB

RADNIČKA CESTA BR. 53-55
POŠT. PRETINAC: ZAGREB II BR. 28,
TELEFON: 41-047, 41-688 i 41-726

PROIZVODI:

SVE VRSTI ELEKTROINSTALACIONOG
MATERIJALA U PLASTIČNIM
MASAMA I PORCULANU.

SA USPJEHOM PODMIRUJE POTREBE
DOMAĆIH I INOSTRANIH
POTROŠAČA.

NA ZAHTJEV DOSTAVLJA KATALOGE,
CJENIK I UZORKE.

TVORNICA TELEFONSKIH UREĐAJA

„NIKOLA TESLA“ ZAGREB

PROIZVODI:

automatske i poluautomatske telefonske uređaje i pribor.

VRŠI I IZVODI:

projektiranja telefonskih i signalnih uređaja i instalacija.

montaže svih vrsta telefonsko-telegrafskih i signalnih uređaja,

veće popravke telefonsko-telegrafskih i signalnih uređaja.



KRAPINSKA ULICA br. 55

Telefon: 24-454 — Telegrami: Teslatelefon — Poštanski pretinac: 295

radiocentar

Veletrgovačko poduzeće za promet radioaparata, radio i elektrotehničkim materijalom

ZAGREB, JURIŠIĆEVA 4

Telefon: prodajni odsjek 32-884

PRODAJE NA VELIKO:

RADIOAPARATE

RADIOCIJEVI i ostali radio materijal

RAZGLASNE STANICE, razglasna i ostala pojačala

ZVUČNIKE I MIKROFONE

ELEKTRIČNE PROVODNIKE

INSTALACIONI MATERIJAL

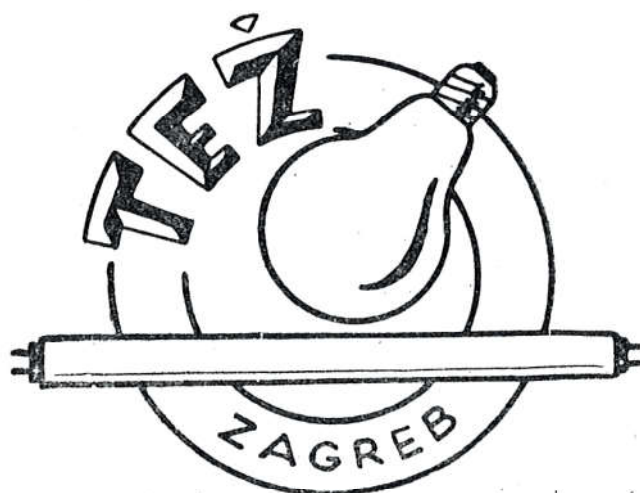
ELEKTROAPARATE ZA DOMAĆINSTVO

KINOPROJEKTORE tonske 16 mm komplet

TELEFONE

FLUORESCENTNE CIJEVI s priborom i armaturama

ŽARULJE, AKUMULATORE, BATERIJE



Tvornica električnih žarulja

ZAGREB, Folnegovićeva 10

Telefon: 41-300

Poštanski pretinac 148

Telegrafska adresa: TEŽ Zagreb

Proizvodni program

Fluorescentne cijevi 40 W u 6 boja: topli ton (2500° K), toplo bijela de Luxe (3000° K), bijela (3500° K), bijela boja de Luxe (4500° K), bijela boja (4500° K), danje svjetlo (6500° K), 5000 sati svijetljenja

Starteri za fluorescentne cijevi

Žarulje za napone 120, 230 i 260 V i to:

normalne vakuumske od 10 do 40 W, prozirne bojadisane 25 W (crvene, plave, zelene žute); normalne plinom punjene od 40 do 1500 W; do 200 W prozirne, matirane i opalne, od 300 W najviše samo prozirne za dnevno svjetlo od 40, 60, 100, 150, 200 W;

Svjećaste žarulje od 15 W (prozirne) i 25 W (prozirne, matirane i opalne); za 120 i 230 V

Vagonske žarulje standardne u boji, sofitne i iluminacione

Resista-žarulje (protiv trešnje) od 25, 40, 60 i 100 W

Fotografske žarulje (rubin i zelene) od 15 W

Iluminacione žarulje od 10, 15, 25 i 40 W

Signalne žarulje cjevaste i konusne od 5, 10, 15 i 25 W

Signalne žarulje za telefonske uređaje (u raznim bojama) 10 W, 65 V

Telefonske žarulje u ebonitu 0,05 A, 24, 48 ili 60 V

Projekcione epidiaskop-žarulje od 100 i 500 W

Tonfilmske, mikroskopske i rudarske žarulje

Tinjalice raznih oblika

Automobilske žarulje obične, bilux i sofitne

Žaruljice za džepne svjetiljke, radio-skale, dinamo-žaruljice

TRAŽITE NAŠ KATALOG!

„dalekovod“

elektro-privredno poduzeće za projektiranje, gradnju i montažu

ZAGREB

Gundulićeva ulica 32

Tekući račun kod Narodne banke, filijale Zagreb 400-T-429

Telefon 34-641 — Poštanski pretinac 208.

„dalekovod“

PROJEKTIRA

dalekovode, transformatorske stanice svih napona, mreže niskog napona za seosku elektrifikaciju u zemlji i u inozemstvu — izrađuje kalkulacije za ove radove.

GRADI

dalekovode, električne mreže, transformatorske stanice, industrijske objekte i nisko-gradnje u zemlji i u inozemstvu sa materijalom i opremom koje nabavlja odnosno izrađuje u svojim radionicama.

MONTIRA

industrijske, elektroprivredne i saobraćajne elektroobjekte.

IZRAĐUJE

u svojim radionicama električno-montažni materijal, čelične i druge konstrukcije za električne vodove i transformatorske stanice.

VODI

sekretarijat Tehničkog odbora br. 11 za unapređenje izgradnje nadzemnih vodova, Međunarodne elektrotehničke komisije I. E. C. (Internacional Electrotechnical Commission).

Elektrotehničar

Časopis za elektro, radio, tv i kino-tehniku

Uredništvo i uprava: Zagreb, Jurišićeva 10

Izdavač: »TEHNIČKA KNJIGA« izdavačko poduzeće

Zagreb, Jurišićeva 10 pošt. pret. 87

Čekovni račun kod Narodne banke u Zagrebu: 404-T-1096

Časopis donosi teoretske i praktičke članke iz područja elektrotehnike, radiotehnike, televizije i kinotehnike, nadalje referate i zanimljivosti sa tih područja.

U časopisu osim gornjeg izlazi i redoviti opširni prilog s podacima za elektronike zajedno s njihovim karakteristikama. Taj prilog časopisa služi kao dopuna ovom priručniku, pogotovo za najčešće upotrebljavane tipove.

Časopis izlazi mjesečno. Cijena pojedinom broju Din 50.—. Godišnja pretplata Din 600.—. Pretplate šaljite na gore naznačeni čekovni račun, a na poledini čeka molimo da naznačite za koju svrhu šaljete novac.

Antikvarijat

„TEHNIČKE KNJIGE“

Izdavačkog poduzeća

ZAGREB, Masarikova 17

Telefon 25-481

KUPUJE:

djela na svim jezicima iz

BELETRISTIKE

TEHNIKE

POLJOPRIVREDE

UMJETNOSTI

I OSTALIH GRANA NAUKE

PRODAJE:

djela na svim jezicima iz

BELETRISTIKE

TEHNIKE

POLJOPRIVREDE

UMJETNOSTI

I OSTALIH GRANA NAUKE

**Stalno je bogato snabdjeven . Interesentima šalje na uvid izbor i popis knjiga
Snabdjeva biblioteke, škole, knjižnice**

Sve ponude za prodaju knjiga kao i kupnju slati na adresu:

Antikvarijat „Tehničke knjige“ Zagreb, Masarikova 17

„TEHNIČKA KNJIGA“
ZAGREB, Jurišićeva 10

priprema u svojoj novoj biblioteci

„TEHNIKA I ŽIVOT“

sljedeća izdanja:



Hermann Oberth: »Ljudi u svemiru«

Pisac u ovom djelu odgovara na mnoga pitanja koja zadiru u astronautiku. Tako na primjer na pitanje: Na koji će se način čovjek osloboditi Zemljine sile teže? Što su satelitske stanice i kako će one funkcionirati? Što je svemirsko ogledalo?

Manfred Langrenus: »Država na Mjesecu«

Roman »Država na Mjesecu« djelo je profesora velikog srednjoevropskog sveučilišta i direktora jedne od najvećih zvjezdarnica u Evropi. Raspolazući temeljitim stručnim znanjem, a služeći se najnovijim otkrićima na polju atomistike, kemije a i tehnike naoružanja, pisac je djelo stavio na strogo naučnu osnovu.

Heinz Gartmann: »Ljudi iza raketa«

Pisac, koji je niz godina proveo u industriji raketa, pa među inim sudjelovao i pri izgradnji velike rakete V 2, iznosi u svom djelu historijat razvitka raketa. On prikazuje radove pionira na tom polju i daje perspektive upotrebe raketa u budućnosti.

Walter Greiling: »Kako ćemo živjeti«

Knjiga nam otkriva budućnost ljudskoga roda u toku sljedećih stotinu godina. Pisana je sa stanovišta tehničara, a glavni problem predstavljaju u njoj izvori sirovina i energije. Autor je uvjeren da se svi problemi sutrašnjice dadu bez poteškoća riješiti.

Werner Büdeler: »Teleskopi, rakete i zvijezde«

Veliko djelo o astronomskim aparatima, o gigantskim američkim opservatorijima, koji su omogućili da bar donekle otkrijemo tajne svemira. Pisac nadalje daje prikaz rakete kao sredstva za prodiranje u svemirski prostor i prikazuje planete, cilj toga prodiranja.

Egon Larsen: »Pustolovine u tehnici«

Ovo djelo predstavlja veoma uspješnu reportažu o velikim izumima devetnaestog stoljeća, stvorenim u vrijeme kad je izumitelj-pojedinac mogao bez pomoći velikih laboratorija i instituta samostalno stvarati.

Egon Larsen: »Izumima nikad kraja«

U ovom drugom djelu pisac prikazuje stvaralački rad izumitelja u dvadesetom stoljeću, u periodu, u kojem su izumi uglavnom plod rada dobro organiziranih radnih ekipa.

Heinz Gartmann: »Krila našeg stoljeća«

Pisac prikazuje zrakoplovstvo u njegovom današnjem stadiju razvitka. Osim opisa aparata i najnovijih dostignuća na području vojne i civilne aeronautike, pisac iznosi veoma zanimljivu organizaciju civilnog zrakoplovstva na cijelom svijetu.

U nakladi

„TEHNIČKE KNJIGE“
ZAGREB, Jurišićeva 10

*izašli su slijedeći školski udžbenici
s kojima raspolažemo:*

Andrejev Ing. Uasilj: »Prikaz novih metoda za rješavanje sistema linearnih jednadžbi«	Din	174.—
Apsen dr. ing. Boris: »Repetitorij elementarne matematike« III. izdanje	„	380.—
Apsen dr. ing. Boris: »Logaritamsko računalo«		
Baldauf ing. Milivoj: »Mehanička tehnologija« II. dio	„	56.—
Benčić ing. Dušan: »Osnovne optičke pojave i njihova primjena«	„	140.—
Blazina prof. J.: »Aritmetika, algebra i geometrija za III. razred škola učenika u privredi	„	64.—
Černe ing. Boris: »Nauka o toplini«	„	260.—
Černe ing. Boris: »Parne turbine«	„	320.—
Jurić ing. Milivoj: »Lanarstvo i kudeljastvo«	„	200.—
Krpan ing. D.—Mađarević ing. B.: »Tehnologija motornih vozila«	„	1.400.—
Horvat ing. Oto: »Mala mehanička tehnologija« III. broš.	„	560.—
uvez	„	700.—
Kaiser ing. Dragutin: »Elektrotehnika — osnovi«	„	620.—
Krajčinović ing. Matija: »Tehnologija masti i masnih ulja« I. i II. dio .	„	150.—
Mirković ing. Antun: »Tehnička mehanika«	„	240.—
Šepelev ing. Nikolaj: »Zakovice«	„	41.—

Za nabavu gornjih izdanja obratite se na

NAKLADNI ODJEL
„Tehničke knjige“

»RADE KONČAR«

TVORNICA ELEKTRIČNIH STROJEVA

ZAGREB

FALLEROVO ŠETALIŠTE 22

Telefon: 34-051 — Telegram: Končar, Zagreb — Teleprinter: 02-104
Pošt. pretinac 304

PROGRAM PROIZVODNJE:

I. ROTACIONI STROJEVI

Asinhroni strojevi

Izrađujemo ih u zaštićenoj i zatvorenoj izvedbi s kaveznom ili kolutnim rotorom, za horizontalno ili vertikalno postavljanje, s nogama, pribornicom ili za ugradnju, za sve uobičajene napone, brzine vrtnje, načine upuštanja i vrste primjena:

Trofazni motori

Normalni mali motori do 30 kW

Srednji motori od 30 do 100 kW

Veliki motori iznad 1000 kW

Ugradni motori

Dvokavezni motori

Motori polno preklopivi

Motori za industriju, zaštićeni od izazivanja eksplozije u izvedbi Se

Motori za rudarstvo, zaštićeni od izazivanja eksplozije u izvedbi Sb

Motori za poljoprivredu

Motori za kranove

Tkalački motori

Razni specijalni motori

Jednofazni asinhroni motori

Sinhroni strojevi

Trofazni kompaundirani samouzbuđni generatori malih snaga od 7 kVA do 100 kVA za napon 400/231 V, 50 Hz i za sve uobičajene brzine vrtnje.

Trofazni sinhroni generatori svih snaga, za sve uobičajene napone i brzine vrtnje u izvedbama s horizontalnom i vertikalnom osovinom za hidro- i termo-elektane svih veličina.

Kavezni sinhroni motori do 5 kW

Trofazni sinhroni motori svih snaga za uobičajene napone i brzine vrtnje.

Trofazni Diesel-generatorski agregati 7 do 100 kVA

Istosmjerni strojevi

svih snaga za uobičajene napone i brzine vrtnje za sve vrste primjena kao generatori ili motori.

Svarni agregat za struje svarivanja do 400 A kod napona luka do 30 V, snaga motora 10 kW.

Motori za tramvaje i trolejbuse

Elektrodinamska pojačala (amplidin)

II. TRANSFORMATORI

Učinski transformatori

za sve napone, prijenosne omjere i spojeve, unutarnju ili vanjsku montažu,

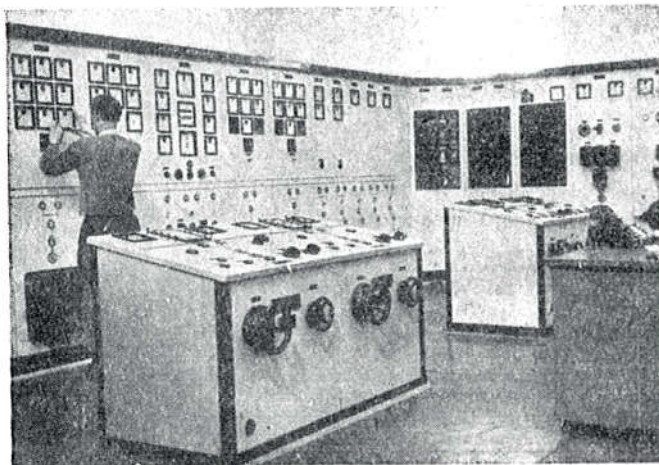
Serijski transformatori do 4 MVA

Veliki transformatori 4—100 MVA

Regulacioni transformatori

Mjerni transformatori

zamkasti, štapni i potporni, 1 ili 2 jezgre, do 110 kV



Naponski transformatori

maloljudni, dvopolno ili jednopolno izolirani, do 110 kV

Zakretni transformatori

Magnetska pojačala

III. APARATI ZA NISKI NAPON

Sklopke

Polužne sklopke i preklopke, pri-gradne, ugradne te za oklopljene razdjelnike

Okretne sklopke

Motorne zaštitne sklopke (u pripremi)

Sklopnici

Releji (Buchholz, tlačni)

Signalne sklopke, tipkala

Oprema za kranove
i liftove

Kontroleri i otpornici

Otkočni magneti i otkočni motori

Pribor za vozne vodove

Sklopnici za liftove

Pribor za upuštanje
i regulaciju motora
i generatora

Automatski regulatori napona

Rotorski uputnici zračni i u ulju

Rotorski vođeni uputnici

Regulacioni uputnici

Osigurači

Nosači osigurača

Osigurači velike snage (u pripremi)

Razvodne ploče i pribor

Razvodne i komandne ploče, potpuno opremljene za elektrane, transformatorske stanice, industriju i sva ostala elektropostrojenja.

Pribor za ploče.

IV. APARATI ZA VISOKI NAPON

Učinske sklopke

Hidromatske sklopke 10 i 30 kV

Pneumatske sklopke 30 i 110 kV

Rastavljači

Rastavljači do 30 kV za unutarnju, za 110 kV za vanjsku montažu

Linijski rastavljači do 30 kV

Nosači osigurača i rastavni osigurači

Potporni izolatori i nosači sabirnica

Pogoni za aparate

Ručni i pneumatski pogoni

V. ELEKTRIČNE PEĆI I GRIJAČI

Kalioničke peći

Tiganjske i elektrodne solne kupke

Elektrodne i uljne kadne kupke

Termalne kupke

Komorne, komorne silitne i dvokomorne silitne peći

Laboratorijske peći

Jamske peći sa cirkulacijom zraka

Sušare

Metalurške peći

Indukcione (n. f.) i lučne peći

Posebne peći

Pokrovne peći i sušare za lim

Jamske peći za bakar i čelik

Peći za žarenje šipaka i cijevi

Peći za cinčanje

Grijači

Grijači zraka (kaloriferi)

Ugradni i cijevni grijači

VI. PROJEKTI I MONTAŽA

za hidro- i termo-elektrane, transformatorske i razvodne stanice, valjaoničke uređaje, pogonske instalacije za industriju i rudarstvo, prenosila i dizala svih vrsta, pumpne stanice i sl.

