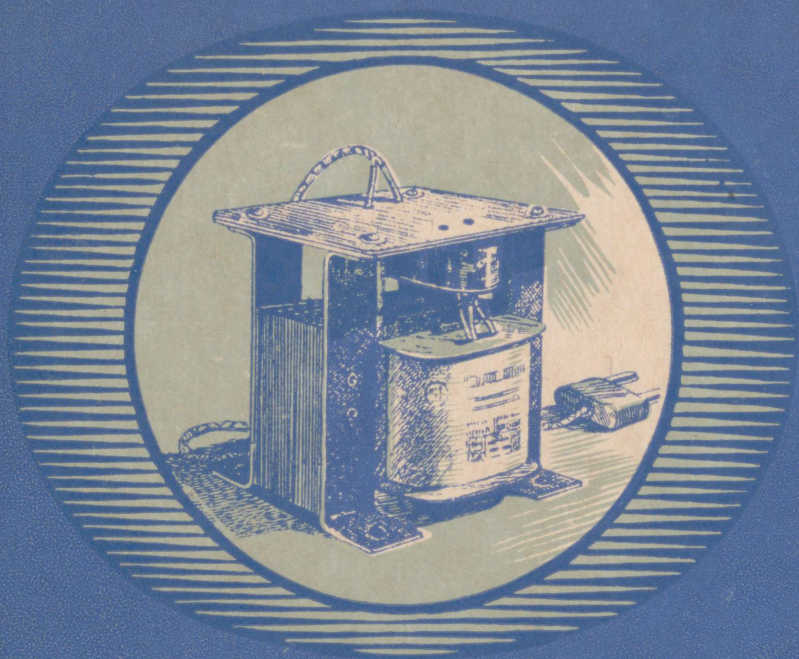


J. P. Žerebtsov



*Elementaarne*

**ELEKTROTEHNIKA**

EESTI RIIKLIK KIRJASTUS

A-19540 III

J. P. Žerebtsov

*Elementaarne*  
**ELEKTROTEHNIKA**



**EESTI RIIKLIK KIRJASTUS**  
**TALLINN 1953**

Originaali tiitel:

И. П. Жеребцов

ЭЛЕМЕНТАРНАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Государственное Издательство Литературы  
по вопросам связи и радио  
Москва 1950

Tõlkinud: J. Must

LUGEJALE.

*Populaarteadusliku kirjanduse toimetuse  
palub hinnangud ja arvamused teose ja  
teoses kasutatud terminoloogia kohta saata  
aadressil:*

TALLINN,  
Pärnu mnt. 10

*Eesti Riikliku Kirjastuse  
populaarteadusliku kirjanduse toimetuse.*

2

Tartu Riikliku Ülikooli  
Raamatukogu

20118





## SISSEJUHATUS

Nüüdisaegne elektrotehnika tugineb tunduval määral väljapaistvate vene teadlaste ja inseneride töödele. Sellele pani aluse akadeemik M. V. Lomonossov, kes juba XVIII sajandil tegeles elektriliste nähtuste uurimisega. Pärast teda teostas tähtsaid uurimusi elektri valdkonnas Meditsiinilis-Kirurgilise Akadeemia professor V. V. Petrov. 1802. aastal avastas ta elekrikaare, mida kuni tänapäevani kasutatakse võimsa valgusallikana ja ka laialdaselt metallide keevitamisel ja sulatamisel.

Erakordselt tähtsaid töid elektri alal teostas akadeemik E. H. Lenz. Tema määras kindlaks elektrivoolu soojusliku toime ja elektromagnetilise induktsiooni seadused.

Vene teadlane P. L. Silling leiutas 1832. a. elektromagnetilise telegraafi. Elektrilise telegraafi, elektrimootorite ja teiste seadiste leiutamisel etendasid suurt osa ka akadeemik B. S. Jakobi tööd.

Ülemaailmse tähtsusega oli elektriühõõglambi leiutamine 1873. aastal vene inseneri A. N. Lodõgini poolt.

Elektervalgustust kaarlampide abil rakendas P. N. Jablotškov, kes on ühtlasi ka transformaatori ja paljude teiste elektriseadiste leiutaja. Hiljem ehitas I. F. Ussagin esimesed transformaatorid maailmas.

Elektrienergia suurtesse kaugustesse ülekandmise algatajateks olid vene insenerid D. A. Latšinov, M. O. Dolivo-Dobrovolski ja R. E. Klasson.

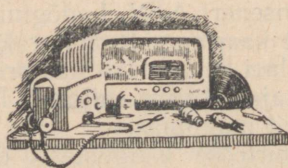
Kõiki neid vene teadlaste poolt elektri alal tehtud töid kroonis raadioside leiutamine 1895. aastal geniaalse vene füüsiku ja inseneri A. S. Popovi poolt. See leiutis avas teaduses ja tehnikas uue ajastu.

Pärast Suurt Oktoobrirevolutsiooni kulges elektrotehnika ja raadiotehnika areng meie maal uut, sotsialistlikku rada mööda. V. I. Lenini, seejärel J. V. Stalini juhtimisel arenesid laialdaselt Nõukogude Liidu elektrifitseerimise ja radio-

fitseerimise tööd. Stalinlike viisaastakute edukas täitmine kindlustas elektritööstuse arenemise ja rahvamajanduse elektrifitseerimise, samuti ka elektrotehnika- ja raadiotehnika-alaste teaduslike uurimistööde hiiglasliku kasvu. Nüüd lahendavad mitte enam üksikud teadlased, vaid teadlaste, inseneride, tehnikute ja tööliste võimsad kollektiivid mitmesuguseid probleeme elektrotehnika ja raadiotehnika valdkonnas. Nõukogude teadlaste tööd on paljudel aladel ennetanud välismaa tehnika saavutusi. Võitnud sotsialismi tingimustes areneb rahvamajanduses ennenägematu tempoga elektri ja radio kõige mitmekesisem rakendamine.

Ühes kodumaise elektrotehnika ja raadiotehnika arenemisega kasvanud ja tugevnenud raadioamatööride armee on reserviks, millest meie kodumaa igal aastal ammutab andekate raadiotelegrafistide, konstruktorite ja tehnikute rohkearvulist kaadrit. Selleks, et tunda seda tehnikat, peavad raadioamatöörid kogu aja olema teadlikud tema tähelepanuväärsetest saavutustest.

Selleks aga tuleb eelkõige omandada teaduse algeid. Käesolevast raamatust leiab lugeja elektrotehnika kõige elementaarsemate aluste käsitlemist. Omandades need alused võib ta lahendada palju praktilisi küsimusi, teha mõnesuguseid lihtsaid arvutusi ja õppida teadlikult tundma nüüdisaja elektrotehnika aluseid.





## I PEATÜKK ELEKTRIVOOL

### 1. Elektronid ja elektrilaengud

Kõik ained koosnevad väga väikestest, isegi tugevaimas mikroskoobis nähtamatutest osakestest, mida nimetatakse *molekulideks*. Molekulid omakorda koosnevad veel väiksematest osakestest — *aatomitest*. Ent iga aine aatomis on veel väiksemad ja väga liiku-  
vad materiaosakesed — elektronid.

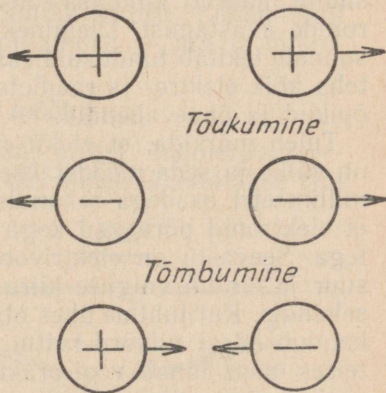
*Elektronid on negatiivse elektri osakesed*. Peale elektronide on kõikide ainete aatomites ka veel suurema massiga ja väheliikuvad positiivselt laetud osakesed.

*Elektronide liigrohkest (kuhjumist) loetakse negatiivseks elektrilaenguks ja tähistatakse miinusmärgiga (—). Ümberpöörduvalt, elektronide puuduolekut nimetatakse positiivseks laenguks ja tähistatakse plussmärgiga (+).*

*Uhesuguste märkidega elektrilaengud, s. o. positiivne ja positiivne või negatiivne ja negatiivne, tõukuvad teineteisest eemale.* Näiteks tõukavad elektronid alati üksteist eemale.

*Erinevate märkidega laengud, s. o. positiivsed ja negatiivsed tõmbuvad üksteist ligi.*

Seda elektrilaengute vastastikust mõju on näitlikult kujutatud joonisel 1.



Joon. 1. Elektrilaengute vastastikune mõju.

## 2. Elektrivool

Mõnedes ainetes saavad elektronid liikuda ühest aatomist teise või aatomitevahelises ruumis. Niisuguseid aineid me nimetame *elektrijuhtideks*. Nende hulka kuuluvad esmajärjekorras kõik metallid, süsi, soolade, hapete ja leeliste lahused, edasi elusorganismid, maa, samuti ka kõik niisked ja rõsked esemed. Teisi aineid, milledes elektronid ei saa selliselt liikuda, nimetatakse *mittejuhtideks, isolaatoriteks* ehk dielektrikuteks. Isolaatorid on õhk ja teised gaasid, klaas, portselan, kummi, plastmassid, mitmesugused vaigud ja õlitaolised vedelikud, kuiv puit, kuiv paber, kuiv riie ning palju teisi aineid.

*Tahketes elektrijuhtides kulgev elektrivool on elektronide liikumine piki elektrijuhet.*

Elektronid liiguvad alati sellest kohast, kus neid on ülekaalus, s. o. miinuselt, sinna, kus neid on vähem, s. o. plussi suunas. Kuid elektrotehnikas on kokku lepitud, et *elektrivool voolab plussilt miinuse suunas*. Selline voolusuund määrati kindlaks täiesti leppeliselt juba enne elektronide avastamist. Üleminek elektronide tõelisele liikumisuunale tekitab tunduvaid raskusi, kuna selleks tuleb ümber teha kõik elektro- ja raadiotehnika alal ilmunud raamatud, õpikud ja õppevahendid.

Tuleb märkida, et elektronide liikumiskiirus elektrijuhis on väike ja seda mõõdetakse kõigest ainult sentimeetri või millimeetri osadega sekundis. See on seletatav asjaoluga, et elektronid põrkavad kogu aeg kokku elektrijuhi osakestega. Seevastu on elektrivoolu levimiskiirus juhtmes väga suur ja ulatub valguse kiiruseni, s. o. 300 000 kilomeetrini sekundis. Kui juhtme ühes otsas tekib vool, siis see protsess kandub edasi niivõrd ruttu, peaaegu hetkeliselt, et juhtme teises otsas ilmub vool praktiliselt samal momendil. Elektronid ise aga liiguvad väga aeglaselt, kogu aja kokku põrgates ja hõõrdudes juhtme osakestega. Seetõttu need elektronid, mis hakkavad liikuma juhtme alguses, ei jõua nii ruttu selle lõpuni. Juhtmes kulgevat elektrivoolu võib võrrelda vee liikumisega pikas torus, mille ühes otsas on pump ja kus toru on veega täidetud. Kui pumbaga suruda vett torusse, siis kandub rõhk väga ruttu piki toru vee ühtedelt osakestelt teistele ja vesi voolab toru lahtisest otsast välja. Kuid pumba abil lisatud vesi liigub palju aeglasemalt edasi ja saabub toru lõppu tunduva ajavahemiku järel.

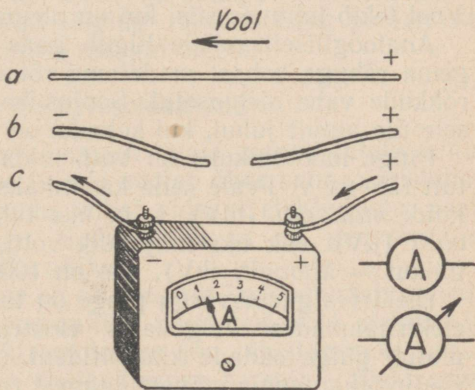
Mida rohkem elektrone läbib ühe sekundi vältel juhtme ristlõiget, seda tugevam on *vool*. Voolutugevust tähistatakse tähega  $I$  või  $i$  (hetkväärtuse korral) ja mõõdetakse eriliste mõõtühikutega — *ampritega*. Kui voolutugevus ehk nagu tehnikas kõneldakse, vool on üks amper, siis see tähendab, et ühe sekundi vältel läbib juhtme ristlõikepinda täiesti kindel arv elektrone, mis väljendub hiiglasuure arvuga, milline koosneb kuuest, kolmest ja seitsmeteistkümnest nullist! . . . Mõnesuguse kujutluse sellest arvust annab järgmine näide. Kui need elektronid ei läbi juhtme ristlõiget mitte korraga, vaid ühe miljoni kaupa sekundis, siis vajatakse nende kõikide läbimiseks kakssada tuhat aastat!

Tavalisi valgustuslampe läbiv vool on mõni kümnendik amprit. Elektrisoojendusriistades võrdub ta mõne ampriga, võimsate elektriliinide juhtmetes aga võib ta olla tuhandeid ampreid või veel rohkem. Paljudel juhtudel aga, eriti raadioaparaatides, on vool palju väiksem kui üks amper. Seetõttu kasutatakse väga sageli voolu mõõtmiseks väiksemaid ühikuid — *milliamprit*, mis on üks tuhandik amprit, ja *mikroamprit*, mis on üks miljondik amprit. Lühendatult tähistatakse amprit tähega  $A$ , milliamprit —  $mA$  ja mikroamprit —  $\mu A$ .

### 3. Elektrivoolu mõõtmine

Voolu mõõtmiseks kasutatakse erilisi mõõteriistu — *ampermeetreid*, mis elektrilistel skeemidel tähistatakse ringikesega, mille sees on täht  $A$  (joon. 2). Monikord varustatakse ringike põiki lõikuva noolega. Nõrgemate voolude mõõtmiseks ette nähtud ampermeetritel on skaala jaotused milliamprites ja neid nimetatakse milliampermeetriteks.

Kui on tarvis mõõta voolu, mis kulgeb mingisuguses juhtmes (joon. 2 *a*), siis tuleb juhe (joon. 2 *b*)



Joon. 2. Ampermeetri lülitamine ja tähistamine skeemidel.

katki lõigata ja lõigatud juhtme otsade vahele lülitada mõõteriist (ampermeeter või milliampermeeter), nagu nähtub jooniselt 2 c. Siis läbib kogu vool mõõteriista ja ta mõõdetakse.

Vooluringi lülitatud mõõteriist peab olema teadlikult arvutatud tugevamale voolule kui on mõõdetav vool. Näiteks ei tohi mõneamprise voolu mõõtmiseks lülitada vooluringi 250 milliamprist milliampermeetrit, sest sel juhul mõõteriist rikneb.

Paljude mõõteriistade klemmid on varustatud märkidega + ja — või ainult + märgiga; sel puhul tuleb klemmid ühendada juhtmetega vastavalt nendele märkidele. Selle juhise mittetäitmisel kaldub osuti vastupidises suunas ja ta võib painduda.

#### 4. Pinge ja selle ühikud

Teiseks elektrilisi nähtusi iseloomustavaks põhiliseks suuruseks on *pinge*, mida tähistatakse tähega *U* või *u*. Selleks, et mingisuguses elektrijuhis tekiks vool, s. o. et elektronid hakkaksid liikuma piki elektrijuhti, peavad selle juhi otstel olema erinevad elektrilised olukorrad, ehk nagu tavaliselt öeldakse, *erinevad potentsiaalid*. Juhi ühel otsal peab olema elektronide üleküllus ja teisel otsal nende puudus. Pinge iseloomustab nimelt seda vahet elektrilistes olukordades, s. o. potentsiaalide vahet elektrijuhi otstel. Võib öelda, et pinge on elektrivoolu tekkimise põhjuseks. Vool tekib juhtmes siis, kui on olemas pinge.

Analoogiliselt sellele liigub gaas või vedelik alati kõrgema rõhuga kohast madalama rõhuga kohta, s. o. ainult rõhkude vahe olemasolul. Soojus kandub ühelt kehalt teisele üle ainult juhul, kui kehadel on erinev temperatuur.

Pinge mõõtühikuks on *volt*, mida tähistatakse lühendatult tähega *V*. Peale selle kasutatakse veel väiksemaid ühikuid: *millivolti* (mV), s. o. üks tuhandik volti, ja *mikrovolti* ( $\mu$ V) ehk üks miljondik volti, samuti ka suuremat ühikut — *kilovolti* (kV), mis on 1000 V.

Elektrivalgustusvõrgu pinge on tavaliselt 127 või 220 V, elektrijaamadest kulgevates elektrimagistraalliinides aga ulatub pinge sadade kilovoltideni. Seevastu tekib raadio vastuvõtuantennis mõnest kaugest raadiojaamast saabuvate raadiolainete toimel pinge, mis on kõigest mõni mikrovolt.

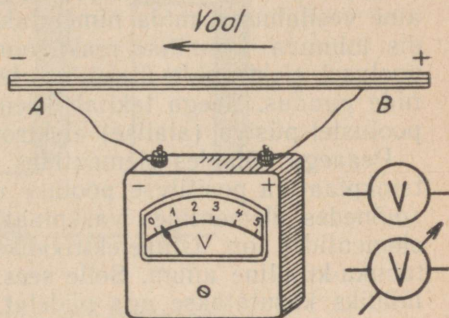
## 5. Pinge mõõtmine

Pinget mõõdetakse mõõteriistade abil, mida nimetatakse *voltmeetriteks*. Skeemidel tähistatakse neid sarnaselt ampermeetritega, kuid ringi sisse märgitakse täht V (joon. 3).

Voltmeetri otstarve on mõõta pinget, s. o. elektriliste potentsiaalide vahet mingi kahe punkti vahel. Seetõttu ühendatakse voltmeetri klemmide juhtmed alati nimelt nende kahe punktiga, millede vahel on tarvis pinget mõõta. Näiteks on joonisel 3 kujutatud voltmeetrilülitus juhtmel esineva pinge mõõtmiseks juhtme punktide A ja B vahel.

Voltmeetri sisselülitamisel tuleb jälgida samasuguseid ettevaatusabinõusid, missuguseid mainiti ampermeetri puhul.

Näiteks ei tohi 10-voldise astmikuga (skaalaga) voltmeetrit lülitada täiesti tundmatu pinge mõõtmiseks, mis võib osutuda tunduvalt kõrgemaks kui 10 V, ja sellega mõõteriista rikuda. Samuti tuleb alati jälgida lülituse õiget polaarsust, kui voltmeetril on pooluste märgid olemas.



Joon. 3. Voltmeetri lülitamine ja tähistamine skeemidel.

## 6. Elektrivooluallikad

Praktilisteks otstarveteks on vaja sageli alalisvoolu, millel on püsiv suurus ja mis voolab ühes suunas mistahes ajahüki vältel. Et saada sellist pidevat elektrivoolu, peab meil olema püsiv pinge. Seda tekitavad nn. *generaatorid* ehk *elektromotoorse jõu allikad*.

*Elektromotoorne jõud* on suurus, mis iseloomustab potentsiaalide vahet, s. o. vooluallika poolt tekitatud elektriliste seisundite vahet. Elektromotoorse jõu tähistamiseks kasutatakse tähte *E* või *e* (hetkväärtuse korral). Elektromotoorse jõu mõõtühikuteks on needsamad ühikud, mis pinge mõõtmisekski.

Elektrigeneraatori tööd võib võrrelda pumba tööga, mis tekitab survet ja tagab torus gaasi või vee pideva liikumise.

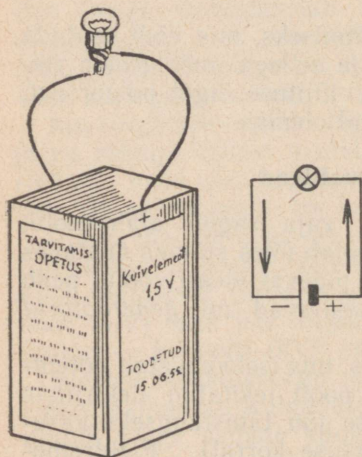
Elektromotoorse jõu allikateks on galvaanielemendid, akumulaatorid ja dünamomasinad, samuti ka mõned teised seadmed. Teisiti nimetatakse neid *voolluallikateks*, *toiteallikateks* ehk *elektrienergia allikateks*.

Raadiovastuvõtjate toiteks kasutatakse sageli galvaanielemente ja patareisid. Igal galvaanielemendil on kaks plaati, tavaliselt süsiplaat ja tsinkplaat (nimetatakse *elektroodideks* ehk *poolusteks*), mis asetsevad teatava keemilise aine vesilahuses, mida nimetatakse *elektrolüüdiks*. Elementis toimuva keemilise reaktsiooni toimele tekib tema ühel poolusel elektronide üleküllus, teisel poolusel aga elektronide puudus. Seega tekitab keemiline reaktsioon elemendi poolustel püsiva (alalise) elektromotoorse jõu.

Peaaegu kõikides elementides on negatiivseks pooluseks tsinkplaat ja positiivse pooluse ülesannet täidab süsiplaat (mõnedes elementides vaskplaat). Levinumatel, nn. kuivelementidel on tsinkelektroodiks ümmargune või püst-tahuka-kujuline anum. Selle sees on süsielektrood, elektrolyüdiks kasutatakse aga püdelat kissellitaolist massi, mis on valmistatud salmiaagi vesilahusest. Üaltpoolt on selline element kaetud pigiga, mille kaudu elektroodide juurest väljub kaks traati. Joonisel 4 on toodud kuivelemendi väliskuju ja tema kokkuleppeline kujutus skeemidel kahe kriipsu kujul. Nendest üks — lühike ja jäme — tähistab positiivset poolust, teine — pikem ja peenem — negatiivset poolust.

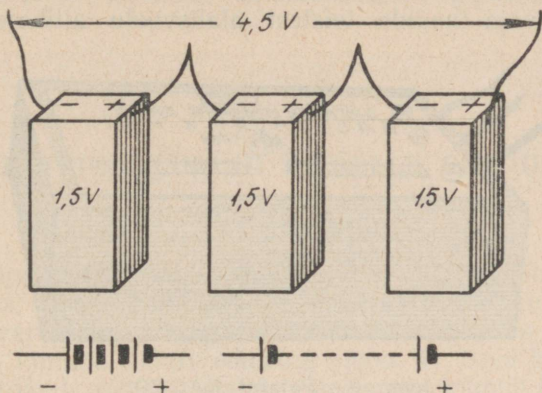
Ühe kuivelemendi pingeline on ligikaudu 1 kuni 1,5 V. Vool, mida võib saada ühest elemendist, on seda tugevam, mida suuremad on elemendi mõõted. Tegelikult kasutatakse elemendid võivad anda voolu mõnestkümnest milliamprist kuni mõne amprini.

Suurema elektromotoorse jõu saamiseks ühendatakse mitu elementi patareiks. Enamasti kasutatakse elementide



Joon. 4. Lihtsaim vooring ja selle skemaatiline kujutus.

nn. järjestikühendust. Sel juhul ühendatakse ühe elemendi pluss teise elemendi miinusega, teise elemendi pluss — kolmanda elemendi miinusega jne., nagu on kujutatud joonisel 5. Esimese elemendi miinus ja viimase pluss jäävad seejuures vabaks ning on kogu patarei poolusteks.



Joon. 5. Elementide järjestikühendus.

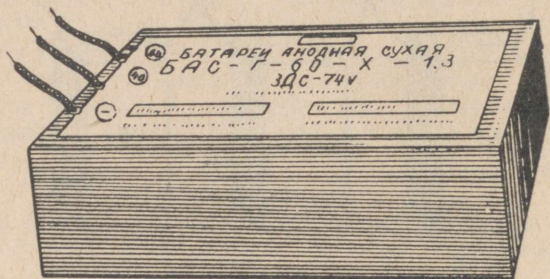
Skeemidel joonistatakse patarei tavaliselt mitmest järjestikku ühendatud elemendist, näitamata ühendusjuhtmeid üksikute elementide vahel. Kui patareid moodustavate elementide arv on suur, siis tavaliselt näidatakse ainult esimene ja viimane element, nende vahele aga tõmmatakse punktiirjoon, mis tähistab vahelejäetud elemente (joon. 5).

Elementide järjestikühendamisel suureneb elektromotoorne jõud nii mitu korda, kui palju elemente on võetud. Näiteks, kui järjestikku on ühendatud kolm elementi, milles igaühe elektromotoorne jõud on 1,5 V, siis kogu patarei elektromotoorne jõud on 4,5 V.

Pingete saamiseks mitmekümne voldi ulatuses kasutatakse kuivpatareid, mis koosnevad suurest arvust järjestikku ühendatud ja ühises pappkarbis asetsevatest väikesest kuivelementidest. Niisugustes patareides on sageli väljavõtted mitte ainult äärmistelt poolustelt, vaid ka mõnedelt vahepealsetelt elementidelt, et oleks võimalik saada mõnesugust osa patarei täispingest. Joonisel 6 on toodud kuivpatarei БАС-60 (kuiv-anoodpatarei 60 V), millel on kolm väljavõtet: —, +40 V ja +60 V.

Galvaanielementide puuduseks on see, et pärast mõne-  
ajalist töötamist (mõne kuu pärast) muutuvad nad tarvi-  
tamiskõlbmatuteks.

Peale galvaanielementide leiavad laialdast kasutamist  
veel akumulaatorid, mida skeemidel tähistatakse samuti  
nagu elementegi. Akumulaatorid erinevad sellepoolest, et  
neid on vaja laadida teistest alalisvoolu allikatest. On



Joon. 6. Patarei БАС-60.

olemas kahte tüüpi akumulaatoreid. Hapeakumulaatoris  
asetsevad seatinaplaadid väävelhappe vesilahuses ja tema  
elektromotoorne jõud on ligikaudu 2 V. Leelisakumulaatoris  
asetsevad raudnikkelplaadid sööbekaaliumi vesilahuses ja  
tema elektromotoorne jõud on ligikaudu 1,2 V.

Akumulaatorite paremus seisab selles, et nad võivad  
anda palju tugevamat voolu kui galvaanielemendid. Peale  
selle on võimalus neid tühjenemise puhul uuesti laadida.  
Tühjendamist ja laadimist võib korrata palju kordi ja see-  
tõttu on akumulaatorite kasutamisega mitu aastat.





## II PEATÜKK

# ELEKTRIVOOLURING JA SELLE SEADUSED

### 7. Elektrivooluring

Kui vooluallika poolused ühendada juhtme abil voolutarbijaga, näiteks hõõglambiga, mida skeemidel kujutatakse ristiga varustatud ringiga või lihtsalt ristiga, siis saadakse lihtsaim kinnine elektrivooluring (joon. 4). Seni kui vooluallikas töötab, näiteks seni kui elemendis toimub keemiline reaktsioon, mõjub selles vooluringis elektromotoorne jõud ja vooluringis voolab vool. Kui vooluring mingisuguses kohas katkestada ehk, nagu öeldakse, lahutada, siis vool katkeb. Kuid elektromotoorne jõud püsib ka lahutatud vooluringi puhul.

*Seega on pideva voolu saamiseks vajalik peale elektromotoorse jõu veel suletud vooluringi olemasolu.*

Igas suletud vooluringis eristatakse *sisemist osa*, s. o. elementi või mõnda teist vooluallikat, ja *välist osa*, kuhu kuuluvad kõik seadised ja generaatori ühendusjuhtmed.

Suletud vooluringis liigub elektronide vool vooluallika miinuspooluselt välisvooluringi kaudu, näiteks elektrilambi kaudu, vooluallika plusspooluse juurde. Edasi liigub ta vooluallika sees selle plussilt miinusele. Nagu eespool juba öeldud, loetakse kokkuleppeliselt, et välisvooluringis liigub elektrivool plussilt miinusele, s. o. elektronide tõelisele liikumisele vastupidises suunas. Mitmesuguste keerukamate skeemide tundmaõppimiseks on väga tähtis meeles pidada, et igasuguses suletud vooluringis läbib vool tingimata elektromotoorse jõu allika.

Samuti on tähtis tundma õppida erinevust elektromotoorse jõu ja elektrivoolu vahel. Galvaanilise elemendi või mõne teise vooluallika pooluste vahel potentsiaalide vahet

tekitav elektromotoorne jõud esineb olenemata sellest, kas ring on suletud või mitte, kas selles voolu on või mitte. Kuid vool võib olla teatava väärtusega ainult siis, kui vooluring on suletud. Seega on elektromotoorne jõud ajeks, mis põhjustab voolu tekkimist, vool aga iseloomustab juba elektronide eneste liikumist. Analoogiliselt sellega, kui vesivarustuse süsteemis on kõik kraanid suletud, siis vee liikumist torustikus ei ole ja meie ei saa rääkida ka mingisugusest veevoolust, kuigi veesurve on olemas. Tarvitseb aga avada kraani, kui surve mõjul algab vee liikumine ja tekib torustikus teatav kindel vee vool.

Kui lihtsaima, elektrilambiga ühendatud elemendist koosneva vooluringi erisugustesse osadesse lülitada ampermeetrid, siis need kõik näitavad võrdse tugevusega voolu. Selline vooluring on iseloomulik selle poolest, et kõik temas olevad seadised, s. o. elektrilamp, element ja ampermeetrid on lülitatud järjestikku. Vool läbib kõiki seadiseid või vooluringi kõiki osi järjestikku. Niisugust vooluringi nimetatakse *järjestikku ühendatud vooluringiks*, sellesse seadiste lülitamist aga nimetatakse *järjestikühenduseks*.

*Järjestikühendatud vooluringis on vool igas ringi osas sama.* See seadus on väga tähtis, kuid sageli paljud eksivad, arvates, et vooluallika ühest poolusest väljuv vool piki oma teekonda järkjärgult nõrgeneb ja jõuab teise poolusesse juba nõrgemana. Kuid see tähendaks, et osa elektrone jääks kuhugi peatuma, mida tegelikult muidugi ei toimu.

Elektrivoolu püsivuse seadus on järjestikühendatud vooluringi üksikutes osades kehtiv järjestikku lülitatud seadiste mistahes arvu puhul.

Tuleb silmas pidada, et elektromotoorse jõu allikas on vooluringi välisosaga alati ühendatud järjestikku. Seetõttu on vool vooluallika sees niisama suur nagu välises vooluringi osaski. Teisiti väljendades, generaatorit läbib alati kogu välisvooluringis tarbitav vool.

## 8. Elektriline takistus

Käsitleme nüüd veel ühte elektrivooluringi iseloomustavat tähtsat suurust.

Meie teame, et erinevad ained juhivad elektrivoolu mitte ühesuguselt ja jagunevad seetõttu elektrijuhtideks ja

dielektrikuteks. Elektri juhi, s. o. elektrit juhtiva aine enese mõju voolule arvestatakse *elektrilise takistuse* abil, mida tavaliselt nimetatakse lihtsalt *takistuseks* ja mis sõltub elektri juhi mõõdetest ja materjalist. Takistuse olemus seisab selles, et elektronid põrkavad omal liikumisel kokku juhtme aine enese osakestega ja soojendavad juhet.

Mida pikem ja peenem on juhe, seda suurem on ta takistus.

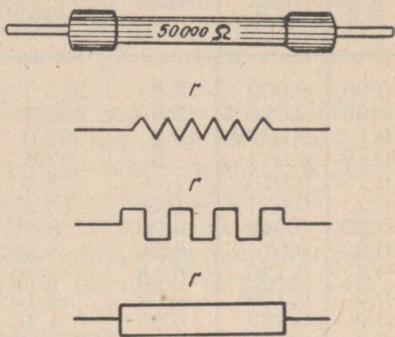
Mitmesugustest ainetest on hõbedal ja vasel väikseim takistus. Veidi suurem on alumiiniumi takistus ja veel suurem on terase takistus.

Mõnel juhul on tarvis voolu läbimisele tekitada suurt takistust. Selleks kasutatakse suure takistusega erisulamist valmistatud juhtmeid (takistustraate), millede hulka kuuluvad nikeliin, konstantaan, mangaanin, kroomnikkel ja teised. Väga suure takistusega juhtmed on valmistatud söest. Kroomniklil ja mõnel teisel sulamil on suur kuumuskindlus, s. o. nad võivad kõrgele temperatuurile kaua vastu pidada, mistõttu neid kasutatakse elektrilistes soojendusseadistes.

Takistuse mõõtühikuteks on: *oom*, *kilo-oom*, mille suurus on tuhat oomi, ja *megaoom*, mis võrdub miljoni oomiga. Neid mõõtühikuid tähistatakse lühidalt:  $\Omega$ ,  $k\Omega$  ja  $M\Omega$ .

Takistust üks oom omab 1 m pikkune ja 0,15 mm läbimõõduga vasktraat. Vasest ühendusjuhtmetel on alati väga väike takistus ja ta moodustab oomi tähtsusetuid murdosi. Tavalistes soojendusseadistes ulatub takistus kümnete oomideni, mitmesuguste elektrilampide hõõgniitide takistus on kümnetest kuni sadade oomideni, dielektrikute takistust mõõdetakse aga sadade ja tuhandete mega-oomidega. Raadioaparatuuris kasutatakse väga erinevaid takistusi üksikutest oomidest kuni mitme mega-oomini.

Joonisel 7 on toodud raadioaparatuuris kasutatavate söest takistite väliskuju, samuti on antud takistite skeemi-



Joon. 7. Masstakisti väliskuju ja takistite kujutamise skeemidel.

del tähistamise leppekujutised. Elektrilist takistust tähistatakse tähega  $r$ .

Mitmesuguste juhtmete takistuse suurust on võimalik arvutada tabeli 1 abil.

Tabel 1

Mõningate elektrijuhtide andmeid

Läbimõõt mm	Ristlõige mm <sup>2</sup>	Juhtme ühe meetri takistus oomides				Lubatud vool amprites voolu tihedusel 2 A/mm <sup>2</sup>
		vask	nikeliin, manganiin	konstan- taan	kroom- nikkel	
0,05	0,002	8,9	212	245	510	0,0039
0,08	0,005	3,5	82,5	95,4	199	0,010
0,1	0,0079	2,2	53,0	61,1	127	0,016
0,12	0,011	1,6	37,6	42,6	88,5	0,022
0,15	0,018	1,0	23,5	27,2	56,5	0,035
0,2	0,031	0,55	13,2	15,3	31,9	0,063
0,25	0,049	0,36	8,45	9,78	20,4	0,098
0,3	0,07	0,25	5,36	6,80	14,2	0,14
0,4	0,126	0,14	3,30	3,80	7,94	0,25
0,5	0,196	0,09	2,12	2,45	5,10	0,39
0,6	0,283	0,06	1,45	1,69	3,54	0,57
0,7	0,385	0,045	1,08	1,25	2,60	0,77
0,8	0,5	0,035	0,325	0,954	1,99	1,0
1,0	0,79	0,023	0,530	0,611	1,27	1,57

Märkusi: 1. Tabelis puuduvate mõõdetega juhtmete kohta käivaid andmeid tuleb leida teatud keskmiste suurustena, näiteks 0,18 mm läbimõõduga nikeliintraadi kohta võib lugeda, et ta ristlõige on 0,025 mm<sup>2</sup>, ühe meetri takistus = 17Ω ja lubatud vool = 0,05 A.

2. Voolu teistsuguse tiheduse jaoks tuleb viimases lahtris olevaid andmeid vastavalt muuta, näiteks voolutihedusel 6 A/mm<sup>2</sup> tuleb andmeid suurendada 3 korda.

## 9. Ohmi seadus

Ohmi seadus on elektro- ja raadiotehnika tähtsaim seadus. Tema abil on võimalik tundma õppida mitmesuguseid elektrivooluringe ja ta seob omavahel kolme põhisuurust: voolu  $I$ , pinget  $U$  ja takistust  $r$ . Paljud teised elektrotehnika seadused tuletatakse põhiliselt Ohmi seadusest. Seetõttu on tarvis selgesti kujutleda selle seaduse rakendamist kõige mitmekesisematel juhtudel, mõista tema ole-

must ja osata teda õigesti kasutada praktiliste ülesannete lahendamisel. Sageli tehakse paljude elektrotehnika ja raadiotehnika küsimuste lahendamisel vigu just oskamatus tõttu Ohmi seadust õigesti rakendada.

Ohmi seadust võib sõnastada järgmiselt:

*Vool on seda tugevam, mida kõrgem on pinge ja mida väiksem on takistus.*

Kui vooluringis rakendatud pinget kõrgendada teatav arv korda, siis samapalju korda tugevneb vool selles vooluringis. Kui suurendada vooluringi takistust kindel arv korda, siis samapalju korda vool väheneb. Analoomiliselt sellele on veevool torus seda suurem, mida tugevam on veesurve ja mida väiksem on vee liikumisele toru poolt avaldatav takistus.

Et Ohmi seadust oleks võimalik matemaatiliselt kõige lihtsamalt väljendada, valiti takistuse ühikuks niisuguse juhtme takistus, milles ühevoldise pinge puhul saadakse üheamprine vool. Niisugune takistus just ongi üks oom.

Selle tulemusena on alati võimalik arvutada voolu amprites, kui pinget voltides jagada takistusega oomides. Seetõttu väljendatakse Ohmi seadust tavaliselt järgmise valemiga:

$$\boxed{\text{vool} = \frac{\text{pinge}}{\text{takistus}} .}$$

Kasutades tähtväärtusi, kirjutatakse:

$$\boxed{I = \frac{U}{r}} \quad \text{või} \quad \boxed{i = \frac{u}{r}} \quad (\text{hetkväärtuse korral}).$$

Arvutused Ohmi seaduse põhjal on õiged juhul, kui pinge on väljendatud voltides, takistus oomides ja vool amprites. Kui need suurused on antud teistes ühikutes, näiteks milliamprites, millivoltides, megaoomides jne., siis tuleb need muuta vastavalt ampriteks, voltideks ja oomideks. Et seda rõhutada, kirjutatakse Ohmi seaduse valem mõnikord niisugusena:

$$\boxed{\text{amprid} = \frac{\text{voldid}}{\text{oomid}} .}$$

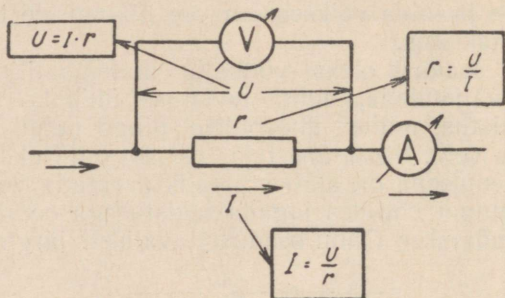
Samuti on võimalik voolu arvutada milliamprites, kui

takistus on väljendatud kilo-oomides, pinge aga voltides, s. o.

$$\text{milliamprid} = \frac{\text{voldid}}{\text{kilo-oomid}}.$$

Niisugusel kujul on see valem raadiotehnilisteks arvutusteks sobivam.

Ohmi seadus kehtib ka vooluringi osa kohta. Kui on tarvis kindlaks määrata voolu vooluringi antud osas, siis tuleb vooluringi selles osas rakendatud pinge jagada vooluringi sama osa takistusega (joon. 8).



Joon. 8. Ohmi seaduse rakendamine vooluringi osa kohta.

Toome voolu arvutamise näite Ohmi seaduse kohaselt. On tarvis kindlaks määrata vool elektrilambis, mille takistus on 2,5 oomi, kui lambi hõõgniidile on rakendatud pinge 5 V. Jagades 5 V 2,5 oomiga saame voolu 2 A. Teise näitena arvutame voolu, mis läbib 500 V pinge toimet 0,5 megaomist takistit. Arvutamiseks tuleb takistus väljendada oomides. Saame 500 000 oomi. Kui 500 V jagada 500 000 oomiga, siis leiame, et vool on 0,001 A ehk 1 mA.

$$I = \frac{500}{500\,000} = 0,001 \text{ A.}$$

Väga sageli tuleb Ohmi seadusega määrata pinget, teades voolu ja takistust. Selleks juhuks anname Ohmi seaduse valemile järgmise kuju:

$$\boxed{\text{pinge} = \text{vool} \times \text{takistus}} \quad \text{ehk} \quad \boxed{U = I \cdot r.}$$

Samuti võib kirjutada

$$\boxed{\text{voldid} = \text{amprid} \times \text{oomid}}$$

ehk

$$\boxed{\text{voldid} = \text{milliamprid} \times \text{kilo-oomid.}}$$

Toodud valemitest nähtub, et mida suurem on takistus ja mida tugevam vool, seda kõrgem pingeline on antud takistuse või vooluringi osa otstel. Selle olenevuse mõtet ei ole raske mõista. Kui takistuse suurus jääb muutmatuks, siis saab voolu suurendada ainult pingeline vastava tõstmise teel. See tähendab, et püsiva takistuse puhul vastab tugevamale voolule alati kõrgem pingeline. Kui meie soovime saada ühesugust voolu erinevates takistustes, siis on ilmne, et suuremale takistusele tuleb rakendada vastavalt kõrgem pingeline.

Väga sageli nimetatakse pinget vooluringi antud osas *pingelanguks*. See termin põhjustab sageli arusaamatusi. Paljud arvavad, et pingeline «lang» on tingimata mingisugune kaotatud, mittevajalik pingeline. Mõisted «pingeline» ja «pingeline lang» aga on täiesti identsed (samatähenduslikud).

Pingeline arvutamiseks Ohmi seaduse järgi võib tuua järgmise näite. 10 k $\Omega$ -st takistit läbib 5 mA-ne vool ja tarvis on kindlaks määrata pingeline selles takistuses. Väljendame voolu amprites. Saame 0,005 A. Korrutades selle väärtuse 10 000  $\Omega$ -ga leiame, et pingeline on 50 V. Valemiga leiame samuti:  $U = I \cdot r = 0,005 \cdot 10\,000 = 50$  V. Sama tulemuse oleks võinud saada 5 mA otsesel korrutamisel 10 kilo-oomiga  $U = 5 \cdot 10 = 50$  V.

Ohmi seaduse rakendamise kolmandaks ja viimaseks juhuks on takistuse suuruse arvutamine, kui on teada pingeline ja vool. Selleks juhuks kirjutatakse valem järgmisel kujul:

$$\boxed{\text{takistus} = \frac{\text{pingeline}}{\text{vool}}}$$

ehk

$$\boxed{r = \frac{U}{I}}$$

Samuti võib kirjutada:

$$\boxed{\text{oomid} = \frac{\text{voldid}}{\text{amprid}}}$$

ehk

$$\boxed{\text{kilo-oomid} = \frac{\text{voldid}}{\text{milliamprid}}}$$

Takistuse väärtuseks on alati pingeline jagatis vooluga.

Kui antud takistile rakendatud pinget tõsta või madaldada kindel arv korda, siis vool suureneb või väheneb samapalju korda, kuid pinge ja voolu jagatis, mis on võrdne takistusega, jääb muutumatuks.

Ohmi seadusest tuletatud takistuse arvutamise valemist ei tule aru saada selles mõttes, et antud juhtme takistus on voolust ja pingest. On hästi teada, et ta on eranditult juhtme pikkusest, jämedusest ja materjalist. Kuigi takistuse määramise valem meenutab väliskujult veidi voolu arvutamise valemit, on nende vahel põhimõtteline vahe. Vooluringi antud osas on vool tegelikult pingest ja takistusest ning muutub nende suuruste muutumisega. Vooluringi antud osa takistus aga on püsiv suurus, mis ei ole pingega ega voolu muutumisest, on aga võrdne nende suuruste jagatisega. Nimelt selliselt tuleb mõista Ohmi seaduse valemi kolmandat varianti.

Kui kahes mingisuguses takistis saadakse üks ja sama vool, nendele takistitele rakendatud pinged on aga erinevad, siis on ilmne, et takistusel, millele on rakendatud kõrgem pinge, on vastavalt suurem väärtus. Kui aga ühe ja sama pinge mõjul saadakse kahes erisuguses takistuses erinev vool, siis on ilmne, et nõrgem vool esineb alati suuremas takistuses. Kõik see järgneb oma olemuselt Ohmi seaduse põhitõest, s. o. sellest, et vool on seda tugevam, mida kõrgem on pinge ja mida väiksem on takistus.

Järgmise näitena toome takistuse arvutuse Ohmi seaduse põhjal. On tarvis leida takistuse suurus, mida läbib 40 V pinge juures 50 mA vool. Väljendame voolu amprites:  $I = 0,05 \text{ A}$ . 40 jagades 0,05-ga leiame, et takistus on 800 oomi.

$$r = \frac{40}{0,05} = 800 \Omega.$$

## 10. Järjestikühendus

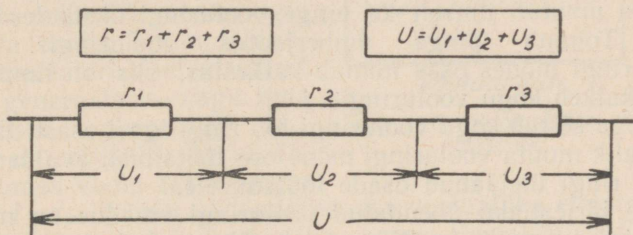
Mistahes lihtsa või keeruka elektrivooluringi tundmaõppimisel peab alati selge olema, mis toimub elektriliste põhisuurustega: vooluga, takistusega ja pingega. Järjestikku ühendatud vooluring on põhimine vooluring. Nagu eespool märkisime, moodustab suletud vooluring koos oma välisosaga ning vooluallikaga järjestikühenduse ja et järjestikku ühendatud vooluringis on vool igal pool ühesugune.

Käsitleme nüüd järjestikku ühendatud vooluringi teisi tähtsaid seadusi.

Esinegu elektri vooluring, milles on järjestikku lülitatud mitu takistust  $r_1, r_2, r_3$ , s. o. mitu seadist, millede takistused on erisugused (joon. 9). Ei ole raske taibata, et *järjestikku ühendatud vooluringi kogutakistus  $r$  on võrdne üksikute takistuste summaga:*

$$r = r_1 + r_2 + r_3.$$

Teisiti väljendades, järjestikku ühendamisel vooluringi takistus suureneb. Vool läbib üksteise järel kõiki takistusi, mis on samaväärne juhtme pikkuse suurenemisega.



Joon. 9. Takistite järjestikühendus.

Pinge jaotub vooluringi üksikute osade vahel vastavalt nende takistusele. Vooluringi suurema takistusega osas on pingelang vastavalt suurem. Järjestikku ühendatud vooluringis rakendatud kogupinge  $U$  on alati võrdne vooluringi üksikutes osades rakendatud pingete summaga:

$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

Niisugune kogupinge jaotus vooluringi mistahes osade vahel järgneb Ohmi seadusest. Pinge vooluringi mistahes osas on määratud voolu ja vooluringi sama osa takistuse korrutisega. Kuid vool on igal pool tugevuselt sama. Seetõttu oleneb pinge vooluringi üksikutes osades takistusest.

Selgitame neid järjestikku ühendatud vooluringi omadusi arvulise näitega: Elektrivõrku pingega 120 V on lülitatud järjestikku kaks takistust  $r_1 = 20\Omega$  ja  $r_2 = 40\Omega$ . On tarvis leida vooluringi kogutakistus  $r$ , vool  $I$  ja pinge vooluringi üksikutes osades  $U_1$  ja  $U_2$ . Kogutakistus võrdub üksi-

kute takistuste summaga  $r = 20 + 40 = 60 \Omega$ . Voolu leiame kogupinge 120 V jagamisel kogutakistusega  $60 \Omega$ :

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

Korrutades voolu vooluringi üksikute osade takistusega leiame nendel tekkiva pingelangu:

$$U_1 + 2 \cdot 20 = 40 \text{ V}; \quad U_2 = 2 \cdot 40 = 80 \text{ V.}$$

Nende osapingete summa on võrdne kogupingega 120 V.

Käsitleme veel mõningaid järjestikku ühendatud vooluringi omadusi. Kui muuta järjestikku ühendatud vooluringi ühe osa takistust, siis muutub vool mitte ainult vooluringi selles osas, vaid ka kõikides ülejäänud osades. Seejuures muutub ilmselt ka pinge vooluringi üksikutes osades. Toimub pinge ümberjaotus vooluringis. Kui vooluringi mõnes osas toimub katkestus, siis on ilmne, et vool katkeb kogu vooluringis.

Seega sõltub kogu vooluringi töö ringi igast osast. Ei ole võimalik muuta vooluringi mõne osa töötamist, avaldamata mõju ringi ülejäänud osade töötamisele.

See järjestikku ühendatud vooluringi omadus on mõnikord tema puuduseks. Kui näiteks ühendada valgustuslambid järjestikku, siis ühe lambi väljalülitamisega kustuvad ka kõik ülejäänud lambid. Peale selle on järjestikku ühendatud vooluringis teatava voolu saamiseks lülituses olevate takistite arvu suurendamise puhul vajalik pinget tõsta, mis ei ole alati võimalik.

## 11. Ohmi seadus kogu vooluringile

Igal vooluallikal enesel on alati teatud omataktus. Seda nimetatakse *sisetakistuseks* ja tähistatakse tähega  $r_s$ . Liikudes generaatoris kohtavad elektronid takistust, nagu igas voolujuhtmeski (joon. 10). Suurus  $r_s$  on erisuguste vooluallikate puhul väga erinev ja võib ulatuda oomi osadest kuni tuhandete ja isegi miljonite oomideni. Võimsamate, tugevamat voolu anda suutvate vooluallikate sisetakistus  $r_s$  on tavaliselt väike, kuna vähevõimsate generaatorite  $r_s$  on suurem. Näiteks on akumulaatorite  $r_s$  oomi sajandike piires. Kuivelementide  $r_s$  suurus võib olla oomi kümnendikest kuni mitme oomini, suure arvu järjestikku lülitatud elementidega kuivpatarei  $r_s$  ulatub kümnete

ja isegi sadade oomideni. Vastavalt tühjenemisele suureneb elementide ja akumulaatorite sisetakistus.

Kui generaatori sisetakistus võrreldes välisvooluringi takistusega on väike, siis teda arvesse ei võeta, kuid see ei ole kaugeltki alati lubatav.

Kogu suletud vooluringi kogutakistus, mis teatavasti alati koosneb järjestikku ühendatud vooluallikast ja vooluringi välisosast, võrdub välis- ja sisetakistuse summaga:

$$r = r_v + r_s$$

See kogutakistuse suurus nimelt määrabki vooluringis esineva voolu. Voolu läbimisel generaatori sisetakistusest tekib generaatoris, nagu igas takistuses, pingelang  $U_s$ , mida on võimalik arvutada, korrutades voolu takistusega:

$U_s = I \cdot r_s$ . Teisiti väljendades, osa vooluallika elektromotoorsest jõust kulub vooluallika enese sisetakistuse ületamiseks.

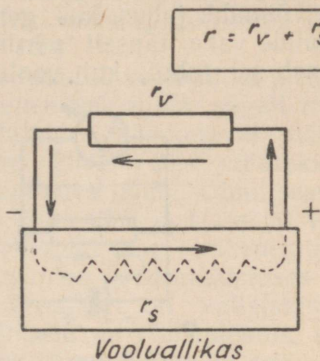
Generaatori sisetakistusel  $r_s$  tekkiv pingelang  $U_s$  on pingekadu. Välisvooluringi pinge  $U$  on vooluallika elektromotoorsest jõust  $E$  alati madalam sisemise pingelangu võrra. Järelikult võib kirjutada:

$$U = E - U_s \quad \text{ehk} \quad U = E - I \cdot r_s$$

Teisiti väljendatult, generaatori elektromotoorne jõud on pingelangude summa takistustes  $r_v$  ja  $r_s$ , s. o.  $E = U + U_s$ .

Välisvooluringi pinge  $U$  ei ole midagi muud kui pinge generaatori klemmidel, kuna välisvooluringi otsad on ühendatud generaatori klemmidega. Kui generaatori klemmidega ühendada voltmeeter, siis see näitab just seda pinget (joon. 11 a), mitte aga pingelangu generaatoris. Viimast pole üldse võimalik mõõta voltmeetri abil.

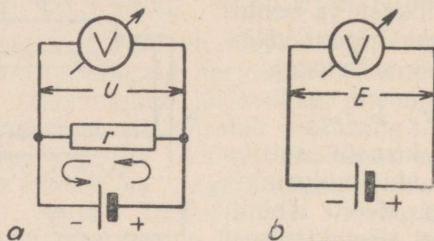
Nagu nähtub, on elektromotoorse jõu mõiste ja pinge mõiste vahel mõnesugune erinevus. Elektromotoorne jõud toimib kogu suletud vooluringis, pinge aga on ainult vooluringi mingisuguse osa potentsiaalide vahes, näiteks vooluringi välisosas. Seetõttu on pinge elektromotoorsest jõust



Joon. 10. Vooluallika sisetakistus.

alati väiksem; ta moodustab ainult elektromotoorse jõu mingisuguse osa.

Kui generaatori sisetakistus on väike, siis on pingelang temas samuti väike, ja ligikaudu võib lugeda, et generaatori klemmpinge võrdub tema elektromotoorse jõuga:  $E = U$ . On võimalik juhul, kus generaatori klemmidel on potentsiaalide vahe täpselt võrdne elektromotoorse jõuga. See esineb sel juhul, kui vooluring on lahtine. Siis on vool



Joon. 11. Pinge mõõtmine vooluallika klemmidel (a) ja elektromotoorse jõu mõõtmine (b).

võrdne nulliga ja seetõttu ei teki generaatoris pingelangu ( $U_s = 0$ ). Järelikult võib elektromotoorset jõudu määratleda kui koormuseta generaatori klemmidel valitsevat potentsiaalide vahet. Vooluallika elektromotoorse jõu mõõtmiseks tuleb tema poolustega ühendada voltmeeter ja välisvooluring lahutada (joon. 11 b).

Suletud vooluringi voolu leidmiseks tuleb elektromotoorne jõud jagada vooluringi kogutakistusega, s. o. välis- ja sisetakistuse summaga:

$$I = \frac{E}{r_v + r_s} \quad \text{ehk} \quad I = \frac{E}{r}.$$

Seda vastastikust suhet nimetatakse tavaliselt Ohmi seaduseks kogu vooluringile. Käsitleme järgmist ülesannet selle seaduse rakendamise näitena. On olemas vooluallikas, mille elektromotoorne jõud on 60 V ja sisetakistus  $r_s = 100\Omega$ . Selle vooluallikaga on ühendatud takisti  $r_v = 500\Omega$ . Leida vooluringi läbiv vool, vooluallika klemmpinge ja pingelang sisetakistusel. Selle ülesande lahendamine ei ole raske. Vooluringi kogutakistus  $r = r_v + r_s = 100 + 500 = 600\Omega$ . Voolu leiame, jagades elektromotoorse jõu vooluringi kogutakistusega. Voolu saame 0,1 A, s. o.  $I = 60 : 600 = 0,1$  A.

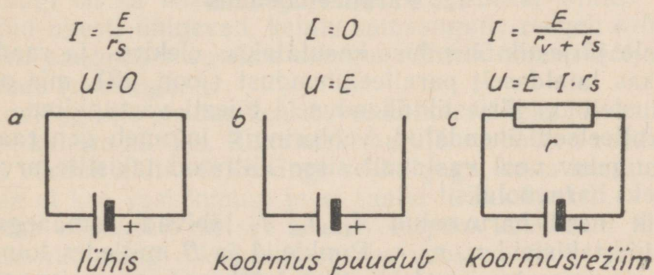
Rakendades Ohmi seadust välistakistusele, s. o. korrutades voolu välistakistusega, leiame, et vooluallika klemmipinge on 50 V, s. o.  $U = I \cdot r_v = 0,1 \cdot 500 = 50$  V. Siit juba on ilmne, et pingekadu vooluallikas eneses moodustab 10 V. Seda suurust võib samuti leida rakendades Ohmi seadust sisetakistusele. Korrutades voolu  $r_s$ -ga saame 10 V, s. o.  $U_s = I \cdot r_s = 0,1 \cdot 100 = 10$  V.

Huvitav on selgitada, kuidas muutub vooluallika klemmipinge  $U$  välistakistuse  $r_v$  vähenemisel, mida sageli nimetatakse koormustakistuseks. Jätkates käsitletavat näidet, eeldame, et  $r_v$  vähenes kuni 200 $\Omega$ . Siis üldtakistus  $r = 300\Omega$ . Vool on 0,2 A. Rakendades jällegi Ohmi seadust välistakistuse suhtes leiame, et  $U = 40$  V ja  $U_s = 20$  V.

Nagu nähtub, kaasneb välistakistuse vähenemisega generaatori klemmipinge vähenemine ja sisetakistuses tekkiva pingekao suurenemine. Järelikult on välistakistuse vähenemine kahjulik. Mida väiksem on välistakistus, seda madalam on vooluallika kasulik klemmipinge ja seda suurem on generaatori sisetakistuses tekkiv pingekadu.

Käsitleme nüüd juhtu, kus välistakistus on vähendatud kuni nullini, näiteks on generaatori poolused ühendatud juhtmega, millel on väga väike takistus. Seda juhtu nimetatakse lühiseks (joon. 12 a). Lühise puhul tekib tugevaim vool, kuna vooluringi jääb ainult sisetakistus; seda voolu on võimalik arvutada E jagamisel sisetakistusega. Generaatori kasulik klemmipinge muutub nulliks ja kogu elektromotoorse jõu lang toimub sisetakistusel.

On ilmne, et lühise juhus on generaatori töötamisel täiesti kasutu. Kasulik koormustakistus puudub ja kogu generaatori energia läheb tema sisetakistusel kaduma. Lühise režiim on mitte ainult kasutu, vaid ka väga ohtlik



Joon. 12. Vooluallika kasutamise erisugused režiimid.

paljudele generaatoritele, kuna selle režiimiga töötamisel võib vool muutuda antud generaatorile lubamatuks. See käib eriti väikese sisetakistusega generaatorite (näiteks akumulaatorite) kohta, milledes lühise puhul tekib väga tugev vool.

Lühise juhule vastupidine on ülalkäsitletud väljalülitatud välisvooluringi juhus, kui vooluringis vool puudub, s. o. kui generaator töötab *tühjalt* ehk *koormuseta* (joon. 12 b). Sellel režiimil on generaatori klemmipinge suurim ja võrdub generaatori elektromotoorse jõuga. Suurima kasuliku pinge saamise seisukohalt on see juhus kõige soodsam. Kui välis- takistus on sisetakistusest mitu korda suurem, siis generaatori sees kaduma läinud pinge on väike ja generaatori klemmipinge lähedane elektromotoorsele jõule. Nimelt niisugune generaatori koormuse režiim on peaaegu alati kõige soovitatavam.

Pingekadu tekib mitte ainult sisetakistuses, vaid ka ühendusjuhtmetes. Paljudel juhtudel jäetakse see kadu tähele panemata, kuna ühendusjuhtmete takistus on tavaliselt väike. Kui need juhtmed on küllalt pikad või kui vool on tugev, siis võib pingelang juhtmetes olla õige tunduv ja kasulik pinge koormustakistusel väheneb. Selle näiteks on pingelang elektrivõrgus öhtutundidel. Päeval ja hilisööl, millal elektrienergia tarbimine on võrdlemisi väike, on pingelang võrgujuhtmetes tähtsusetu ja seetõttu on elektrilampidesse või võrkvastuvõtjate toiteks kasutatav pinge normaalne, näiteks 127-voldine. Öhtul voolutarbimine tõuseb järsult, pingelang juhtmetes suureneb, kasulik pinge lampides langeb ja lambid põlevad tuhmimalt.

## 12. Paralleelühendus

Peale järjestik-ühenduse kasutatakse elektro- ja raadio- tehnikas laialdaselt paralleelühendust (joon. 13), mis oma omadustelt on järjestik-ühendusele täiesti vastupidine.

Paralleelselt ühendatud vooluringis jaguneb generaatorist suunduv vool vastavalt sisse lülitatud takistite arvule mitmeks haruvooluks.

Kõik need haruvoolud  $I_1, I_2, I_3$  läbivad samaaegselt üksikuid takisteid  $r_1, r_2, r_3$ . Punkte  $A$  ja  $B$ , milledes toimub voolu jagunemine osadeks, nimetatakse *hargnemispunkti- deks*. Voolu jagunemist ennast nimetatakse tavaliselt *harg-*

nemiseks ja paralleelselt lülitatud üksikuid takisteid nimetatakse sageli *harudeks*.

Erinevalt järjestikühendusest, millele on iseloomustav ühesugune vool vooluringi kõigis osades, on *paralleelühenduse puhul kõigile takistitele rakendatud pinge alati võrdne*.

Iga takisti on ühendatud generaatori klemmidega. Kui ühendusjuhtmete takistust mitte arvesse võtta, siis tuleb eeldada, et generaatori pinge on rakendatud paralleelse vooluringi igale harule. Paljud eksivad, arvates, et harude erineva takistuse tõttu on ka nende rakendatav pinge erinev. Tuleb meelles pidada, et olenematult paralleelselt lülitatud takistite suurusest on nende pinge alati ühesugune.

Paralleelühenduse puhul toimub voolu hargnemine järgmise seaduse kohaselt.

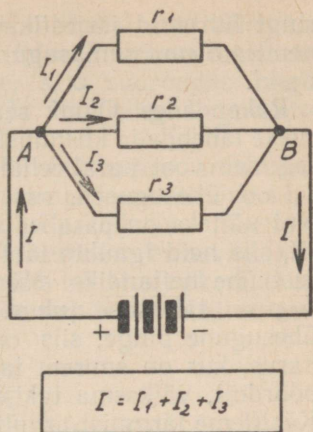
*Hargnemispunktidest väljuvate voolude summa, s. o. haruvoolude summa, võrdub generaatorist hargnemispunkti läbiva koguvooluga ehk*

$$I = I_1 + I_2 + I_3.$$

Hargnemispunktis ei saa osa elektrone kaotsi minna, seal ei saa ka elektrone juurde tekkida. Seetõttu on ühe sekundi vältel kõigi harude ristlõiget läbivate elektronide koguhulk samasugune, nagu hargnemispunkti külgevas juhtmeski. Muidugi on ka teise hargnemispunkti kohta, milles kõik voolud uuesti ühinevad, kehtiv samasugune reegel: *sellesse punkti suubuvate voolude summa võrdub temast väljuvate voolude summaga*.

Analoogiline seadus kehtib vee kohta, näiteks jõe hargnemisel kaheks haruks. Kummaski harujões voolava vee koguhulk võrdub alati peajõesäangi veehulgaga, kuna hargnemiskohas ei kao vesi kuhugi ja ei saabu lisaks kuskilt.

Oma olemuselt on see seadus eespool käsitletud järjestikuse vooluringi üksikutes osades voolava voolu püsivuse seaduse järelduks. Kuigi üksikud harud on omavahel ühendatud paralleelselt, on nad kõik koos võetuna voolu-



Joon. 13. Takistite paralleelühendus.

ringi lülitatud järjestikku. Seetõttu peab summaarne vool nendes olema samasugune nagu vooluringi ülejäänud osadeski.

Rakendades Ohmi seadust üksikutele harudele ei ole raske lahendada küsimust selle kohta, missugusteks osadeks jaguneb vool paralleelühenduse puhul. Kui lülitatud takistid on ühesugused, siis jaguneb vool võrdseteks osadeks. Kui näiteks on paralleelselt lülitatud neli ühesugust takistit, siis neid igaühte läbib vool, mis moodustab koguvoolust ühe neljandiku. Mõnevõrra keerukam on harude erisuguse takistuse juhul. Kuna harudele on rakendatud ühesugune pinge, siis on vool nendes erisugune. Selles harus, kus on suurem takistus, on vool nõrgem ja ümberpöörduvalt, väiksema takistusega haru läbib tugevam vool. Käsitleme järgmist arvulist näidet. Eeldame, et kaks lampi, millede takistused on  $r_1 = 300\Omega$  ja  $r_2 = 600\Omega$ , on ühendatud paralleelselt ja lülitatud võrku pingega  $U = 120$  V. Leiame iga lampi läbiva voolu ja koguvoolu. Ilmselt on vool esimeses lambis:  $I_1 = 120 : 300 = 0,4$  A. Teist lampi läbiv vool  $I_2 = 120 : 600 = 0,2$  A. Üldvool võrdub haruvoolude summaga ja moodustab:

$$I = I_1 + I_2 = 0,4 + 0,2 = 0,6 \text{ A.}$$

Käsitleme nüüd paralleelselt ühendatud vooluringi takistust. Erinevalt järjestikusest vooluringist, milles lisatarbijate sisselülitamisel takistus suureneb, paralleelühenduse puhul sel juhul kogutakistus väheneb.

Olgu vooluringi lülitatud ainult üks takisti, mida läbib teatud vool. Veel samasuguse takisti paralleelselt juurdelülitamine on üheväärne juhtme ristlõikepinna kahekordse suurendamisega, järelikult väheneb vooluringi takistus kaks korda. Kolmanda sama suurusega takistuse paralleelselt juurdelülitamisel suureneb ristlõike kolmekordselt ja vooluringi üldtakistus väheneb kolm korda. Mida rohkem takisteid paralleelselt lülitatakse, seda rohkem teid on voolule ja seda väiksem on vooluringi üldtakistus.

*Seega ühesuuruste takistite paralleelsel ühendamisel väheneb üldine takistus niipalju kordi, kui palju on lülitatud harusid.*

Kui näiteks on paralleelselt ühendatud kolm takistust  $\acute{a}$  60 oomi, siis kogutakistus on 20 oomi.

Erisuguste suurustega takistite paralleelsel lülitamisel väheneb samuti kogutakistus ja on väikseimast lülitatud takistusest alati väiksem. Sellest reeglist ei ole raske aru

saada. Kui alguses on vooluringi lülitatud üks väiksem takistus, siis sellega rööbiti mingi teise suurema takistuse ühendamine tekitab voolule lisatee, s. o. suurendab nagu mõnevõrra juhtme ristlõikepinda, ja vooluringi kogutakistus muidugi väheneb.

Vooluringi kogutakistuse arvutamine suure arvu erisuguste takistuste paralleelsel ühendamisel on küllaltki keerukas. Praktikas on kõige sagedamini paralleelselt ühendatud ainult kaks takistit. Kui nad suuruselt erinevad, siis kogutakistuse  $r$  määramiseks tuleb üks takistus  $r_1$  korrutada teisega  $r_2$  ja saadud korrutis jagada nende takistuste summaga:

$$r = \frac{r_1 \cdot r_2}{r_1 + r_2}.$$

Näiteks, kui paralleelselt on ühendatud takistid  $r_1 = 20\Omega$  ja  $r_2 = 30\Omega$ , siis niisuguse hargnenud vooluringi kogutakistus arvutatakse järgmisel viisil:

$$r = \frac{20 \cdot 30}{20 + 30} = \frac{600}{50} = 12\Omega.$$

Nagu nähtub, on kogutakistus  $r$  väiksem, kui väiksem lülitatud takistitest, s. o. väiksem kui  $20\Omega$ .

Paralleelühenduses on peateguriks alati väiksem vooluringi lülitatud takistus, kuna teda läbib koguvoolu suurem osa.

Mõnikord võib olla paralleelselt ühendatud kaks väga erineva suurusega takistit. Sel puhul hargneb suuremasse takistusesse tähtsusetu osa voolust ja ta peaaegu ei mõjuta üldtakistuse suurust. Kirjeldatud juhul väheneb kogutakistus väga vähe võrreldes väiksema takistusega.

Lisatakistuse paralleelset lülitamist nimetatakse mõnikord *šuntimiseks*. Järelikult, kui takistit šuntida teise, tunduvalt suurema takistiga, siis võib kogutakistust pidada peaaegu mitte muutunuks.

Seda selgitab näitlikult järgmine arvutus. Leiame kogutakistuse, kui paralleelselt on ühendatud takistid  $100\Omega$  ja  $10\,000\Omega$ .

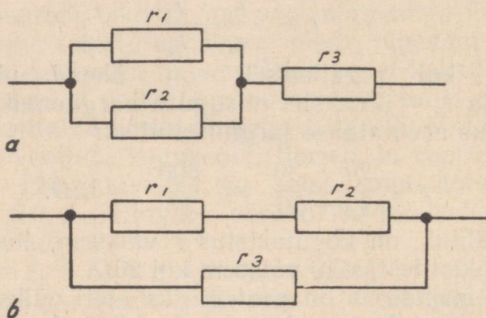
$$r = \frac{100 \cdot 10\,000}{100 + 10\,000} = 99\Omega.$$

Nagu näha, on kogutakistus peaaegu  $100\Omega$ .

Paralleelselt takistuste ühendamise väärtus seisab selles, et iga haru töötab sõltumatult teistest harudest.

Paralleelühenduse puhul on võimalik ühte haru välja lülitada, kusjuures ülejäänud harud jäävad töötama endiselt. Kui mõne haru takistust muuta, siis selles vool muutub, kuid ülejäänud harudes muutust ei ilmne. Seetõttu lülitatakse elektrivõrgu mitmesugused tarbijad, s. o. hõõglambid, elektrilised soojendusseadised, elektrimootorid jne., peaaegu alati paralleelselt.

Praktikas täheldatakse ikkagi mõnikord ühe haru mõju teisele harule generaatori sisetakistuse ja ühendusjuhtmete takistuse tõttu. Kui näiteks üks haru välja lülitada, siis vooluringi üldtakistus tõuseb ja kogu vool nõrgeneb mõnevõrra. Kuid ühtlasi väheneb pingekadu generaatori sise-



Joon. 14. Takistite segaühendus.

takistuse ja generaatorist suunduvates ühendusjuhtmetes ning kasulik pinge hargnemispunktide vahel tõuseb. Seetõttu ülejäänud harudes vool tugevneb.

Analoogiliselt sellele põhjustab lisaharu juurdelülitamine teistes harudes voolu nõrgenemist. Samasugune nähtus esineb ka mõne haru takistuse muutmisel.

Elektrivooluringides esineb samuti kaunis sageli *sega*- ehk *liitühendus*, mis on järjestikuse ja paralleelühenduse kombinatsioon. Kui näiteks võtta kolm takistit, siis on võimalik segaühenduse kaks varianti. Ühel juhul ühendatakse kaks takistit paralleelselt ja kolmas lülitatakse nendega järjestikku (joon. 14 a). Teisiti öeldes, vooluringil on kaks järjestikku lülitatud osa, millest üks on paralleelühendus. Teise skeemi järgi on järjestikku ühendatud kaks takistit ja kolmas takisti on nendega ühendatud paralleelselt (joon. 14 b). Sel juhul tuleb kogu vooluringi käsitleda

nagu paralleelühendust, milles üks haru ise on järjestik-ühenduses.

Suurema arvu takistite puhul võib koostada mitmesuguseid keerukamaid segaühenduse skeeme.

### 13. Elektrivoolu võimsus ja töö

Elektrivool on võimeline tegema tööd, s. o. voolu energia võib muunduda mõne teise energia liigiks, näiteks soojus-, valgus- või mehaaniliseks energiaks. Elektro- ja raadiotehnikas tavaliselt hinnatakse voolu töövõimet tema võimsuse suuruse järgi, mida tähistatakse tähega  $P$ .

*Võimsus on ühe sekundi vältel tehtav töö.* Teisiti võib öelda, et *võimsus on elektrienergia kulu ühe sekundi vältel.*

Elektrilise võimsuse mõõtühikuks on *vatt*, mis lühendatult märgitakse tähega  $W$ .

*Watt on üheamprise voolu võimsus ühevoldise pinge puhul.*

Mida kõrgem on pinge ja mida tugevam vool, seda suurem on võimsus. Seetõttu võimsuse suuruse arvutamiseks tuleb pinge voltides korrutada vooluga amprites. Teisiti öeldes, vatid võrduvad voltide ja amprite korrutisega:

$$P = U \cdot I.$$

Näiteks, kui 120 V pinge puhul läbib takistit 3-amprine vool, siis võimsuse tarbimine selles takistis on 360 W.

Sageli on vaja arvutada elektrivoolu võimsust, kui on teadmata vool või pinge, kuid on teada takistus. Siis tuleb alguses Ohmi seaduse abil takistuse suuruse järgi kindlaks määrata vool või pinge ja seejärel juba arvutada võimsus. Asendades võimsuse põhivalemis voolu või pinge Ohmi valemi järgi, saame võimsuse arvutamiseks veel kaks kasulikku valemit:

$$P = I^2 \cdot r \quad \text{või} \quad P = \frac{U^2}{r}.$$

Neid kahte valemit rakendatakse praktikas väga sageli. Nende mõtet ei ole raske mõista. Kui näiteks vool tugevnes kaks korda, siis on ilmne, et see võis toimuda ainult pinge kahekordseks tõusmise tõttu. Kuid kui pinge tõusis ja ka vool tugevnes kaks korda, siis võimsus suureneb neli korda, s. o. ruudus (teises astmes) võrreldes voolu suurenemisega.

Takistuse suurenemisel on voolu muutumatu tugevuse alalhoidmiseks vajalik pinge vastav tõstmine. Samapalju korda suureneb ka võimsus, kuna sel juhul tõuseb ainult pinge üksi, vool aga jääb püsivaks.

Kui mõnesugusele püsivale takistusele mõjuvat pinget tõsta mitu korda, siis samapalju kordi suureneb ka vool. Tähendab, võimsus suureneb ruutmõõttes, kuna pinge ja vool suurenesid samapalju korda. Kui püsiva pinge korral suurendada takistust, siis vastavalt nõrgeneb vool ja järelikult väheneb ka võimsus. Seetõttu esineb takistus teises valemis murru nimetajana.

Käsitletud kaks võimsuse arvutuse valemit nagu oleks teineteisega vastuolus: ühe valemi järgi takistuse suurenemisel võimsus suureneb, teise järgi aga väheneb. Kuid see vastuolu on ainult näiline, kuna esimene juhust vastab püsivale voolule ja teine püsivale pingele.

Selgituseks toome järgmised näited. Tarvis on leida 1000-oomisel takistil rakendatav võimsus, kui takistit läbib 0,2-amprine vool. Ülesannet on võimalik lahendada kahel viisil.

Leiame pinge Ohmi seaduse järgi.

$$U = 0,2 \cdot 1000 = 200 \text{ V.}$$

Nüüd määrame kindlaks võimsuse.

$$P = 200 \cdot 0,2 = 40 \text{ W.}$$

Sama võib saada valemist

$$P = 0,2^2 \cdot 1000 = 0,2 \cdot 0,2 \cdot 1000 = 40 \text{ W.}$$

Vaatleme veel näidet võimsuse arvutamiseks elektrilambis, mille takistus on 200 oomi ja mida toidetakse 100 V pingega.

Kõige lihtsam on rakendada valemit

$$P = \frac{100^2}{200} = 50 \text{ W.}$$

Kuid võib alguses leida voolu  $I = 100 : 200 = 0,5 \text{ A}$  ja siis juba leida võimsus põhivalemi järgi:

$$P = 100 \cdot 0,5 = 50 \text{ W.}$$

Mõnikord on vajalik teha vastupidine arvutus ja nimelt: teades võimsust, tuleb leida vool või pinge. Olgu näiteks vaja kindlaks määrata vool elektrilambis, mille võimsus on

120-voldise pinge puhul 300 W. Kuna võimsus on pinge ja voolu korrutis, siis on ilmne, et voolu leidmiseks tuleb võimsus jagada pingega:

$$I = P : U = 300 : 120 = 2,5 \text{ A.}$$

Peale võimsuse põhiühiku — vati — kasutatakse sageli veel järgmisi mõõtühikuid: *kilovatti* (kW), *hektovatti* (hW), *millivatti* (mW) ja *mikrovatti* ( $\mu$ W), mis vastavalt võrduvad 1000 W, 100 W, 0,001 W ja 0,000 001 W.

Elektrilist tööd ehk elektrienergia kulu mõõdetakse ühikutega, millede aluseks on võetud võimsuse ühikud ja ühes sellega arvestatakse ka voolu läbimise aega. Võimsus on ühe sekundi vältel tehtav töö, elektrivoolu töö aga võib vastata mistahes ajavahemikule, mille vältel vool mõjus. Mida kauemini vool mõjub, seda suurem on töö hulk.

Elektrilise töö mõõtühikuks on *vatt-sekund* (Ws), s. o. elektrivoolu töö ühe sekundi vältel võimsuse puhul üks vatt. See mõõtühik on liiga väike, kuna tavaliselt toimib vool mitte ühe sekundi vältel, vaid pikema aja jooksul. Suuremaks mõõtühikuks on *vatt-tund* (Wh), mis võrdub elektrivoolu tööga ühe tunni vältel võimsuse puhul üks vatt. Ühes tunnis on 60 minutit á 60 sekundit, s. o. kokku 3600 sek. Seetõttu üks Wh on 3600 Ws.

Eriti laialdast kasutamist on leidnud suuremad mõõtühikud *hektovatt-tund* (hWh) ja *kilovatt-tund* (kWh). Üks hektovatt-tund on 100 Wh, kilovatt-tund aga on hektovatt-tunnist 10 korda suurem ja võrdub 1000 Wh.

Elektervalgustuseks või võrkvastuvõtja toitmiseks kulutatava elektrienergia hulka arvutatakse alati hektovatt-tundides või kilovatt-tundides. Korteritesse ülesseatud elektri-arvestid arvestavad elektrienergia kulu nimelt nendes ühikutes.

Paljud väljendavad elektrienergiat täiesti ebaõieti kilovattides või hektovattides, s. o. võimsuse mõõtühikutes. Iialgi ei tohi selliselt eksida. Töö ja võimsus ei ole üks ja sama. Antud elektrivoolu võimsus mingi aja vältel jääb muutumatuks kui vool, pinge ja takistus jäävad püsivaks. Voolu töö aga tema püsiva võimsuse juures oleneb ajast ja tuleb väljendada kilovatt-tundides või hektovatt-tundides.

Elektrivoolu töö ehk elektrienergia kulu arvutamine on väga lihtne. Selleks tuleb võimsus korrutada ajaga. Olenevalt võimsuse ja aja mõõtühikutest saame selle reegli järgi voolu töö mingites mõõtühikutes.

Toome elektrienergia kulu arvutamise näite. Leiame energia maksumuse, mida raadiovastuvõtja võtab elektrivõrgust ühe kuu vältel, töötades iga päev 4 tundi, kui vastuvõtja poolt tarbitav võimsus on 50 W. Vastuvõtja töötundide arv ühe kuu vältel on  $4 \cdot 30 = 120$  tundi. Elektrienergia kulu on  $50 \cdot 120 = 6000$  Wh = 6 kWh. Kui elektrienergia ühe kilovatt-tunni hinnaks on 40 kop., siis ühe kuu jooksul vastuvõtja poolt tarbitava energia maksumuseks on  $6 \cdot 40$  kop. = 240 kop. = 2 rbl. 40 kop.

Lampvastuvõtjate poolt tarbitav võimsus olenevalt raadiolampide arvust on umbes 50 vatti kuni 100 vatti. Väikese lampide arvuga vastuvõtjad tarbivad võimsust vähem, üle 100 W kulutavad ainult mõned paljulambilised vastuvõtjad ja radioolad.

#### 14. Elektrivoolu soojuslik toime

Iga elektrijuhe soojeneb, kui teda läbib elektrivool.

Elektrijuhtmes liiguvad elektronid hõõrduvad ja põrkuvad juhtmematerjali osakestega (molekulidega) ning sunnivad neid osakesi kiiremini liikuma. Molekulide kiirem liikumine põhjustab temperatuuri tõusu. Mida tugevam on vool ja mida pikema aja vältel vool elektrijuhtmes voolab, seda tugevamini see soojeneb. Elektrivoolu soojusliku toime seadused määras kindlaks vene professor E. H. Lentz juba 1844. a.

Elektrivoolu võimsus oleneb pingest, voolust ja takistusest. Täpselt samuti oleneb nendest suurustest ka voolu poolt tekitatav soojushulk. Eriti on tähtis asjaolu, et antud takisteis tekkiv soojushulk oleneb voolust teises astmes. Kui vool näiteks tugevneb kolm korda, siis juhtmes eraldunud soojushulk suureneb üheksa korda. Elektrijuhtme niisugusel kiirel kuumenemisel võivad olla ebameeldivad tagajärjed: juhtme isolatsiooni läbipõlemine ja isegi juhtme enese sulamine või läbipõlemine.

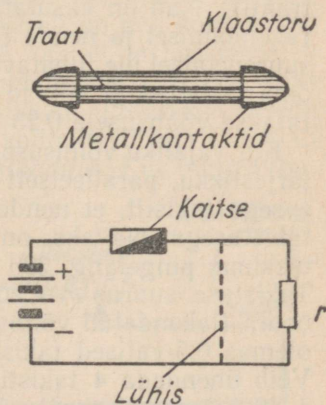
On olemas palju elektrivoolu soojusliku toime praktilisi kasutamismooduseid. Elektrihõõglampides on hõõgniit valguse allikaks, raadiolampides aga kasutatakse hõõgniiti vaakumis lendava elektronvoolu saamiseks. Sulavkaitsmetesse on asetatud traat, mis voolu ohtliku suurenemise puhul läbi sulab. Kaitse valitakse alati selline, et temas olev traat põleks läbi veidi väiksema voolu puhul kui on see vool, mis muutub juhtmete isolatsioonile ohtlikuks.

Voolu lubamatu suurenemine saadakse juhul, kui vooluallikaga ühendatakse liiga väike takistus, s. o. kui tekib vooluallika lühis. Tugev vool on lühise puhul ohtlik mitte ainult juhtmetele, vaid ka vooluallikale enesele. Sulavkaitsmed kaitsevad vooluallikat ja juhtmeid lühise ohtlike tagajärgede eest. Joonisel 15 on kujutatud sulavkaitsme lülitamine. Elektrivoolu soojuslikku toimet kasutatakse samuti elektrisoojendusseadistes (elektripliitides, elektritriikraudades, elektritõlvikutes jne.).

Juhtme soojenemine elektrivoolu toimel oleneb *voolutihedusest*. Voolutiheduse all mõistetakse juhtme ristlõikepinna ühte ruutmillimeetrit läbivat voolu amprites ja seda väljendatakse amprites ühele ruutmillimeetrile ( $A/mm^2$ ). Et juhtmed ei kuumeneks üle, valitakse nad alati sobivad, lähtudes kehtivatest elektrivoolu tiheduse normidest. Mähistes, mis koosnevad isoleertraadi mitmest kihist, ei tohi voolutihedus ületada  $2 A/mm^2$ . Reostaatides, kus üks kiht paljastraati on mähitud soojuskindlale materjalile, näiteks portselanile, võib voolutihedus olla kuni  $5 A/mm^2$ .

Juhtmete arvutamiseks on vaja kindlaks määrata juhtme ristlõige. Seda on võimalik teha, kui 0,8 korrutada juhtme läbimõõdu  $d$  ruuduga. Näiteks saame 0,5 mm läbimõõduga juhtme ristlõikeks  $0,8 \cdot 0,5^2 = 0,8 \cdot 0,25 = 0,2 mm^2$ . Voolutiheduse puhul  $2A/mm^2$  võib sellest juhtmest ilmselt lasta läbi  $0,2 \cdot 2 = 0,4$ -amprist voolu. On kasulik meeles pidada, et juhtme läbimõõdu muutumisel muutuvad ruudus tema ristlõige ja ka lubatav vool. Kui 0,5 mm läbimõõduga juhtme asemel võtta 1 mm jämedune juhe, s. o. kaks korda jämedam, siis selle ristlõige suureneb 4 korda. Voolutiheduse puhul  $2 A/mm^2$  suureneb lubatav vool 4 korda ja on 1,6 A. Tabelis 1 on toodud mitmesuguse läbimõõduga juhtmetele lubatavad voolud.

Tuleb märkida, et peaaegu kõigi metallist elektrijuhtide takistus soojenemisel suureneb. Soojenenud elektrijuht toimub



Joon. 15. Sulavkaitsme ehitus ja selle lülitamine kaitseks lühise vastu.

molekulide liikumine kiiremini ja nad raskendavad elektronide liikumist.

Soojenemisel muudavad väga vähe oma takistust täpistakistite valmistamiseks kasutatavad takistussulamid (konstantaan, manganiin jt.). Vaskjuhtme takistus suureneb soojenemisel 250°C kaks korda. Volframtraadi takistus hõõglambis on normaalsel hõõgumisel umbes 10 korda suurem kui külmas seisukorras. Seda tuleb arvesse võtta hõõglampide kasutamisel takistitena. Erinevalt metallidest väheneb söe takistus temperatuuri tõusul.

## 15. Takistid, reostaadid ja potentsiomeetrid

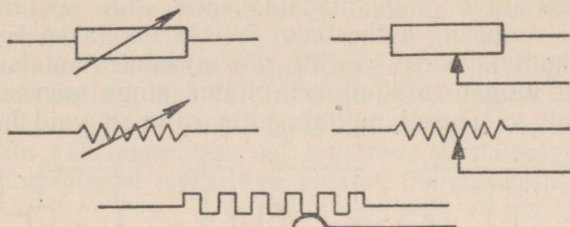
Traattakisteid kasutatakse siis, kui on tarvis püsivat takistuste suurust või kui vool on vooluringis liiga tugev. Väiksema suurusega takisti valmistamisel mähitakse see sageli isoleerimata traadist ja kui takistus peab olema sadade, tuhandete või kümnete tuhandete oomide piirides, siis tavaliselt valmistatakse ta isoleeritud traadist.

Masstakistites on elektrijuhiks söe- või metallikiht, mis on kantud portselan- või mõnest teisest isoleermaterjalist alusele. Nende takistite suurus ulatub kümnetest oomidest kuni kümnete megaoomideni. Nende paremuseks on väikesed mõõted ja odavus (suurema takistusega traattakisti valmistamiseks läheks tarvis hiigelhulk kallist takistustraati). Nad on kasutatavad võrdlemisi väikese võimsuse rakendamisel ja nende takistuse suurus ei ole püsiv. Voolu suurenemisel üle lubatava muudavad masstakistid tugevasti oma takistust ja võivad läbi põleda. Masstakisteid valmistatakse võimsusele 0,25 W, 0,5 W, 1 W ja suuremaid.

Kui vajaliku võimsusega takisti puudub, siis ühendatakse järjestikku, paralleelselt või segalülituses mitu sellise suurusega takistit, et nende üldtakistus oleks võrdne soovitud takistusega. Näiteks on tarvis leida takisti, millel peab tekkima pingelang 200 V 10 mA ehk 0,01 A voolu puhul. Takistuse suurus  $r = 200 : 0,01 = 20\,000$  oomi = 20 kiloomi. Rakendatud võimsus on  $200 \cdot 0,01 = 2$  W. Kui on olemas 0,5-vatiseid takistid, siis tuleb võtta neid 4 tükki. Võib ühendada 4 takistit à 5 k $\Omega$  järjestikku või 4 takistit à 80 k $\Omega$  paralleelselt või lõpuks 4 takistit à 20 k $\Omega$  segalülitusviisil, s. o. paralleelselt kaks gruppi à kaks takistit järjestikku kummaski grupis. Kõigil neil juhtudel on üld-

takistus võrdne 20 k $\Omega$ , lubatav rakendatav võimsus moodustab aga 2 W.

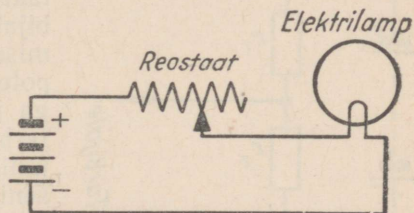
Raadiolülitustes leiavad laialdast kasutamist muudetavad takistid. Muudetavad traattakistid valmistatakse paljastraadist. Takisti hõõgutatakse eelnevalt ja seetõttu tekib tema pinnale oksüüdikiht, mis on iso'atsiooniks väikeste pingete puhul ja võimaldab mähkida traati keerd keeru kõrvale.



Joon. 16. Muudetavate takistite tähistamine skeemidel.

Mähise pinda mööda libiseb kontaktvedru, mis lülitab takistust vooluringi suuremal või väiksemal määral. Mõnel juhul liigub kontaktvedru mööda vedruplaadikest ja surub selle vastu traati ühes või teises kohas. Selline konstruktsioon väldib peene traadi katkihõõrumist ja kui on tegemist masstakistiga, siis voolu juhtiv pind ei metalliseeru kontaktvedru toimel.

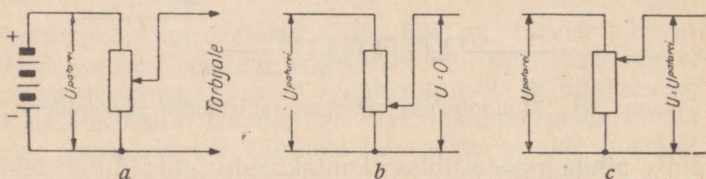
Muudetavaid takisteid kujutatakse skeemidel selliselt, nagu on näidatud joonisel 16. Tavaliselt on neil kolm väljavõtet: äärmised on toodud takisti otstelt ja keskmine — kontaktvedrult. On võimalik muudetavate takistite kaks kasutamismoodust. Kui muudetav takisti lülitatakse skeemi järjestikku, s. o. kahe punktiga — kontaktvedruga ja takisii ühe otsaga, siis töötab takisti *reostaadina*. Kui mingisüüses seadises, näiteks elektrilambis, on vaja reguleerida voolu või pinget, siis lülitatakse lambiga järjestikku reostaat (joon. 17). Siis jääb elektrilambile ainult osa pingest. Reostaadi kontaktvedru nihutamiseega muudetakse reostaadi



Joon. 17. Reostaadi lülitamine pingereguleerimiseks.

takistust ja järelikult ka kogu vooluringi takistust. Vool muutub ja ühes sellega muutub ka pingelang nii reostaadis kui ka elektrilambis. Teisiti öeldes, toimub pinge ümberjaotus vooluringis. Mida suurem on reostaadi takistus, seda suurem on temal pingelang ja seda väiksem on pingelang elektrilambis.

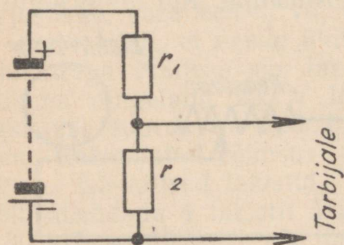
Kõrgeima pinge saab tarbija, kui reostaadi takistus vähe-  
neb nullini. Siis rakendatakse kogu pinge tarbijale. Tarbi-  
jale rakendatava pinge madaldamiseks kuni nullini tuleb  
reostaadi vooluring katkestada. Selleks lükatakse äärmises  
asendis kontaktvedru traadilt või söekihilt isolatsioonile.  
Seejuures langeb tarbijale rakendatud pinge mõnesuguselt  
väiksemalt väärtuselt nullini mitte sujuvalt vaid hüppeli-



Joon. 18. Potentsiomeetri lülitamine pinge reguleerimiseks.

selt. Neil juhtudel, kui tarbija takistus on väga suur, näi-  
teks mitu megaoomi, peab pinge reguleerimiseks laiades  
piirides reostaadi takistus ulatuma kümnete ja sadade  
megaoomideni, mida praktiliselt on raske täita.

Sageli on pinget hõlpsam reguleerida nn. *potentsiomeet-  
riga*, ehk *sujuva reguleerimisega pingejagajaga*. See on  
samasugune muudetav takisti nagu reostaatki, kuid on  
lülitatud kolme punktiga. Potentsiomeetri takistuse otsad  
lülitatakse sellele pingele, mida on tarvis reguleerida, näi-



Joon. 19. Pingejagaja lülitus.

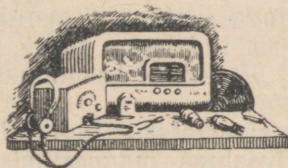
teks vooluallika klemmidele  
(joon. 18 a). Kontaktvedru ja  
takisti üks ots lülitatakse tar-  
bijale. Kontaktvedru nihuta-  
misega ühendatakse tarbija  
potentsiomeetri mistahes osa-  
ga ja sel viisil reguleeritakse  
tarbijale rakendatud pinget  
nullist kuni suurima väärtu-  
seni sujuvalt, nagu on kujut-  
atud joonisel 18 b ja c.

Peale potentsiomeetrite ka-

sutatakse pingejagajaid, mis koosnevad kahest või suuremast arvust järjestikku ja täispingele lülitatud takistist. Tarbija ühendatakse paralleelselt ühe takistiga (joon. 19) ja sellel saadakse pinge, mis moodustab täispingest teatava osa.

Mitmest takistist koosneva pingejagajaga võib ühendada mitu tarbijat, mis normaalseks töötamiseks vajavad erisuguseid pingeid. Pingejagaja vähendab või jaotab pinget samuti nagu potentsiomeetergi, kuid ei võimalda pinge reguleerimist.

Potentsiomeetri või pingejagaja takistust läbib alati vool, olenemata sellest, kas tarbija on sisse lülitatud või mitte. See vool soojendab pingejagajat ja on kasutu vool. Selle voolukulu vähendamiseks on soovitatav, et pingejagaja või potentsiomeeter ei oleks liiga väikese takistusega.





### III PEATÜKK.

## ELEKTROMAGNETILISED NÄHTUSED

### 16. Püsivmagnetid ja nende omadused

Juba ammu tehti kindlaks, et mõnel rauamaagi liigil on omadus terasesemeid külge tõmmata. Seda nähtust nimetati *magnetismiks*, magnetiliste omadustega varustatud rauamaagi tükke aga *magnetiteks*. Kui sellise *loodusliku* magnetiga hõõruda karastatud terase tükki, siis viimane muutub ise magnetiks. Praktikas kasutatakse nimelt terasest ehk *kunstlikke magneteid*.

Käesoleval ajal valmistatakse tugevad magnetid karastatud terase elektrivooluga magneetimisel, millest räägitakse edaspidi.

*Ferromagnetilisteks* nimetatakse aineid, mis tõmbuvad magneti külge. Nende hulka kuuluvad teras, nikkel, samuti ka paljud sulamid. Karastatud teras hoiab kaua alal oma magnetilisi omadusi ja võib seetõttu olla *püsivmagnetiks*. Pehmeteras (raud) kaotab pärast magneetimise lõpetamist peaaegu täielikult magnetilised omadused ja temal jääb järele ainult vähesel määral *jääkmagnetismi*.

Käsitleme püsivmagnetite põhiomadusi. Iga magnet tõmbab ferromagnetilisi esemeid külge kõige tugevamini oma otstega, milliseid nimetatakse poolusteks. Lõnga otsa riputatud või vertikaaltelejele kinnitatud magnet püüab ühe oma poolusega alati pöörduda põhja suunas. Seda magneti-poolust nimetatakse *põhjapooluseks* ja märgitakse suure tähega *N*. Teist poolust nimetatakse *lõunapooluseks* ja teda märgitakse tähega *S*.

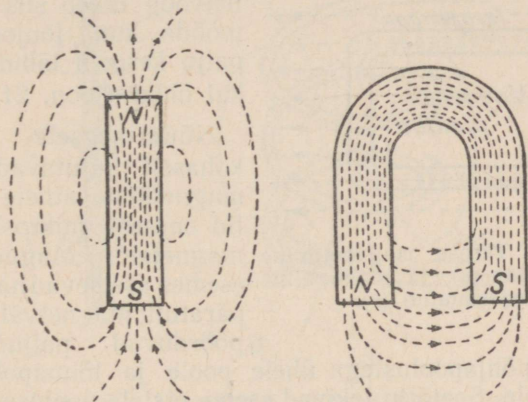
Magnetipoolused mõjutavad vastastikku teineteist analoogiliselt elektrilaengutega.

*Samanimelised poolused, s. o. N ja N ning S ja S, tõu-*

kavad teineteist eemale, isenimelised, s. o. N ja S, tõmbavad teineteist ligi.

Magneti põhjapoolus ja lõunapoolus tekivad alati samaaegselt iga magneti otstel. Ühte magnetipoolust eraldi saada on võimatu.

Magnetit ümbritsevat ruumi, milles mõjuvad magnetilised jõud, nimetatakse magnetväljaks. Katsete põhjal võib veenduda, et magnet tõmbab ferromagnetilisi esemeid ligi mitte ainult õhu kaudu, vaid ka paljude teiste ainete, näiteks klaasi, papi, vase, vee jne. kaudu, samuti ka õhuta

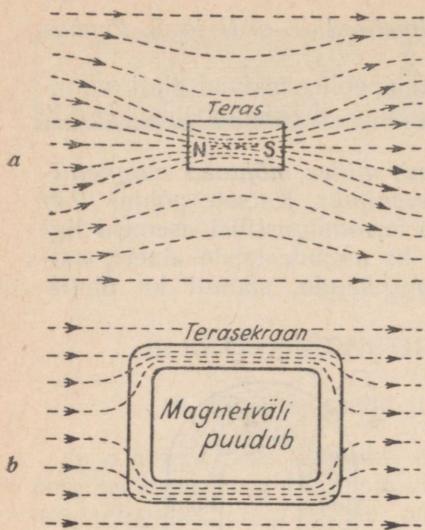


Joon. 20. Varrasmagneti ja lookmagneti magnetväli.

ruumi kaudu. Seega tekib igas aines magneti ümber magnetväli. Vastavalt magnetist eemaldumisele muutub magnetväli järk-järgult nõrgemaks.

Magnetilised jõud mõjuvad magnetväljas kindlates suundades, mida nimetatakse magnetjõujoonteks. Kokkuleppeliselt loetakse, et väljaspool magnetit esinevad magnetjõujooned suunduvad põhjapoolusest (N) lõunapoolusesse (S). Nad on suletud jooned ning jätkuvad magneti sees. Joonisel 20 on kujutatud varasmagneti ja lookmagneti magnetvälja jõujooned. Kõik antud magneti jõujooned moodustavad tema magnetvoo.

Kui magnetvälja asetada mingi terasest või mõnest teisest ferromagnetilisest ainesest ese, siis see magneetub magnetvälja mõjul. Seejuures magnetvälja jõujooned nagu tungiksid sellest esemest läbi (joon. 21 a). Teras nagu



Joon. 21. Teras magnetimine magnetväljas (a) ja magnetiline varjestamine (b).

tõmbaks enesesse magnetjõujooni ja võib seetõttu olla kaitseks magnetvälja mõju vastu, s. o. võib olla magnetiliseks ekraaniks. Kui mingisugust seadist on vaja kaitsta magnetvälja eest, siis tuleb ta igalt poolt ümbritseda pehmeterasest ekraaniga. Magnetvoog läheb siis ekraani mööda, kuna jõujoontel on palju kergem läbida terast kui õhku (joon. 21 b).

Nüüdisaegsete vaadete kohaselt kujutavad ferromagnetiliste ainete molekulid enesest mikroskoopilisi magneteid. Magnetimata esemes asetsevad nad korrapäraselt, magnetvälja mõjul pöörduvad paljud neist

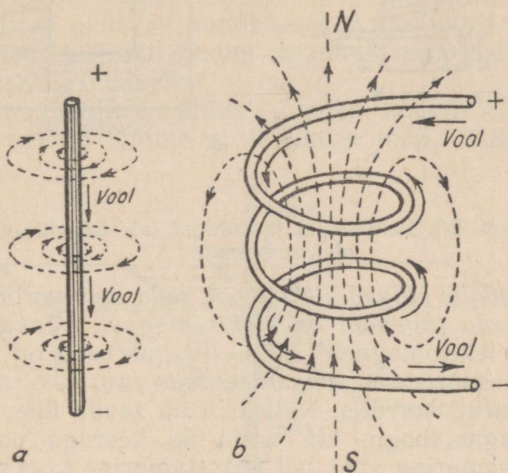
aga oma põhjapoolustega ühele poole ja lõunapoolustega teisele poole. Seetõttu tekivad eseme otstele poolused. Molekulaarmagnetid jäävad karastatud terases sellisesse asendisse ka pärast magnetiva välja mõju lõppemist, pehmeterases (rauas) aga võtavad nad peaaegu kõik uuesti endise korrapärasu asendi ja magnetism kaob peaaegu täielikult.

Püsivmagnetid kaotavad magnetismi löökide ja põrutuste mõjul, samuti ka kuumutamisel, kuna seeläbi rikutakse elementaarmagnetite asetuse korrapärasus.

Igat ferromagnetilist ainet võib magnetida ainult kuni mõnesuguse piirini, mida nimetatakse magnetiliseks küllastumiseks, mille järel magnetvälja edasine tugevnemine ei põhjusta magnetismi märgatavat suurenemist. See tähendab, et kõik molekulaarmagnetid on juba ümber pöördunud ja asetunud ranges korras piki magnetvälja jõujooni. Nõrgemal magnetimisel jääb osa neid magneteid korrapärasusse olukorda. Väga tugevate püsivmagnetite valmistamiseks kasutatakse viimasel ajal sulamite erimarke, mis sisaldavad raua kõrval teiste metallide lisandeid, näiteks alumiiniumi, niklit ja teisi.

## 17. Elektromagnetid ja nende kasutamine

Juba möödunud sajandil tehti kindlaks, et elektri voolamisel juhtmes tekib juhtme ümber magnetväli, kusjuures selle jõujooned on ringikujulised ja ümbritsevad juhet (joon. 22 a). Mida tugevam on vool, seda tugevam on juhet ümbritsev magnetväli.

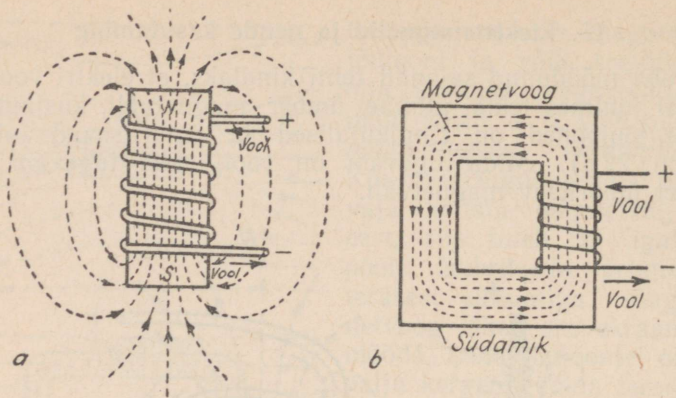


Joon. 22. Magnetväli vooluga juhtme (a) ja pooli (b) ümber.

Elektrivoolu abil tugevama magnetvälja saamiseks kasutatakse traadist keritud pooli. Siis pooli üksikute keerdude magnetväljad valguvad justkui kokku ja nende jõujooned nagu liituvad üheks ühiseks magnetvooks. Pooli magnetväli meenutab püsivmagneti magnetvälja. Pooli otsal, kus vool liigub kellaosuti suunas, saadakse lõunapoolus, teises otsas aga — põhjapoolus (joon. 22 b). Voolusuuna muutmiselega võib muuta magnetvoo suunda ja siis magnetpoolused pooli otstel vahetavad kohta.

Pooli magnetvoog tugevneb mitu korda, kui pooli sisse asetada terassüdamik. See on tingitud sellest, et magnetvälja mõjul teras magneetub ja tekitab lisa-magnetvoo, kogu magnetväli on tugevam kui pooli enda magnetväli (joon. 23 a).

Pooli terassüdamikuga nimetatakse elektromagnetiks. Mida suurem on elektromagneti pooli keerdude arv ja mida



Joon. 23. Lahtise (a) ja suletud (b) südamikuga elektromagnetid.

tugevam poolis kulgev elektrivool, seda suurem on magnetvoog ja seda tugevam on elektromagnet. Tavaliselt öeldakse, et elektromagnetis mõjuv magnetvoog on seda suurem, mida suurem on amperkeerude arv, s. o. amprite ja keerude arvu korrutis. Näiteks võib saada ühe- ja samasugust magnetvoogu, kui võtta 50 keeruga pool, milles voolab 10-amprine vool või kui 1-amprine vool lasta läbi 500 keeruga pooli. Mõlemal juhul on elektromagnet 500 amperkeerune.

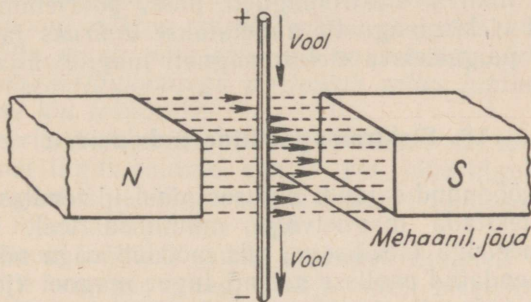
Elektromagneti magnetvoog oleneb samuti südamiku ehitusest. Magnetvoogu suurenemiseks on vaja, et jõujooned võimalikult vähe läbistaksid õhku, sest õhk avaldab jõujoontele suurt magnetilist takistust ehk tõkestust. Kõige tugevam magnetvoog saadakse suletud südamikus (joon. 23 b). Selles läbivad jõujooned kogu oma teekonna terases, mille magnetiline takistus on palju kordi väiksem kui õhul.

Isegi väike õhupilu sellises suletud südamikus suurendab järsult magnetilist takistust ja vähendab magnetvoogu. Samuti ei tohi südamiku ristlõige olla liig väike, kuna siis võib saabuda magnetiline küllastumine ja amperkeerude edasisel suurendamisel ei suurene enam magnetvoog.

Tähtis on ka südamiku materjal. Karastatud terasest südamik magneetub palju nõrgemalt kui pehmeterasest südamik, kuid see-eest jääb ta pärast voolu väljalülitamist magneetunuks. Sellisel viisil valmistatakse praegu püsivmagneteid.

Pehmeterasel, samuti ka mõnedel teistel ferromagnetilistel sulamitel on jõujoonte suhtes väiksem magnetiline takistus ja nendes saadakse tugevaim magnetvoog. Kuid seevastu on nendel väga väike jääkmagnetism ja voolu väljalülitamisel kaotavad nad magnetisuse peaaegu täielikult. Elektromagnetite südamikud valmistatakse just sellistest materjalidest ja seetõttu on elektromagnetid ajutised magnetid; nad oleivad ainult selle aja vältel, kui mähises on vool. See elektromagnetite omadus osutub paljudel juhtudel väga väärtuslikuks.

Elektromagnetiliste nähtuste hulka kuulub ka magnetvälja ja vooluga juhtme vastastikune mõju. Magnetväljas



Joon. 24. Magnetvälja mõju juhtmele.

olevale vooluga juhtmele mõjub magnetväli mehaanilise jõuga, mis püüab juhet nihutada täisnurga all magnetjõujoonte suunale (joon. 24). See on seletatav asjaoluga, et põhimagnetväli ja voolu magnetväli mõjuvad vastastikku teineteisele ja selle tulemusena tekib mehaaniline jõud analoogiliselt sellega, mis toimub kahe magnetpooluse vastastikuse külgetõmbe või eemaletõuke juhul.

*Elektrijuhtmele mõjuv jõud on seda suurem, mida tugevam on põhimagnetväli, mida tugevam on juhtmes vool ja mida pikem on juhtme see osa, mis asetseb magnetväljas.*

See jõud on suurim, kui juhe asetseb magnetjõujoonte suhtes täisnurga all. Kui juhe asetseb aga piki jõujooni, siis magnetväli ei mõju temale hoopiski. Vooluga juhtme liikumissuund magnetväljas oleneb juhtmes voolava voolu suunast ja magnetvälja suunast. Et muuta juhtme liikumist vastassuunaliseks, tuleb kas muuta voolu suunda juhtmes või muuta põhimagnetvälja jõujoonte suunda.

Püsivmagnetid ja elektromagnetid leiavad väga palju tähtsaid praktilisi rakendusi. Nad on enamiku valjuhääldajate ja telefonide põhiliseks koosteosaks. Magnetvälja tekkimist ja hajumist voolu ühendamise ja lahutamise puhul elektromagnetites kasutatakse sumistites ja vibraator-alaldajates, mis võimaldavad elektrivooluringi automaatselt ühendada ja lahutada palju kordi ühe sekundi vältel. Sama nähtust rakendatakse nn. releedes, mida kasutatakse mitmesuguste elektrivooluringide sisse- ja väljalülitamiseks.

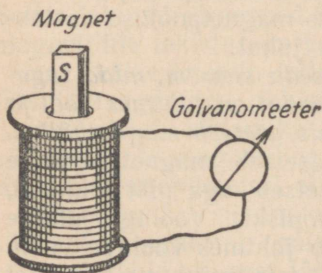
Voolu poolt läbitava juhtme liikumist magnetväljas ja teisi elektromagnetilisi nähtusi kasutatakse paljudes elektrimõõteriistades ning samuti elektrimootorites, milledes saadakse liikuva elektromagneti pidev pöörlemine. Seda pöörlevat elektromagnetit nimetatakse *ankruks* ja ta asetseb teise paigalseisva elektromagneti magnetväljas.

## 18. Elektromagnetiline induktsioon

Juba möödunud sajandi alguses püüdsid teadlased elektrivoolu tekitada magnetvälja muutmise teel. Tundliku galvanomeetriga (seadisega, mis mõõdab väga nõrku voolusid) ühendatud poolisse asetati tugev magnet (joon. 25). Seejuures märgati, et galvanomeeter näitab voolu olemasolu ainult magneti liikumisel poolis. Kui magnet seisab paigal, siis voolu ei saada.

Magneti liikumisel poolis tekkivat voolu nimetatakse *indutseeritud* ehk *induktsioonvooluks*. Magneti poolisse pistmisel liigub see vool ühes suunas, magneti poolist väljatõmbamisel muutub voolu suund vastupidiseks. Peale selle sõltub voolu suund ka sellest, missuguse poolusega liigub magnet poolisse.

*Indutseeritud vool on seda tugevam, mida tugevam on magnet, mida suurem on pooli keerdude arv ja magneti liikumiskiirus ning mida väiksem on vooluringi takistus. Kuna viimane võib olla erinev, siis on õigem ütelda, et magneti liikumine poolis põhjustab elektromotoorse jõu tekkimist, mida*



Joon. 25. Elektromagnetilise induktsiooni nähtus.

nimetatakse *indutseeritud elektromotoorseks jõuks*, suletud vooluringi olemasolul aga tekib vool, mida määratakse Ohmi seaduse järgi elektromotoorse jõu ja vooluringi takistuse suurustega.

Magneti poolis liikumisel toimub magnetvälja muutumine, ehk teisiti väljendades, pooli juhe löikab magnetjõujooni. Kui magnet on väljaspool pooli, siis poolis magnetväli puudub, ent kui magnet liigub pooli sisse, siis poolis olev magnetväli tugevneb. Magneti poolist väljaliikumine, ümberpöörduvalt, põhjustab pooli magnetvälja nõrgenemist. Magnetvälja muutumine indutseerib poolis elektromotoorse jõu, kusjuures magnetvälja tugevnemine ja nõrgenemine annab erisuunalised elektromotoorsed jõud.

*Induktsiooni nähtus seisab selles, et juhett ümbritseva magnetvälja muutumine ehk, mis on seesama, juhtme lõikumine magnetjõujoontega põhjustab selles juhtmes elektromotoorse jõu tekkimist.*

Indutseeritud elektromotoorse jõu saamiseks on ükskõik, kas magnet liigub juhtme suhtes või juhe liigub paigalseisva magnetvälja suhtes. Tähtis on, et toimuks magnetjõujoonte lõikamine juhtme poolt.

Induktsiooni nähtuse puhul muundub magneti liikumise mehaaniline energia magnetvälja abil elektrienergiaks. Seda induktsiooni põhimõtet rakendatakse mõningate muudatustega elektrienergia saamiseks *dünamotes* ehk *generaatorites*. Nendes on paigalseisev magnet või elektromagnet, mis tekitab tugeva magnetvälja, milles asetseb liikuv elektromagnet, mida nimetatakse *ankruks*. Selle pöörlemisel tekib ankrumähises indutseeritud vool.

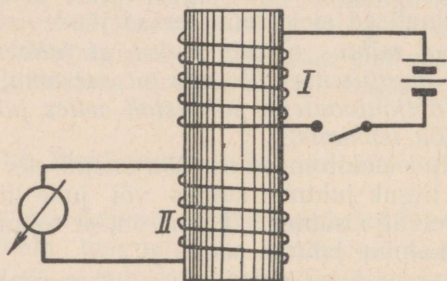
Teine induktsiooni põhijuhus seisab selles, et indutseeritud vool saadakse teise voolu abil, s. o. toimub ühe voolu elektrienergia muundumine teise voolu energiaks, ehk nn. voolu *transformeerimine*. Seda teostatakse transformaatorite abil, mis koosnevad kahest poolist (joon. 26). Primaarpool toitub vooluallikast tuleva vooluga ja tekitab enese ümber magnetvälja. Selle välja tugevdamiseks viiakse pooli erilisest transformaatoriterasest valmistatud südamik. Primaarpoolile keritakse sekundaarpool, mis on ühendatud tarbijaga.

Indutseeritud voolu võidakse sekundaarpoolis saada primaarpooli läbiva voolu igasugusel muutmisel, näiteks primaarvooluringi sulgemisel ja lahutamisel. Vooluringi sulgemine, mis tekitab magnetvälja, on samaväärne mag-

neti liikumisega poolis, vooluringi lahutamine aga, mis kaotab magnetvälja, on samaväärne magneti poolist väljumisega. Kuid vooluringi sulgemine ja katkestamine toimub palju kiiremini kui magneti liikumine ja seetõttu saadakse tugevam indutseeritud vool.

Indutseeritud elektrivoolu ja indutseeritud elektromotoorse jõu suund on määratud kindlaks reeglina, mille sõnastas vene füüsik E. H. Lenz 1833. aastal.

*Indutseeritud elektromotoorse jõu suund on alati selline, et tema poolt tekitatud vool avaldab oma magnetväljaga vastumõju induktsiooni nähtust põhjustanud põhimagnetväljale.*



Joon. 26. Voolu transformeerimine elektromagnetilise induktsiooni abil.

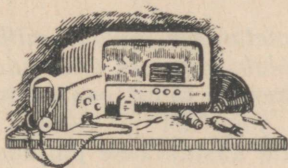
Selgitame seda reeglit transformaatori näite varal. Primaarpooli voolu sisselülitamisel tekib magnetväli. Indutseeritud elektromotoorne jõud põhjustab suletud sekundaarvooluringis niisuguse suunaga voolu, et tema magnetväli on suunatud primaarväljale vastupidiselt. Voolu väljalülitamisel, mil primaarvoolu magnetväli kaob, liigub indutseeritud vool vastassuunaliselt ja tekitab magnetvälja, mis ühtub primaarmagnetvälja suunaga ja püüab selle välja kadumist peatada.

Seega magnetvälja tugevnemisel on indutseeritud elektromotoorsel jõul üks suund, magnetvälja nõrgenemisel aga muutub elektromotoorse jõu suund vastupidiseks.

Ühes traadikeerus indutseeritud elektromotoorne jõud sõltub magnetvoo muutmiskiirusest, s. o. juhtme lõikumiste arvust magnetjõujoontega ühe sekundi vältel. Nende lõikumiste arvu suurenemine põhjustab elektromotoorse jõu vastavat suurenemist. Kui magnetvoog muutub poolis, millel on mitu keerdu, siis indutseeritakse igas keerus vastav

elektromotoorne jõud. Kõik keerud on omavahel ühendatud järjestikku ja seetõttu on poolis tekkiv üldine elektromotoorne jõud võrdne üksikute keerdude elektromotoorsete jõudude summaga, s. o. elektromotoorne jõud on seda suurem, mida suurem on keerdude arv. Näiteks, kui poolil on 50 keerdu ja magnetvoo muutumise kiirus on selline, et ühes keerus indutseerub 0,1 V, siis elektromotoorne jõud on 5 V.

Seega, mida kiiremini magnetvoog poolis muutub ja mida rohkem on poolil keerdusid, seda kõrgem on indutseeritud elektromotoorse jõu väärtus.





#### IV PEATÜKK

### VAHELDUVVOOL JA SELLE KASUTAMINE

#### 19. Vahelduvvoolu mõiste

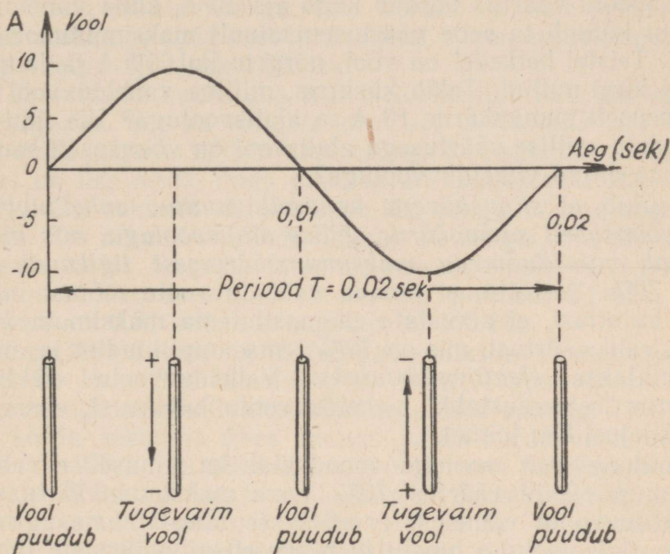
*Alalisvooluks nimetatakse voolu, millel on muutumatu tugevus ja mis voolab kogu aja ühes suunas.* Raadiotehnikas ja elektrotehnikas on tähtis osa samuti vahelduvvoolul, mis muudab oma tugevust ja suunda kindel arv kordi sekundis. Peale selle kasutatakse paljudel juhtudel pulseerivat voolu, millel on muutumatu suund nagu alalisvoolulgi, kuid mis muudab oma tugevust analoogiliselt vahelduvvooluga.

Vahelduvvoolu puhul liiguvad elektronid piki juhet aluses ühes suunas, seejärel peatuvad nad hetkeks ja liiguvad siis vastupidises suunas, peatuvad jällegi, pöörduvad ümber ja kordavad uuesti liikumist edasi-tagasi. Teisiti öeldes, elektronid liiguvad juhtmes võnkeliselt.

Kui ülalkirjeldatud induktsioonikatses liigutada magnetit kogu aja pooli sisse ja sealt välja või lülitada transformatoris kogu aja primaarvoolu sisse ja välja, siis muutub indutseeritud vool vahelduvvooluks.

Kõige sagedamini kasutame *siinuselist vahelduvvoolu*, mida võib näitlikult kujutada diagrammina või graafikuna, nagu see on toodud joonisel 27. Sellel joonisel on kujutatud vertikaalne ja horisontaalne sirgjoon, neid nimetatakse *telgedeks*. Horisontaalteljele on kantud aeg sekundites ja vertikaalteljele vool amprites või teistes ühikutes. Ühes suunas voolav vool loetakse kokkuleppeliselt *positiivseks* ja selle väärtus kantakse vertikaalteljele üles, vastassuunaline vool loetakse *negatiivseks* ja selle väärtus kantakse alla. Voolu ajalist muutmist kujutab näitlikult sujuv kõverjoon, mis on esitatud joonisel, ja mida nimetatakse *siinus-*

jooneks. Teataval algmomendil on vool võrdne nulliga. Seejärel ta tugevneb, algul kiiresti ning pärast järjest aeglasemalt. Teataval momendil voolu tugevnemine peatub ja vool saavutab suurima väärtuse, mida nimetatakse *maksimumväärtuseks* ehk amplituudiks. Näiteks on joonisel 27 amplituud võrdne 10 A. Edasi vool nõrgeneb, alguses aeglaselt, seejärel kiiremini ja langeb nullini, mille järel vool



Joon. 27. Vahelduvvoolu graafik.

muudab suunda ja kordab kõiki oma muudatusi negatiivses suunas.

Vool tugevneb uuesti järkjärgult, algul kiiresti, seejärel aeglasemalt, saavutab maksimumväärtuse ja nõrgeneb pärast kuni nullini. Voolu suund muutub jälle, s. o. vool voolab uuesti algsuunas, ja kõik tema muudatused korduvad jälle uuesti. Täiesti samasuguselt muutuvad elektromotoorne jõud ja pinge vahelduvvoolu ringis.

Joonisel 27 alamal on näidatud elektronide liikumine juhtmes vahelduvvoolu puhul mõnesugustel erinevatel ajamomentidel.

Vahelduvvoolu seisukordi üksikutel ajamomentidel nimetatakse tema *faasideks* (sõna «faas» tähendab seisukorda).

Kõikidest erisugustest faasidest on kõige iseloomustavamateks *maksimumfaasid* ja *nullfaasid*, s. o. vahelduvvoolu niisugused seisukorrad, millal esinevad tema suurimad või nullväärtused.

Pinge ja voolu maksimumväärtused ei ole arvutamiseks. On täiesti ilmne, et kümne-amprise amplituudiga vahelduvvoolul on väiksem võimsus kui 10-amprisel alalisvoolul. Alalisvoolu väärtus võrdub kogu aja 10 A, kuna vahelduvvoolul künib ta selle väärtuseni ainult maksimummomentidel. Teistel hetkedel on vool nõrgem kui 10 A ja langeb isegi kuni nullini. Tekib küsimus, milline vahelduvvool on võimsuselt samaväärne 10 A-se alalisvooluga? Või ümberpöörduvalt, millise väärtusega alalisvool on võimsuselt samaväärne antud vahelduvvooluga?

Osutub, et *siinuskõvera kohaselt muutuv vahelduvvool on võimsuselt samaväärne sellise alalisvooluga, mis moodustab vahelduvvoolu maksimumväärtusest ligikaudu 0,7 ehk 70%*. Seetõttu, et omada vahelduvvoolu mõjust õiget kujutlust, ei arvestata enamasti tema maksimumväärtust, vaid väärtust, mis on 70% tema amplituudist ja mida nimetatakse *efektiivväärtuseks*. Vahelduvvoolu efektiivväärtus iseloomustabki vahelduvvoolu võimsust, energiat või soojuslikku toimet.

Analoogiliselt vooluga moodustab ka siinuselise vahelduvpinge efektiivväärtus 70% tema maksimumväärtusest. Vahelduvvoolu võimsust arvutatakse täiesti samasuguselt nagu alalisvoolulgi, voolu ja pinge efektiivväärtuste lihtsa korrutamise teel.

Kui on tarvis, siis võib alati hõlpsasti leida maksimumväärtusi, mis on 40% võrra efektiivväärtusest suuremad. Näiteks, kui vahelduvvoolu efektiivväärtus on 10 A, siis tema maksimumväärtus on 14 A.

Kui räägitakse vahelduvvoolu pingest või voolust, siis tavaliselt mõeldakse efektiivväärtusi. Nii näiteks meil NSV Liidus valgustusvõrgu normaalpinged 127 ja 220 V on efektiivpinged. Siit järene, et 127 V-ne pinge omab maksimumtippe 180 V.

Mitmesugused vahelduvvoolu elektrimõõteriistad mõõdavad tavaliselt pinge või voolu efektiivväärtusi.

## 20. Vahelduvvoolu perioodilisus ja sagedus

*Elektronide liikumist juhtmes ükskord edasi ja tagasi nimetatakse vahelduvvoolu üheks võnkeks. Esimesele võnkele järgneb teine, seejärel kolmas jne. . . .*

*Ühe võnke vältet (kestust) nimetatakse perioodiks ja märgitakse tähega T. Perioodi väljendatakse alati sekundites. Voolu muutumisaega, mis võrdub poolele perioodile, nimetatakse poolperioodiks. Joonisel 27 on näiteks perioodiks võetud 0,02 ehk 1/50 sek.*

Tähtsaimaks suuruseks, mis iseloomustab vahelduvvoolu, on *sagedus*. See on *võngete arv* või *perioodide arv ühes sekundis* ja seda tähistatakse tähega *f*. Sageduse mõõtühikuks on üks *herts*, mida lühendatult tähistatakse Hz.

Kui ühe sekundi vältel toimub üks võnge, siis on sagedus 1 Hz. Kui sekundis näiteks toimub 10 võnget, siis on sageduseks 10 Hz. Sagedus ja periood on matemaatiliselt pöörd-suurused. Sagedusele 10 Hz võrdub periood 0,1 sek. Kui periood on 0,01 sek., siis sagedus on 100 Hz.

Kogu NSV Liidus on üldvõrgus vahelduvvoolu sageduseks 50 Hz. See tähendab, et elektrivõrgus voolav vool muudab iga sekundi vältel 100 korda oma suunda. Ta liigub 50 korda sekundis ühes suunas ja 50 korda vastupidises suunas. 100 korda sekundis saavutab vool maksimumväärtuse ja 100 korda on ta null. Elektrivõrku lülitatud lambid tumenevad ühe sekundi vältel 100 korda ja omandavad endise helenduse samapalju kordi, kuid silm ei märka seda nähtust nn. nägemisinertsit tõttu, s. o. omaduse tõttu saadud muljeid ligikaudu 0,1 sek. vältel alal hoida.

Joonisel 27 on graafiliselt kujutatud siinuskõvera kohaselt muutuva vahelduvvoolu üks võnge, mille sagedus on just 50 Hz.

Vahelduvvoolusid liigitatakse tavaliselt kaheks rühmaks. *Voolusid sagedusega alla 10 000 Hz nimetatakse madalsagedus- ehk helisagedusvooludeks (lühendatult m.-s. voolud)*<sup>1</sup>.

Nende voolude sagedus vastab inimehale ja muusikariistade mitmesuguste helide sagedustele. Raadiotehnikas leiavad madalsagedusvoolud laialdast kasutamist eriti telefoni-ülekande juhul.

Raadiosides täidavad peaosa vahelduvvoolud sagedusega

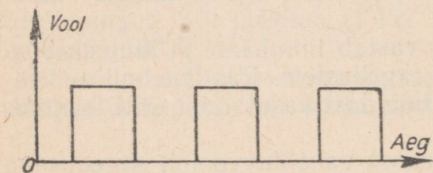
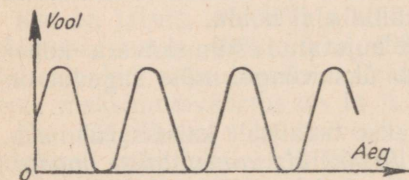
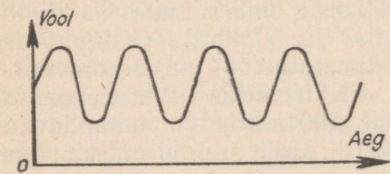
<sup>1</sup> Välja arvatud voolud sagedusega alla 20 Hz, mis ei vasta helisagedustele.

üle 10 000 Hz, mida nimetatakse kõrgsagedus<sup>2</sup> ehk raadio-sagedusvooludeks (lühendatult: k.-s. voolud). Kuna nende voolude sagedus võib olla väga suur, siis sageduse mõõtmiseks kasutatakse mõõtühikuid: *kilohertsi* (kHz), mis võrdub 1000 Hz, ja *megahertsi* (MHz), mis võrdub miljoni hertsiga.

Mitmesugused raadiojaamad töötavad tavaliselt kõrgsageduslike vahelduvvooludega, millede sagedus on suurem kui mõnisada kilohertsi või mõni megaherts. Raske on enesele kujutleda, et elektronid muudavad juhtmes oma liikumissuunda miljoneid kordi ühe sekundi vältel, s. o. võnguvad sagedusega miljoneid hertse. Kuid nüüdisaja raadiotehnikas kasutatakse eriotstarveteks (näiteks raadiolokatsiooni) voolusid sagedusega isegi miljardeid hertse ja on olemas seadiseid, mis võimaldavad küllalt täpselt mõõta selliseid ülikõrgsagedusi.

## 21. Pulseerivvool

Pulseerivvoolud, millel, nagu teame, on muutumatu suund, kuid mis muudavad oma tugevust, võivad olla mitmesugused. Mõnikord muutub nende vool teatavast suurimast väärtusest kuni teatava väikseima väärtuseni, kuid nullini siiski ei lange.

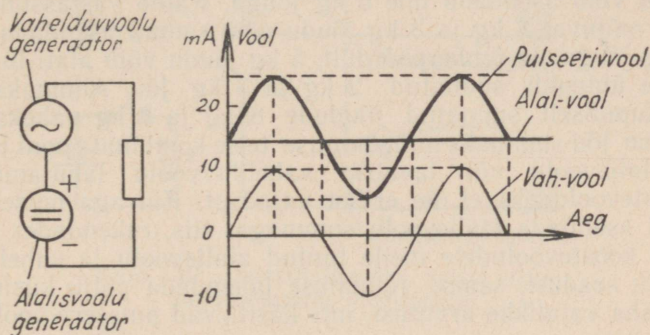


Joon. 28. Erisuguste pulseerivvoolude graafiline kujutus.

Teistel juhtudel väheneb vool kuni nullini. Kui alalisvooluring katkestatakse mõnesuguse sagedusega mingi lüliti abil, siis saadakse pulseerivvool, mida nimetatakse *katkeliseks vooluks*. Sel puhul vooluringis mõnesuguste ajavahemike vältel vool üldse puudub. Joonisel 28 on kujutatud mitmesuguste pulseerivvoolude graafikute näited.

Mistahes liiki pulseerivoolu on hõlpus käsitleda nagu kahe voolu — alalisvoolu ja vahelduvvoolu summat.

Igal pulseerivoolul on alalis- ja vahelduvvoolu komponent. Paljudele näib see imelik ja arusaadamatu. Tõesti, pulseerivool on ometi täiesti tuntud vool, mis kogu aja voolab ühes suunas ja muudab oma tugevust. Kuidas siis võib öelda, et selle voolu koostisse kuulub vahelduvvool, mis muudab oma suunda? Kui ühe ja sama juhtme kaudu lasta iseseisvatest eraldi generaatoritest samaaegselt kaks voolu — alalisvoolu ja vahelduvvoolu, siis osutub, et selles



Joon. 29. Pulseerivoolu saamine alalisvoolu ja vahelduvvoolu liitmise teel.

juhtmes saadakse pulseerivool (joon. 29)<sup>1</sup>. Alalisvool ja vahelduvvool juheta eraldi ei läbi. Nad liituvad üheks ühiseks elektronide vooluks, millel on kõik pulseerivoolu omadused.

Alalisvoolu ja vahelduvvoolu liitmist võib kujutada graafiliselt. Joonisel 29 on joonestatud 15 mA-se alalisvoolu ja 10 mA-se maksimumväärtusega vahelduvvoolu graafikud. Liites neid voolusid üksikutel ajamomentidel ühes nende märkide, s. o. suundade arvessevõtmisega saame pulseerivoolu graafiku, mis joonisel 29 on näidatud jämeda joonega. Selle voolu tugevus muutub väikseimast väärtusest 5 mA (s. o. 15—10 mA) kuni suurima väärtuseni 25 mA (s. o. 15 + 10 mA).

Käsitletud nähtus tõestab õiget kujutlust pulseerivoolust kui alalisvoolu ja vahelduvvoolu summast. Osutub, et on

<sup>1</sup> Seejuures ei tohi vahelduvvoolu amplituud ületada alalisvoolu tugevust.

võimalik ka vastupidine nähtus. Mõnesuguste seadiste abil õnnestub neid kahte liitunud voolu teineteisest eraldada.

Tuleb rõhutada, et iga voolu võib alati lugeda mitmest voolust koosnevaks. Näiteks, kui juhtmes voolab 5-amprine vool, siis seda võib lugeda ühes suunas voolava 2 A ja 3 A voolu summaks või kahes erisuunas voolava 8 A ja 3 A voolu summaks, s. o. teisiti öeldes 8 A ja 3 A voolu vaheks. Pole raske valida ka teisi kombinatsioone kahest või rohkemast arvust vooludest, mis annavad kokku 5 A voolu. Siin on täielik analoogia järgmise näitega. Mõjugu mingisugusele esemele kaks ühtepidi suunatud jõudu: 2 kg ja 3 kg. Neid võib asendada ühe 5 kg jõuga. Kahte vastassuunaliselt mõjuvat 8 kg ja 3 kg jõudu võib samuti asendada ühe 5 kg jõuga. Ja ümberpöörduvalt, 5 kg jõudu võib alati lugeda kahe ühtepidi suunatud 2 kg ja 3 kg jõu summaks või vastupidiselt suunatud jõudude 8 kg ja 3 kg vaheks või mitme jõu summaks mingisuguse teise kombinatsiooni järgi.

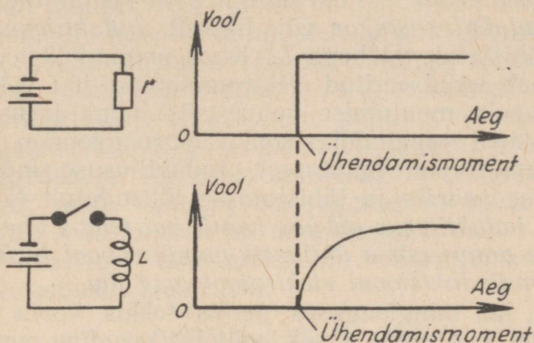
Alalisvoolu või tavalise vahelduvvoolu lahutamiseks koostevooludeks ei ole erilist vajadust. Kui aga pulseerivool asendada alalisvoolu summaga, siis, rakendades nendele koostevooludele meile tuntud alalisvoolu ja vahelduvvoolu seadusi, saame võimaluse lahendada palju küsimusi ja teha vajalikke arvutusi, mis käsitlevad pulseerivoolu.

## 22. Induktsioonpoolid

Nagu teame, tekitab juhett ümbritseva magnetvälja muutumine selles juhtmes teatava indutseeritud elektromotoorse jõu. Kui juhtmes voolab tugevuselt muutuv vool, siis teda ümbritsev magnetväli muutub samuti ja juhtmes indutseerub elektromotoorne jõud. Seega saadakse *indutseeritud elektromotoorne jõud samas juhtmes, milles toimub voolu muutumine*. Seda nähtust nimetatakse *omainduktsiooniks*. Lentzi reegli järgi avaldab indutseeritud elektromotoorne jõud alati indutseerivale põhivoolule vastumõju. See reegel on kehtiv ka omainduktsiooni nähtuste kohta. Näiteks vooluringi sisselülitamisel ilmub vool ja tekib magnetväli, mis indutseerib juhtmes omainduktsiooni elektromotoorse jõu, mis on suunatud voolule vastu ja takistab vooluringis voolu tugevnemist. Kui omainduktsiooni nähtust ei oleks, siis saavutaks vool sisselülitamisel hetkeliselt tugevuse, mille määravad rakendatud pinge ja vooluringi takistus, omainduktsiooni tõttu aga saadakse voolu aeglustatud

tugevnemine (joon. 30). Muidugi kestab aeg, mille vältel vool ületab omainduktsiooni elektromotoorse jõu, ainult sekundi mõned väiksed osad, kuid paljudel juhtudel on niisugusel voolu järkjärgulisel suurenemisel suur tähtsus.

Rakendatud pinge mõju lõppemisel võib vooluringis tähele panna vastupidist pilti. Kui ei oleks omainduktsiooni, siis katkeks vool hetkeliselt. Kuid magnetvälja



Joon. 30. Omainduktsiooni mõju voolu tugevnemisele vooluringis.

kadumisel lõikuvad tema jõujooned juhtmega ja tekitavad selles omainduktsiooni elektromotoorse jõu, mille suund Lentzi reegli järgi ühtub vooluga. Nüüd püüab omainduktsiooni elektromotoorne jõud voolu voolamist pikendada ja selle tulemusena ei katke vool järsku, vaid aegamööda.

Omainduktsioon avaldab vastumõju vooluringis esineva voolu igasugusele muutumisele. Kui vool tugevneb, siis omainduktsiooni elektromotoorne jõud aeglustab, pidurdab, pikendab seda tugevnemist. Ja kui vool nõrgeneb, siis omainduktsiooni elektromotoorne jõud pikendab nõrgenemist. Seega tasandab omainduktsiooni elektromotoorne jõud alati voolu muutumist.

Nagu teada, kulub osa alalisvoolu energiat juhtme soojenemiseks. Kuid voolu tekkimisel on peale energiakulu juhtme soojenemiseks veel energia lisakulu magnetvälja tekitamiseks, millesse varutakse teatav hulk energiat. Voolu kadumisel kandub see energia magnetväljast juhtmesse uuesti tagasi ja tekitab vooluringis indutseeritud voolu, mis kestab pärast seda edasi kui põhivool on juba katkenud.

Sirge juhe omab väikest magnetvoogu ja seetõttu avaldub tema omainduktsiooni nähtus võrdlemisi nõrgalt. Märksa tugevamini avaldub pooli omainduktsioon. Mida suurem on pooli keerdude arv ja läbimõõt, seda suurem on pooli induktiivsus. Kui pooli sisse asetada magnetmaterjalist südamik, siis magnetvoog suureneb palju kordi ja omainduktsiooni nähtus muutub samuti märksa tugevamaks.

Omainduktsiooni nähtust mingites elektrijuhtides iseloomustab *induktiivsustegur* või lihtsalt *induktiivsus*. Seda suurust tähistatakse tähega *L*. Kuna omainduktsiooni nähtus avaldub indutseeritud elektromotoorse jõu tekkimises juhtmes voolu muutumise puhul, siis induktiivsus iseloomustab nimelt omainduktsiooni elektromotoorse jõu kõrgust sõltuvalt voolu muutusest. Induktiivsuse mõõtühikut nimetatakse *henriks* ja tähistatakse lühendatult tähega *H*.

*Juhtme induktiivsus on üks henri, kui temas ühe sekundi vältel ühe ampri võrra ühtlaselt muutuv vool tekitab ühevoldise omainduktsiooni elektromotoorse jõu.*

Näiteks, kui mingisuguses poolis tekkis voolu ühtlasel muutumisel 1 A võrra 1 sek. vältel 40-voldine omainduktsiooni elektromotoorne jõud, siis selle pooli induktiivsus on 40 H.

Sageli kasutatakse väiksemaid induktiivsuse mõõtühikuid: *millihenrit* (mH) ja *mikrohenrit* (H), mis vastavalt võrduvad 0,001 H ja 0,000 001 H.

Pooli induktiivsus on seda suurem, mida suurem on tema läbimõõt, mida väiksem ta pikkus ja mida suurem on keerdude arv. Induktiivsus oleneb keerdude arvust ruudus. See tähendab, et keerdude arvu suurendamisel 2, 3, 4 korda suureneb induktiivsus ruudus, s. o. vastavalt 4, 9, 16 korda. Juhtme läbimõõdu vähendamisel suureneb induktiivsus tähtsusetult.

Ferromagnetilisest ainest südamiku paigutamine pooli sisse suurendab induktiivsust palju kordi.

Juhul kui mitu pooli on järjestikku ühendatud, siis üldinduktiivsus on võrdne üksikute poolide induktiivsuste summaga. See on kehtiv tingimusel, et poolid oma magnetväljadega ei avalda üksteisele mõju. Poolide paralleelühendus vähendab induktiivsust ja seetõttu rakendatakse seda harva.

Induktsioonpool moodustab alalisvoolule väikese takistuse, mis sõltub ainult juhtme pikkusest, jämedusest ja materjalist. Alalisvoolutakistust nimetatakse *oomiliseks takistuseks*. Vahelduvvoolu puhul on poolil täiendavalt veel

*induktiivtakistus*, mille olemasolu seletub omainduktsiooni nähtusega. Takistades kõiki voolu muutusi, avaldab pool vahelduvvoolu läbimisele tunduvat vastumõju. Ta aeglustab voolu tugevnemist ja seetõttu ei saavuta vahelduvvool oma muutumistel sellist maksimumväärtust, missugust ta võiks omada pooli puudumisel.

Mida suurem on vahelduvvoolu sagedus, seda kiiremini ja järsumalt muutub vool ja seda tundavam on omainduktsiooni vastumõju nendele muutustele. Kui sagedust vähendada, siis induktiivtakistus väheneb. Nulliga võrdsel sagedusel, s. o. alalisvoolu puhul, võrdub induktiivtakistus samuti nulliga, kuna alalisvoolu puhul omainduktsiooni nähtused puuduvad. Seega avaldab üks ja sama pool mitmesuguse sagedusega vooludele mitmesugust takistust.

*Järelikult, mida suurem on sagedus ja mida suurem induktiivsus, seda suurem on induktiivtakistus.*

Induktiivtakistust tähistatakse  $X_L$ , väljendatakse oomides ja arvutatakse valemi abil:

$$X_L = 6,28 fL,$$

kus  $f$  on sagedus hertsides ja  $L$  — induktiivsus henrides. Selles valemis on mõnikord 6,28 asemel lihtsam võtta 6,25, mis annab väga väikese vea.

Näiteks leiame 500 kHz sagedusega voolule 2 mH induktiivsusega pooli induktiivtakistuse. Muudame millihenrid henrideks ja kilohertsid hertsideks. Saame  $L = 0,002$  H ja  $f = 500\,000$  Hz. Korrutades neid suurusi teineteisega ja 6,28-ga, leiame  $X_L = 6280$ . Kui sagedus on 500 Hz, s. o. 1000 korda väiksem, siis väheneb induktiivtakistus samuti 1000 korda ja moodustab ainult 6,28.

Tabelis 2 on toodud erisuguse induktiivsusega poolide induktiivtakistuse väärtused mitmesuguste sageduste puhul.

Tabel 2

Poolide induktiivtakistusi oomides

Sagedus	Induktiivsus $L$					
	2 $\mu$ H	20 $\mu$ H	200 $\mu$ H	2 mH	2 H	20 H
50 Hz	0,00063	0,0063	0,063	0,63	628	6280
1000 Hz	0,0126	0,126	1,26	12,6	12560	125600
200 kHz	2,52	25,2	252	2520	2,52 M	25,2 M
1000 kHz	12,6	126	1260	12600	12,6 „	126 „
10000 kHz	126	1260	12600	126000	126 „	1260 „

Induktiivtakistusel on tähtis iseärasus: temale ei kulutata energiat. Nagu mäletame alalisvoolu puhul, muundub voolu energia igas oomilises takistuses soojuseks seetõttu, et liikuvad elektronid põrkuvad kokku juhtme osakestega.

Iga pooli vahelduvvoolu juhtmel on samuti analoogiline takistus ja vahelduvvoolu energiat kulub juhtme enese soojenemiseks mitte vähem kui alalisvoolu puhul. Kuid see energiakulu käib ainult juhtme enese takistuse kohta, mida vahelduvvoolu puhul tavaliselt nimetatakse *aktiivtakistuseks*. Ent induktiivtakistuses, mis on pooli lisatakiistus, toimub midagi muud. Ühe veerandperioodi vältel, mil vool tugevneb, kulub voolu energia magnetvälja tekitamiseks ja akumulereerub selles, kuid järgmisel veerandperioodil, mil vool nõrgeneb ja magnetväli kahaneb, muutub magnetvälja energia uuesti voolu energiaks.

Nagu juba tähendatud, seletub see asjaoluga, et magnetvälja kahanemisel tekib poolis vastavalt induktsiooni seadustele omainduktsiooni elektromotoorne jõud, mis suunalt ühtub vooluga ja soodustab seda. Veerandperioodi vältel töötab pool tarbijana ning järgmisel veerandperioodil generaatorina.

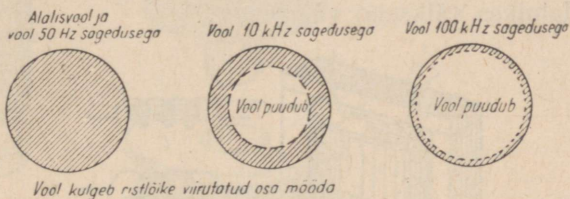
Seetõttu nimetatakse induktiivtakistust *ebatakiistuseks* ehk *reaktiivtakistuseks*. See nimetus on tuletatud sõnast *reaktsioon*, s. o. *vastumõju* ehk *tagasimõju* ja rõhutab, et pooli magnetväljas varutud energia ei kulu, vaid tuleb täielikult tagasi.

Vastupidiselt sellele *nimetatakse tegevtakiistuseks* ehk *aktiivtakistuseks* alati *niisugust takistust vahelduvvoolule, milles toimub tagastamata energiakadu, s. o. voolu energia muundumine mingisuguseks teiseks, näiteks soojusenergiaks*.

Induktiivtakistus on oma olemuselt vastumõju omainduktsiooni elektromotoorsele jõule, mis tekib poolis voolu muutumisel. See elektromotoorne jõud vähendab voolu, s. o. oma mõjult on sarnane takistusega, kuid ei põhjusta energia tagastamata lisakadu.

Omainduktsiooni nähtustest tingituna esineb igas vahelduvvoolu juhtmes nn. *pinnaefekt*. See seisab selles, et erinevalt alalisvoolust ei läbi vahelduvvool kogu juhtme ristlõiget, vaid kulgeb juhtme mõnesugust pinnakihti mööda, mille paksus väheneb sageduse suurenemisega. Seetõttu on juhtme töötav ristlõige vahelduvvoolu puhul tunduvalt väiksem kui alalisvoolu puhul. Selle tulemusena on vahelduvvoolu juhtme tegevtakiistus alati suurem kui oomiline

takistus, s. o. alalisvoolu takistus, ja mida kõrgem sagedus, seda suurem on see vahe (joon. 31). Sageduse puhul 50 Hz pinnaefekt peaaegu puudub, kuid ta ilmneb väga tunduvalt kõrgsagedustel, millede jaoks sageli kasutatakse õõnesjuhet, kuna juhtme sisemine osa ei ole vajalik. Kõrgsagedusvoolu juhtme pind kaetakse mõnikord hõbedaga. Juhtme pealispinna suurendamise otstarbel kasutatakse juhtmeid, mis koosnevad suurest arvust üksikutest peentest traatidest, mis on üksteisest isoleeritud. Pinnaefekti tõttu on kõrgsagedusvool isegi kõrgepinge puhul inimesele peaaegu täiesti ohutu, kuna ta voolab keha pinda (nahka) mööda ega häiri organismi normaalset töötamist.



Joon. 31. Juhtme töötav ristlõige voolu mitmesugusel sagedusel (pinnaefekt).

Seega on igal poolil mõnesugune aktiiv- ja mõnesugune induktiivtakistus. Pooli kogutakistust, nn. näivtakistust vahelduvvoolule, mida tähistatakse tähega  $Z$ , arvutatakse nende kahe takistuse mitte lihtsa summeerimisega, vaid keerukamal teel.

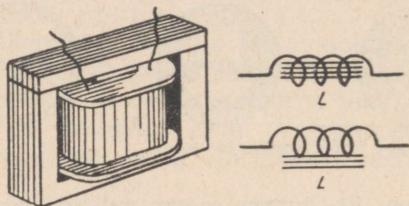
Praktikas on induktiivtakistus enamjuhtudel aktiivtakistusest palju suurem ja seetõttu viimast tavaliselt ei võeta arvesse. Ligikaudu arvestatakse, et pool omab ainult induktiivtakistust.

Raadioaparatuuris kasutatavad poolid võivad olla ette nähtud madalsagedusvooludele ja kõrgsagedusvooludele. Esimesed valmistatakse alati terassüdamikuga ja suure keerdude arvuga. Nende induktiivsus on kaunis suur, ulatudes kuni kümnete ja isegi sadade henrideni.

Nende poolide südamikud valmistatakse mitte ühise tervikuna, vaid kokkupanduna erilise transformaatoriterase õhukestest lehtedest, mis üksteisest on isoleeritud õhukese paberi või lakk-kihi abil. Selle isolatsiooni ülesandeks on südamikus nn. pöörivoolude ehk parasitvoolude kõrvaldamine. Asi seisab selles, et vahelduv magnetvoog indutsee-

rib elektromotoorse jõu ka südamikus, kuna viimane on elektrijuht. Kui südamik on ehitatud ühest tükist, siis tekivad temas üsna tugevad voolud, mis kuumendavad teda ja põhjustavad tunduva energiakao. Nende voolude tekkimiseks kulub tunduv osa võimsusest. Üksikutest, üksteisest isoleeritud lehtedest kokku pandud südamikus vähenevad pöörivoolude tõttu tekkinud energiakaod palju kordi.

Peale selle tekivad südamikus veel kaod ümbermagneetimisest. Vahelduva magnetvoo mõjul pöörduvad molekulid südamikus kogu aja ja seejuures tekib nende vastastikune hõõrdumine, mille arvel südamik täiendavalt kuumeneb. Nendel energiakadudel, mida nimetatakse *magnetilisteks rauaskadudeks*, on erilistest magnetmaterjalidest valmistatud südamikes väikseim väärtus.



Joon. 32. Madalsageduspaispool ja selle kujutamine skeemidel.

Kõrgsagedusvoolude puhul kasutatavad poolid tehakse sageli ilma terassüdamiketa ja neil on võrdlemisi väike keerdude arv — kümnete või sadade keerdude piirides. Nende induktiivsus ulatub mõnest mikrohenrist kuni mõne millihenrini.

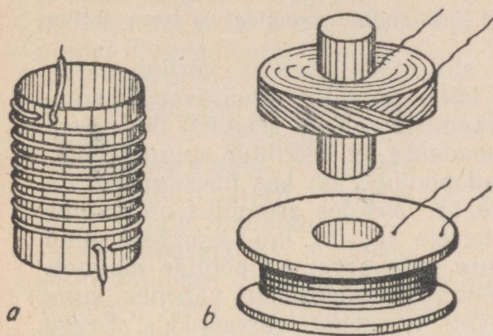
Viimasel ajal leiavad edukat kasutamist, nn. *kõrgsagedusrauast* ehk *magnetdielektrikust* südamikega kõrgsageduspoolid. Need poolisüdamikud on tehtud mingi magnetmaterjali peenest pulbrist, mis isoleerlakiga on kokku liimitud. Nad tekitavad väga väikese energiakao ja võimaldavad vähendada pooli mõõteid, samuti ka hõlpsasti muuta induktiivsust.

Kõrgsageduspoole kasutatakse kas raadiovastuvõtjate ja raadiosaatjate häälestamiseks mitmesugustele sagedustele (häälestuspoolidena) või paispoolidena (nn. drosselitena), millede otstarbeks on suure induktiivtakistuse tekitamine mitmesuguse sagedusega vooludele.

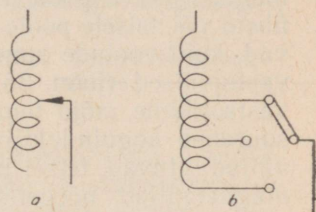
Kõrgsageduspaispoolidel on juba võrdlemisi väikesel

induktiivsusel — mõne millihenri või selle murdosa piirides — üsna suur induktiivtakistus. Laialdasemalt kasutatakse samuti madalsageduspaispoole, milles suurema induktiivtakistuse saamiseks kasutatakse suletud terrassüdamikke nendele mähitud suure keerdude arvuga — mõne saja või isegi kümnete tuhandete piirides (joon. 32).

Kõrgsageduspole valmistatakse kahte tüüpi: võrdlemisi väikese keerdude arvu puhul mähitakse need ühekihiliselt mingile silindrilisele poolialusele (joon. 33 a), kuid suu-



Joon. 33. Ühekihiline (a) ja mitmekihiline (b) kõrgsageduspole.



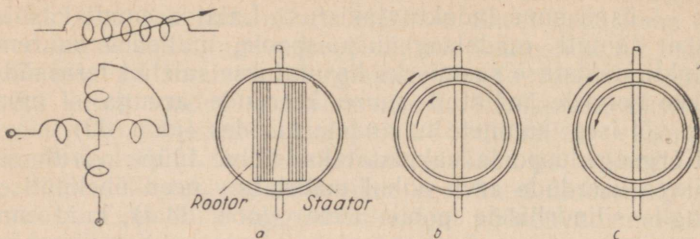
Joon. 34. Poolide induktiivsuse muutmise moodsed.

rema keerdude arvu puhul kasutatakse mitmekihilist mähist (joon. 33 b).

Muudetava induktiivsusega pole on mitmesuguse konstruktsiooniga. Mõnikord saab pooli keerdudel libiseda kontaktvedru nagu reostaadiski (joon. 34 a). Sageli valmistatakse mitmesugusest keerdude arvust väljuvate haruühendustega pool ja siis on ümberlülitite abil võimalik muuta induktiivsust umbkaudu, astmeliselt ehk hüppeliselt (joon. 34 b).

Induktiivsuse sujuvat muutumist saadakse variomeetri abil. Selle moodustab kaks järjestikku ühendatud pooli; neist üks on paigalseisev ja teine saab esimese pooli suhtes liikuda. Tavaliselt saab liikuv pool, mida nimetatakse *rootoriks*, teljel pöörelda paigalseisva pooli sees, mida nimetatakse *staatorkiks*. Skeemidel kujutatakse variomeetrit sellisel, nagu on näidatud joonisel 35.

Kui variomeetri poolid seisavad teineteise suhtes täis-



Joon. 35. Variomeetri kujutamine skeemidel ja tema ehitus.

nurga all (joon. 35 a), siis selles asendis võrdub variomeetri koguinduktiivsus tema poolide induktiivsuste summaga. Liikuva pooli pööramisel sellest asendist  $90^\circ$  võrra ühele või teisele poole saadakse, et keerdude suunad ühtuvad, kuid voolude suunad poolides on kas ühesugused või vastupidised (joon. 35 b, c). Nendes asendites on poolide vastastikune mõju teineteisele suurim, kuid esimesel juhul suureneb koguinduktiivsus selle arvel, et poolide magnetväljad liituvad, teisel juhul koguinduktiivsus väheneb, kuna magnetväljad nõrgendavad teineteist vastastikku. Seega rootori pöördumisel  $180^\circ$  võrra ühest äärmisest asendist teise muutub induktiivsus sujuvalt suurimast väärtusest kuni väikseimani.

Viimasel ajal kasutatakse ka *ferrovariomeetreid*, milles pooli induktiivsus muutub kõrgsagedusrauast südamikuasendi muutmisel pooli sees.

### 23. Transformaatorid ja autotransformaatorid

Elektro- ja raadiotehnikas leiavad kasutamist transformaatorid ehk nn. trafod, mis muudavad teatava pingega vahelduvvoolu teistsuguse pingega vahelduvvooluks, s. o. tõstavad või madaldavad pinget.

Transformaatoril on kaks mähist, mis tavaliselt asetsevad mingist magnetmaterjalist, näiteks terasest, valmistatud ühisel südamikul (joon. 36 a). Üks mähistest — primaarmähis — ühendatakse muuta soovitava vahelduvvoolu generaatoriga. Primaarmähise vool tekitab südamikus vahelduva magnetvoo. Transformaatori südamik ehitatakse tavaliselt suletuna, et magnetjõujooned asetuksid kogu oma teekonnal terases ja ei hajuks õhus. Vahelduv magnetvoo indutseerib sekundaarmähises vahelduva elektromo-

toorse jõu, mille suurus ole-  
 neb selle mähise keerdude  
 arvust ja magnetvoo muutu-  
 miskiirusest, nagu see järeldub  
 elektromagnetilise indukt-  
 siooni seadustest. Kui sekun-  
 daarmähisel on keerdusid  
 rohkem kui primaarmähisel,  
 siis sekundaarpinge  $U_2$  on  
 primaarpingest  $U_1$  kõrgem ja  
 transformaatorit nimetatakse  
*pinget kõrgendavaks*. Kui aga  
 sekundaarmähiste keerdude  
 arv on väiksem kui primaar-  
 mähisel, siis sekundaarpinge  
 on primaarpingest madalam  
 ja transformaatorit nimeta-  
 takse *pinget madaldavaks*.

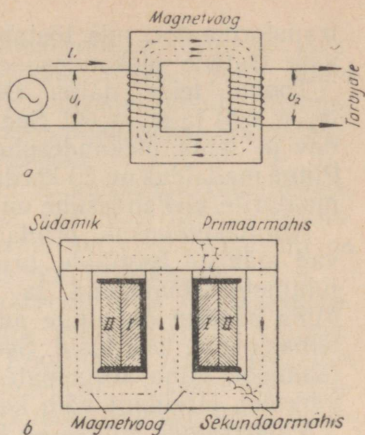
Sekundaarmähist läbiva

voolu võimsus  $P_2$  peaaegu võrdub primaarvoolu võimsu-  
 sega  $P_1$ , kuna transformaatoris tekkivad energiakaod on  
 tähtsusetud. Kuid võimsus on pinge ja voolu korrutis. See-  
 tõttu pinge kõrgendamisel transformaatori abil toimub  
 samaaegselt voolu nõrgenemine ja ümberpöörduvalt, kuid  
 pinge ja voolu korrutis jääb ligikaudu üheks ja samaks.

Olgu primaarmähisele rakendatud pinge 200 V ja vool  
 1 A. Siis on primaarvõimsus 200 W. Oletame, et transfor-  
 maator madaldab pinget 4 korda. Sekundaarpinge on siis  
 50 V, kuid rakendatav vool võib olla suurem 4 korda  
 (4/A). Sekundaarringist võetav võimsus on endiselt  
 $50 \cdot 4 = 200$  W.

Iga transformaatorit iseloomustab võimsus, mida on või-  
 malik transformaatori kaudu üle kanda. Teine iseloomustav  
 suurus on pinge, millele primaarmähis on arvatud. Trans-  
 formaatorit on lubatav koormata madalama pingega ja  
 võimsusega, kuid nende tõstmine üle normaalväärtuste on  
 lubamatu, sest sel puhul tekib transformaatori südamiku ja  
 mähiste ülekuumenemine.

Veel üks tähtis suurus on trafo ülekandesuhe  $\ddot{u}$ , mis on  
 primaarmähise keerdude arvu  $\omega_1$  ja sekundaarmähise keer-  
 dude arvu  $\omega_2$  suhe, ehk, mis on seesama, primaarpinge ja  
 sekundaarpinge suhe. Näiteks, kui trafo  $\omega_1 = 500$  ja  
 $\omega_2 = 1000$ , siis on ülekandesuhe 1 : 2. Antud juhul on meil



Joon. 36. Transformaatori  
ehitus.

transformaator, mis tõstab pinget kaks korda. Pinget tõstivate trafode ülekandesuhe saadakse alati ühest väiksem.

Toome teise näite. Olgu meil transformaator, mille  $\omega_1 = 600$  ja  $\omega_2 = 30$ . See transformaator on pinget madaldav ja tema ülekandesuhe võrdub  $\ddot{u} = 600 : 30 = 20 : 1$ . Pinge madaldus on 20-kordne. Pinget madaldavate transformaatorite ülekandesuhe on ühest alati suurem.

Normaalvõimsus, primaarpinge ja ülekandesuhe määravad mähiste keerdude arvu, südamikuristlõike, mähiste juhtmete läbimõõdud ja transformaatori teised andmed. Mida suurem on pinge antud mähises, seda rohkem peab temas olema keerdusid. Seejuures muutub samuti ka juhtme läbimõõt, kuna kõrgemate pingete puhul tarbitud vool on väiksem, järelikult võib kasutada peenemat traati.

Väiketraafode hulgas on kõige rohkem levinud nn. manteltransformaatori konstruktsioon, millel on hargnev magnetvoog. Tema südamik, mis koosneb keskmisest laiemast osast ja kahest kitsamast külgosast, meenutab venekeelset tähte «Ш», mis on suletud lisaplaadiga. Mähised asetsevad ühel poolil, mis paigutatakse keskmisele laiemale südamikule (joon. 36 b).

Enamasti kasutatakse nn. silindrilist mähist. Sel juhul pooli keha valmistatakse tavaliselt papist või mõnest teisest isoleermaterjalist ja temale keritakse mähised üksteise peale. Seejuures on tähtsusetu, milline mähis asetseb seespool ja milline pealpool. Mõnikord tehakse mähised üksikute poolidena ilma igasuguse poolialuseta ja asetatakse südamikule.

Soovitav on, et mähis täidaks täielikult südamiku poolt ümbritsetava siseruumi, mida trafoaknaks nimetatakse. Tuleb tagada juhtme ja mähiste tõhusat isoleerimist üksteisest ja südamikust. Primaarmähis ja sekundaarmähis aga tuleb asetada võimalikult teineteise lähedale, et vähendada magnetilise puistevälja mõju, mis seisab selles, et osa primaarvooluga tekitatud magnetvoost ei löiku sekundaarmähise keerdudega ja seega ei võta transformeerimisest osa. Magnetilise puistevälja vähendamiseks jaotatakse mähised mõnikord osadeks ehk seksioonideks ja paigutatakse primaar- ja sekundaarmähise seksioonid kordamööda.

Energiakadude vähendamiseks valmistatakse südamik alati õhukestest eriterase lehtedest.

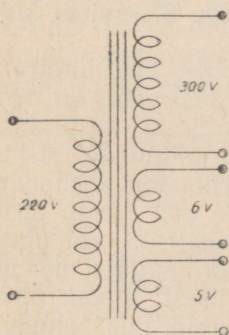
Transformaatori töötamisel on võimalikud kaks põhi-juhtu. Kui sekundaarmähis on lülitatud välja, siis töötab

transformaator koormuseta. Primaarpool on seejuures paispooliks ja laseb läbi väga väikese voolu. Selle voolu võimsus kulub ainult südamikü väikeste kadude ületamiseks ja primaarmähise juhtme soojendamiseks. Sekundaarpinge on sellel režiimil kõige kõrgem.

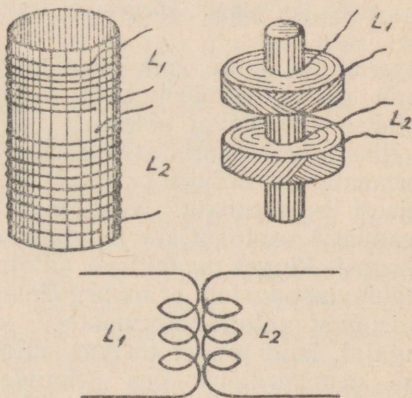
Sekundaarmähise ühendamisel mõnesuguse takistusega, s. o. mingisuguse voolutarbijaga, saadakse koormusrežiim. Mida väiksem see koormustakistus on, seda tugevam on sekundaarvooluringis sekundaarvool ja võimsus.

Ühes sellega tõuseb ka primaarvool, kuna primaarvooluringi võimsus on peaaegu võrdne sekundaaringi võimsusega (kadude võrra suurem). Koormatud transformaatori sekundaarmähise pinge on mõnevõrra väiksem kui tühi-joosul, kuna tekib pingelang sekundaarmähise enese takistusel. Sekundaarmähist ei tohi lühistada, kuna seejuures selle mähise, samuti ka primaarmähise vool kasvab tohutult ja transformaator võib läbi põleda.

Sekundaarmähise poolel on transformaator generaatoriks, millel on kindel elektromotoorne jõud ja teatud sisetakistus. Primaarmähise poolel aga kujutab transformaator endast koormustakistust transformaatorit toitvale generaatorile. Raadiovastuvõtjate ja võimendajate vahelduvvoolu võrgust toitmiseks ehitatakse jõutransformaatorid, millel on üks primaarmähis ja mitu erineva pingega sekundaar-



Joon. 37. Mitme mähisega madalsagedustransformaatori skeem.

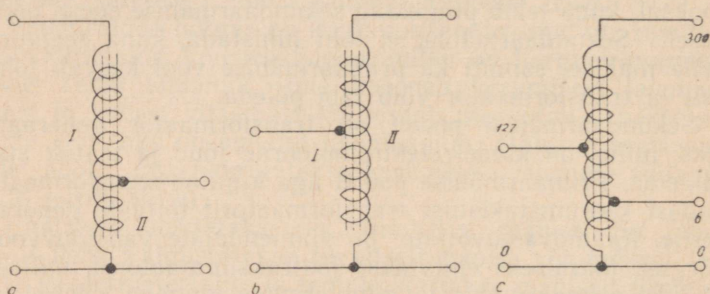


Joon. 38. Kõrgsagedustransformaatorid ja nende kujutamine skeemidel.

mähis. Niisuguse transformaatori skeemi näide on toodud joonisel 37. Paljudes raadiovastuvõtjate ja võimendajate skeemides kasutatakse kinnise terassüdamikuga madalsagedustransformaatoreid.

Laialdaselt kasutatakse samuti kõrgsagedustransformaatoreid, mis koosnevad kahest kõrvuti asetsevast poolist (joon. 38). Nendel poolidel puudub terassüdamik, milles kõrgsagedustel võivad tekkida suured energiakaod. Mõnikord kasutatakse kõrgsagedustransformaatorites kõrgsagedusrauast valmistatud südamikke.

Kõrgsagedustransformaator sidestab kahte vooluringi induktiivselt. Selline sidestus tehakse mõnikord reguleeri-



Joon. 39. Autotransformaatorite skeemid: pinget madaldav trafo (a), pinget kõrgendav trafo (b), universaaltrafo (c).

tavana. Sel juhul võib poolide vastastikune asetus muutada näiteks selliselt nagu variomeetris. Skeemidel kujutatakse vahelduvat sidestust noolega.

Raadioaparatuuris esineb sageli ka sääst- ehk autotransformaatoreid, millede primaar- ja sekundaarmähis on teineteisest isoleerimata. Neid transformaatoreid kasutatakse peamiselt vastuvõtjate ja võimendajate toitmiseks elektrivõrgust. Pinget madaldava autotransformaatori sekundaarmähis moodustab primaarmähisest ühe osa (joon. 39 a). Niisugust autotransformaatorit võib käsitleda kui pingejagajat, kuid pinget tõstvas autotransformaatoris moodustab primaarmähis osa sekundaarmähisest (joon. 39 b). Sageli kasutatakse autotransformaatoreid, mis annavad mitu erisugust pinget. Näiteks on joonisel 39 c toodud autotransformaator, mis osamähisega (klemmid 0 ja 127) on lülitatud võrgupingele 127 V. Mähise väiksemalt osalt

(klemmid 0 ja 6) on võimalik saada veel 6 V pinget, kogu mähis (klemmid 0 ja 300) aga annab 300 V-se pinget.

Võrreldes tavalise transformaatoriga on autotransformaatoril samasuguse võimsuse puhul südamiku ristlõige väiksem ja mähistele kulutatakse vähem juhet. Terassüdamiketa või kõrgsagedusrauast südamikega autotransformaatoreid kasutatakse samuti kõrgsagedusvooluringides.

## 24. Kondensaatorid

Mistahes elektrit juhtival kehal on võimalik tekitada positiivset või negatiivset elektrilaengut. Mida suuremad on keha mõõted, seda suurem on tema *elektrimahtuvus* ehk lihtsalt *mahtuvus*, s. o. temale mahutatav elektrilaeng. Analoomiliselt sellega võib samasugusel rõhul suurema mahuga anumasse mahutada vastavalt suuremat hulka gaasi. Anuma maht määrab tema mahtuvuse, s. o. gaasi mahu. Ühel ja samal temperatuuril võib suurema massiga keha varuda suurema soojushulga. Järelikult määrab keha mass tema soojusmahtuvuse, s. o. soojusenergia mahu.

Elektrimahtuvuse suurust tähistatakse tähega *C*. Mahtuvuse mõõtmiseks on olemas mitu erisugust ühikut. Möödunud aastatel kasutati mahtuvuse ühikuna sentimeetrit, mida ei tule ära vahetada pikkuse sentimeetriga ning samuti ka ruut- ja kuupsentimeetriga. Mahtuvuse sentimeeter on ühe sentimeetrilise raadiusega metallkera mahtuvus.

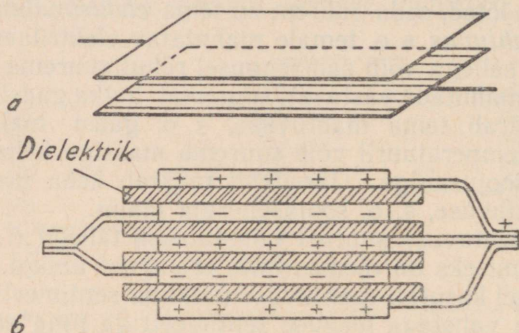
Nüüdisajal on mahtuvuse praktiliseks põhiühikuks *farad*, mida tähistatakse tähega *F*. Mahtuvus üks farad on väga suur ja seetõttu kasutatakse praktikas väiksemaid mõõtühikuid: faradi miljondikku osa *mikrofaradit*  $\mu\text{F}$  ja mikrofaradi miljondikku osa *pikofaradit* ( $\mu\mu\text{F}$  ehk  $\text{pF}$ ). Pikofaradi ja mahtuvuse sentimeetri vahel on olemas lihtne suhe:  $1 \text{ pF} = 0,9 \text{ cm}$  või  $1 \text{ cm} = 1,1 \text{ pF}$ .

Üksikul elektrijuhtmel on väike mahtuvus, kuid on olemas seadiseid, millel juhtmete väikeste mõõdede juures on väga tunduv mahtuvus ja mis võimaldavad võrdlemisi väikeste pingete puhul koondada suuri elektrilaenguid. Selliseid seadiseid nimetatakse *kondensaatoriteks*, lähtudes sõnast *kondensatsioon*, mis tähendab *tihendamine*.

Kondensaatori ülesandeks on elektrilaengu varumine. Lihtsaim kondensaator koosneb kahest metallplaadist, mis teineteisest on eraldatud isolatsioonikihiga, milleks võib olla õhk või mõni muu dielektrik (joon. 40). Plaadid lae-

takse üks positiivse ja teine negatiivse elektriga. Tugeva vastastikuse külgetõmbe tõttu hoiduvad laengud üksteise ligi ja seetõttu on võimalik kondensaatorisse koguda väga suuri elektrilaenguid.

*Mida suurem on plaatide pind, seda suurem on kondensaatori mahtuvus. Seejuures tuleb arvesse võtta ainult nn. tööpind, s. o. ühe plaadi selle osa pind, mille vastas asetseb teine plaat. Peale selle, mida lähemal on plaadid teineteisele, seda tugevam on elektrilaengute vastastikune külgetõmbumine ja seda suurem on kondensaatori mahtuvus. Näiteks on kahest 1 cm<sup>2</sup> pinnaga plaadist koosneva*



Joon. 40. Kahe ja rohkema plaatiga kondensaatori ehitus.

kondensaatori mahtuvus, kui õhugahe on 1 mm, veidi väiksem kui 1 pF. Dielektriku mõju mahtuvusele iseloomustab eriline suurus, mida nimetatakse *dielektrikukonstandiks*. Õhu puhul on ta väiksem, kuid tahkete või vedelate dielektrikute puhul on tema väärtus mitu korda suurem ja kondensaatori mahtuvus suureneb vastavalt. Kondensaatori mahtuvuse suurenemine õhu asendamisel teise dielektrikuga on toodud tabelis 3.

Kahest plaadist koosnevad kondensaatorid on kõlblikud ainult võrdlemisi väikese mahtuvuse jaoks, kuna plaatide pinna liigne suurendamine on tülikas. Muidugi võib mahtuvuse suurendamiseks plaatide vahelist kaugust vähendada, kuid ainult teatava piirini. Kui dielektriku kiht on väga õhuke, siis temast lööb elektrisäde läbi. *Mida suurem on kondensaatorile lülitatud pinge, seda paksem peab olema dielektrik.*

## Tahkete ja vedelate dielektrikutega kondensaatorite mahtuvused

Kondensaatori dielektrik	Mitu korda mahtuvus suureneb õhu asendamisel antud dielektrikuga
Vilk . . . . .	5—7
Kummi . . . . .	3,5
Tikond (keraamiline materjal) . . . . .	90
Raadioportselan . . . . .	6
Parafineeritud paber . . . . .	2,2

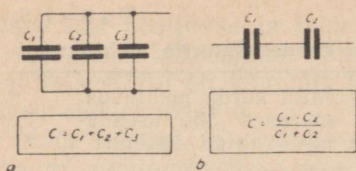
Kõiki kondensaatoreid proovitakse pärast valmistamist pingega. *Tööpinge*, mille juures kondensaator võib läbilöögi ohuta kestvalt töötada, peab *proovipingest* olema 2—3 korda väiksem. Tööpinge suurus sõltub *dielektriku läbilöögitugevusest*. Õhu läbilöögitugevus on väike ja temast lööb säde kergesti läbi. Tunduvalt suurem elektriline tugevus on tahketel dielektrikutel, näiteks vilgul, portselanil ja teistel.

Suurte mahtuvuste saamiseks ehitatakse mitmeplaadilised kondensaatorid, millel on kaks plaatide süsteemi (joon. 40 *b*). Kõik paarisarvulised plaadid on omavahel ühendatud ja moodustavad nagu ühe plaadi, paaritu arvulised plaadid aga ühendatakse samuti üksteisega ja on teiseks plaadiks. Kõigil sisemistel plaatidel töötavad mõlemad küljed, kuid äärmisi plaate kasutatakse ainult seestpoolt. Niisugune kondensaator nagu koosneks mitmest kaheplaadilisest kondensaatorist, millede arv on ühe võrra väiksem kui plaatide üldarv.

Kondensaatori dielektrik ei ole kunagi täiuslik. Elektronid siirduvad järk-järgult negatiivselt laetud plaadilt dielektriku kaudu teisele plaadile, moodustades väikese voolukao, mida nimetatakse *dielektriliseks kaoks*. Seetõttu kondensaatorisse mahutatud elektrihulk — laeng aegamööda väheneb.

Praktikas esineb sageli juhtumeid, kus kokku on ühendatud mitu kondensaatorit. Paralleelsel ühendamisel (joon. 41 *a*) võrdub üldine mahtuvus  $C$  üksikute kondensaatorite mahtuvuste summaga.

$$C = C_1 + C_2 + C_3.$$



Joon. 41. Kondensaatorite paralleel- ja järjestikühendus.

Järjestikku on ühendatud kaks ühesuguse mahtuvusega kondensaatorit (joon. 41 b), siis kogumahtuvus võrdub ühe kondensaatori poole mahtuvusega. Näiteks kahe à 200 pF mahtuvusega kondensaatori järjestikku ühendamisel on kogumahtuvus 100 pF. Kui järjestikku ühendatakse kaks erisugust kondensaatorit (joon. 41 b), siis kogumahtuvus määratakse valemiga:

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$

Näiteks, kui järjestikku on ühendatud kondensaatorid mahtuvusega 2000 pF ja 3000 pF, siis kogumahtuvus

$$C = \frac{2000 \cdot 3000}{2000 + 3000} = 1200 \text{ pF.}$$

Järjestikust ühendamist kasutatakse mõnikord juhul, kui on olemas kondensaatorid nõutavatest suurema mahtuvusega. Peale selle on järjestikusel ühendamisel üldine tööpinge suurem kui ühel kondensaatoril.

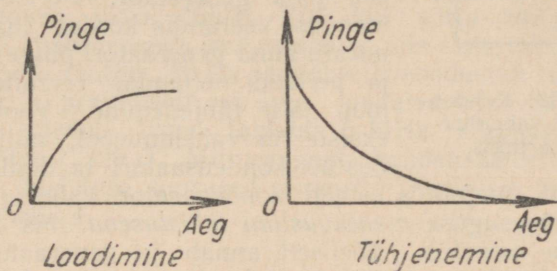
Kui kondensaator on lülitatud alalisvooluringi, siis on voolu pidev kulgemine vooluringis võimatu, kuna kondensaatori plaadid on üksteisest isolaatoriga eraldatud. Ainult lühikese aja vältel pärast vooluringi sulgemist kulgeb lühiajaline vool, mis laadib kondensaatori. Niipea kui kondensaator on täielikult laetud ja tema plaatidele rakendatud pinge muutub võrdseks vooluallika elektromotoorse jõuga, katkeb vool. Analoomiliselt sellega, kui pumba abil pumbata gaasi mingisugusesse suletud anumasse, siis niipea kui gaasi rõhk muutub võrdseks pumba poolt tekitatava rõhuga, katkeb gaasi edasine anumasse suubumine.

*Mida suurem on kondensaatori mahtuvus, seda aeglasmalt toimub ta laadimine, kuna temasse mahub rohkem*

elektrit. Ikkagi toimub laadimine tavaliselt sekundi mõne murdosa vältel. *Mida väiksem on vooluringi kondensaatoriga järjestikku lülitatud takistus, seda kiiremini toimub laadimine*, kuna saadakse tugevam laadimisvool. Kui takistus on väga väike, siis toimub laadimine peaaegu hetkeliselt.

Kui laetud kondensaator lahutada vooluallikast ja ühendada mingi takistiga, siis ta tühjeneb.

*Mida väiksem on kondensaatori mahtuvus ja takistus, seda kiiremini toimub tühjenemine.* Kondensaatori lühista-



Joon. 42. Pinge muutumise graafik kondensaatori laadimisel ja tühjendamisel.

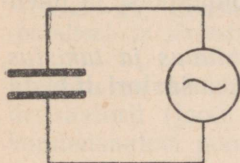
misel toimub tühjenemine peaaegu hetkeliselt. Tühjenemise ajal kondensaatorile lülitatud pinge langeb kuni nullini, mille järel katkeb ka vool. Joonisel 42 on kujutatud pinge tõusmise ja langemise graafikud kondensaatori laadimisel ja tühjenemisel.

Niisiis kondensaator alalisvoolu läbi ei lase. Ent kui kondensaator lülitada vahelduvvooluringi (joon. 43), siis kuigi elektronid ei suuda läbida kondensaatori dielektrikut, ilmneb vooluringis siiski vool. Seetõttu tavaliselt öeldakse, et *kondensaatorit läbib vahelduvvool*.

Kui pinge generaatori klemmidel tõuseb, siis toimub kondensaatori laadimine ja vooluringi läbib laadimisvool. Energia kandub generaatorist üle kondensaatorisse ja akumulereb viimases elektrilaengu kujul. Kondensaatorile rakendatud pinge tõuseb ja ulatub teataval momendil kuni generaatori maksimumväärtuseni. Sel momendil on kondensaator täielikult laetud ja laadimisvool katkeb. Pärast seda hakkab generaatori pinge vähenema. Ja kuna kondensaator oli laetud kuni amplituudpingeni, siis tühjeneb ta

nüüd generaatorisse tagasi, andes varutud energia viimasele.

Kondensaatori tühjenemisel on voolu suund vastupidine laadimisvoolu suunaga. Teatud momendil, kui pinge langeb nullini, tühjeneb kondensaator täielikult.



Joon. 43. Kondensaator vahelduvvooluringis.

Seega perioodi esimeses veerandis on kondensaator tarbijaks ehk generaatori koormuseks, kuna perioodi teises veerandis on ta ümberpöörduvalt ise generaatoriks ja tarbija osas esineb juba generaator. Perioodi kolmandas veerandis kordub laadimine uuesti, kuna generaatori pinge tõuseb, ja perioodi neljandas veerandis toimub jälle tühjenemine. Vooluringis eksisteerib vahelduvvool, mille moodustab kondensaatori laadimis-tühjenemisvool. Seejuures esineb kondensaator vahelduvvooluringis mõnesuguse *mahtvusliku takistusena*, mis on puhtreaktiivne takistus. Tõeliselt annab ju generaator oma energiat kondensaatorile ainult laadimise puhul, kuna tühjenemisel annab kondensaator selle energia täielikult tagasi. Kondensaatoris ei tarbita tagastamatut energiakulu.

Kondensaatoriga ühendatud vooluringi vool sõltub generaatori pingest, kondensaatori mahtvusest ja sagedusest. Voolu olenevus pingest on tavaline, mis järgneb Ohmi seadusest: mida kõrgem on generaatori pinge, seda tugevam on vool. Kui kondensaatori mahtuvust suurendada, siis laadimis-tühjenemisvool tugevneb, kuna suurema mahtuvuse puhul varub kondensaator suurema laengu. Kuid voolu tugevnemine on samaväärne takistuse vähendamisega. Seega *kondensaatori mahtuvuse suurenemisel mahtvuslik takistus väheneb*.

Kõrgema sageduse puhul toimub laadimine ja tühjenemine kiiremini, s. o. kindel elektrihulk läbib juhtmeid lähematel ajavahemikel ja seetõttu vool tugevneb. Voolu tugevnemine aga on samaväärne takistuse vähenemisega. Seega *sageduse tõusuga mahtvuslik takistus väheneb*. Nagu näha, on sageduse mõju mahtvuslikule ja induktiivtakistusele täiesti vastupidine.

Mahtvuslikku takistust tähistatakse  $X_C$  ja tema suurust oomides võib ligikaudu arvutada valemiga

$$X_C = \frac{160\,000}{f \cdot C}$$

kus  $f$  on sagedus hertsides ja  $C$  mahtuvus mikrofaradites.

Näiteks, arvutame kondensaatori mahtuvustakistuse, kui tema mahtuvus on 50 Hz sageduse puhul 1  $\mu\text{F}$ . Saame  $160\,000 : 50 = 3200 \Omega$ . Sellesama kondensaatori takistus on 5 MHz puhul 100 000 korda väiksem, kuna sagedus on 100 000 korda suurem. Takistuse suurus on sel juhul 0,032  $\Omega$ . Seega kujutab 1  $\mu\text{F}$  mahtuvusega kondensaator kõrgsageduse jaoks lühist. Ent kui võtta 100 pF ehk 0,0001  $\mu\text{F}$  mahtuvusega kondensaator, siis selle takistus on 10 000 korda suurem. 50 Hz sagedusele moodustab takistuse 32 M $\Omega$ , s. o. praktiliselt ei lase madalsagedusvoolu läbi. See-eest võrdub tema takistus 5 MHz kõrgsagedusele ainult kõigest 320  $\Omega$ . Mitmesuguste kondensaatorite mahtvusliku takistuse suurused erinevate sageduste puhul on antud tabelis 4.

Tabel 4

**Kondensaatorite mahtuvustakistused (oomides)**

Sagedus	Mahtuvus					
	10 pF	100 pF	1000 pF	10000 pF	0,1 $\mu\text{F}$	1 $\mu\text{F}$
50 Hz	320 M $\Omega$	32 M $\Omega$	3,2 M $\Omega$	320 000	32 000	3200
1000 „	16 „	1,6 „	160 000	16 000	1600	160
200 kHz	80 000	8000	800	80	8	0,8
1000 „	16 000	1600	160	16	1,6	0,16
10000 „	1600	160	16	1,6	0,16	0,016

Kõrvuti induktioonpoolidega leiavad kondensaatorid raadiotehnikas laialdast kasutamist. Väikese mahtuvusega (kümnete ja sadade pikofaradite piirides) kondensaatorid on ette nähtud kõrgsagedusvoolude läbilaskmiseks. Madalsagedusvoolude juhtimiseks kasutatakse suure mahtuvusega (mikrofaradite osade ja mikrofaradite piirides) kondensaatoreid.

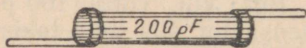
Sageli kasutatakse kondensaatoreid alalisvoolu ja vahelduvvoolu, samuti ka kõrgsagedus- ja madalsagedusvoolu teineteisest eraldamiseks. Näiteks, kui lülitada mingisse vooluringi väikese mahtuvusega kondensaator, siis see ei lase alalisvoolu läbi ja peaaegu ei lase madalsagedusvoolu

läbi, kuna nende jaoks on kondensaatori takistus suur. Kuid kõrgsagedusvool läbib sellise kondensaatori vabalt.

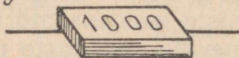
Kõik kondensaatorid jagunevad püsiva ja muudetava mahtuvusega kondensaatoriteks. Dielektriku liigi järgi tunatakse õhk-, keraamilisi, vilk-, paber- ja elektrolüüt-kondensaatoreid. Mõnede püsiva mahtuvusega kondensaatorite väliskujud on toodud joonisel 44.

Igas kondensaatoris tekivad energiakaod, kuigi väga tähtsusetud. Õhk praktiliselt ei anna kadusid, kuid temast

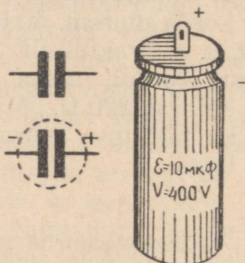
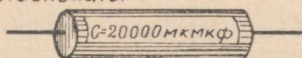
*Keraamiline kondensaator*



*Vilgukivikondensaator*



*Paber- või elektrolüütiline kondensaator*



Joon. 44. Mõnede püsiva mahtuvusega kondensaatorite väliskuju ja nende kujutamine skeemidel.

lööb säde kergesti läbi. Seetõttu ei ehitata suure mahtuvusega ja kõrge tööpingega õhkkondensaatoreid.

Õhkkondensaatoreid valmistatakse ainult juhtudel, kui on tarvis tagada energiakadude puudumist. Neid leidub peaaegu eranditult ainult raadiosaatjates. Kõrgepingete jaoks tuleb nad ehitada küllalt suure plaatide vahekaugusega.

Viimasel ajal on laialdast kasutamist leidnud keraamilised kondensaatorid. Nendes on erilisest keraamilisest portselanitaolisest materjalist plaadikesed või torukesed, mis kahelt poolt on kaetud metallikihiga. Keraamilistes kondensaatorites on energiakaod väikesed ja nad peavad kõrgepingele hästi vastu. Nende mahtuvus ulatub mõnest pikofaradist kuni tuhandete pikofaraditeni. Neid kasutatakse peamiselt kõrgsagedusvooluringides.

Vilkkondensaatorid valmistatakse vilguplaadikestest ja stanniollehtedest ning nende mahtuvus ulatub kuni kümnetuhande pikofaradini. Võrreldes keraamiliste kondensaato-

ritega on nendel energiakaod suuremad. Paber kondensaatorites kasutatakse dielektrikuks parafineeritud paberit ja laengu kandjana stanniolribasid. Nendel kondensaatoritel on suur mahtuvus kuni mitme mikrofaradini ja neid kasutatakse madalsagedusvooluringides, sest kõrgsagedusel esineb nendes tunduv energiakadu.

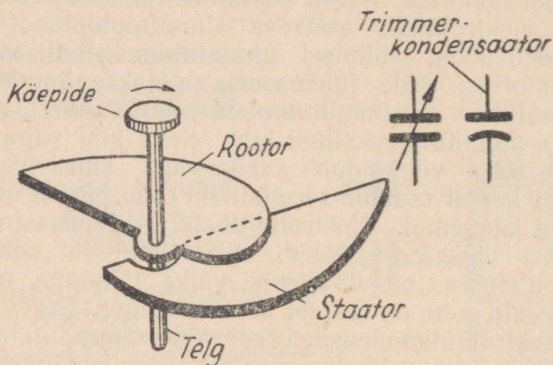
Veel suuremate mahtuvuste jaoks kümnete, sadade ja isegi tuhandete mikrofaradite ulatuses, kasutatakse elektrolytkondensaatoreid. Nende töötamise põhimõte seisab selles, et elektrolüüdis asetseva alumiiniumplaadi pinnale tekib elektrivoolu läbimisel alumiiniumoksüüdi kiht, mis on isolaatoriks. Selle tulemusena saadakse kondensaator, mille plaatideks on alumiiniumleht ja elektrolüüt, dielektrikuks aga alumiiniumoksüüdi kiht. Selle kihi väga väikese paksuse tõttu võimaldub saada väga suuri mahtuvusi. Läbilöögi korral taastub oksüüdikiht ise pärast seda, kui pinge on alanenud. Elektrolüütistel kondensaatoritel on võrdlemisi väikesed mõõted, väike kaal ja odav hind. Nende puuduseks on võrdlemisi väike tööpinge, mitte üle 500 V. Peale selle on nendel suur kaotegur. Praegu toodetavaid elektrolütkondensaatoreid võib kasutada ainult nendes vooluringides, milledes on alalispinge, kusjuures nende lülitamisel tuleb järgida polaarsust. Nad valmistatakse enamasti alumiiniumkestades. Madalapingelised elektrolütkondensaatorid toodetakse pappkestades.

Vilkkondensaatorid pressitakse välismõjude kaitseks plastmassi. Paber kondensaatoritel on kaitseks kas papist või metallist kere. Kondensaatoreile märgitakse nende mahtuvus, mahtuvuse suuruselt võimalikud kõrvalekaldu mised protsentides (näiteks  $\pm 10\%$ ), tööpinge ja proovipinge. Elektrolütkondensaatoritele märgitakse maksimumpinge, mille juures võib toimuda läbilööki, samuti tingimata märgitakse poolused. Kui kondensaatoril on alumiiniumkere, siis on see alati miinuseks.

Peale püsiva mahtuvusega kondensaatorite leiavad raadiovastuvõtjate ja teiste raadioseadiste häälestamiseks laialdast kasutamist muudetava mahtuvusega kondensaatorid. Need valmistatakse tavaliselt õhk-, harvemini tahke dielektrikuga. Joonisel 45 on toodud selliste kondensaatorite ehituse põhimõte ja skemaatiline kujutus.

Muudetava mahtuvusega kondensaatoril või üldisema nimetusega pöördkondensaatoril on paigalseisvate plaatide süsteem, mida nimetatakse staatoriks, ja teljele kinnitatud

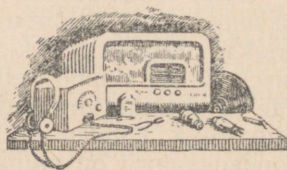
liikuvate plaatide süsteem, mida nimetatakse rootoriks. Kondensaatori telje pööramisel käepideme abil käivad liikuvad plaadid suuremal või vähemal määral paigalseisvate plaatide vahelistesse vahemikesse, mistõttu kondensaatori mahtuvus suureneb. Joonistuse lihtsustamiseks on joonisel 45 näidatud ainult üks paigalseisev ja üks liikuv plaat asendis, mis vastab mahtuvuse teatavale suurusele, mis on keskmine suurima ja väikseima mahtuvuse vahel. Muutuva



Joon. 45. Muudetava mahtuvusega kondensaatori (pöördkondensaatori) ehituse põhimõte ja tema kujutamine skeemidel.

mahtuvusega kondensaatorite mahtuvus tavaliselt võib muutuda mõnestkümnest kuni mõnesaja pikofaradini, näiteks 10 kuni 400 pF.

Kasutatakse veel väikseid muudetava mahtuvusega kondensaatoreid, mis koosnevad kõige sagedamini kahest plaadist, millede mahtuvus muutub väikestes piirides, näiteks 4 kuni 40 pF. Neid nimetatakse trimmer- ehk järelhäälestuskondensaatoriteks ja tähistatakse skeemidel selliselt, nagu on kujutatud joonisel 45.





## LÕPPSÕNA

Kõik, mis selles brošüüris on käsitletud, on elektrotehnika tundmaõppimise aluseks. Mistahes raadiolülituse moodustab mitme elektrivooluringi kindel kombinatsioon, mis suguste vooluringide töötamisest võib ainult sel juhul aru saada, kui elektrotehnika põhilised seadused on hästi omandatud.

Raadiolülituste kõige tähtsamateks detailideks on mitmesugused poolid, kondensaatorid, takistid, transformaatorid. Kui lugeja tähelepanelikult süvenes brošüüris käsitletud raadiodetailide töötamise põhimõtetele ja omadustele, siis tal ei ole raske aru saada sellest, kuidas need detailid raadioaparatuuri skeemides töötavad.

Algaja raadioamatöör peab enesele seadma ülesandeks omandada kindlaid teadmisi elektrotehnika alustest ja neid iga päev täiendama. Iga tehniliselt kogunud raadioamatöör, kes tunneb teooria aluseid ja oskab teoreetilisi teadmisi rakendada praktilises töös, on väärtuslikuks spetsialistiks ja võib meie Kodumaa raadioasjandusele osutada suurt abi.

Eelloetus toodud teadmisi aitavad süvendada allnimetatud eesti keeles ilmunud raamatud:

A. F. Joffe «Elektrilaeng». RK «Teaduslik Kirjandus», Tartu 1947. a.

V. A. Mezentsev «Elektriline silm». Eesti Riiklik Kirjastus, Tallinn 1950. a.

D. Vardja, E. Vannas «Noor elektrik». Eesti Riiklik Kirjastus, Tallinn 1952. a.

K. Gladkov «Kaugnägemine». Eesti Riiklik Kirjastus, Tallinn 1952. a.

H. Esop ja teised «Üldine elektrotehnika». RK «Teaduslik Kirjandus», Tartu 1949. a.

A. Isotamm «Raadioamatööri käsiraamat», Eesti Riiklik Kirjastus, Tallinn 1950. a.

A. Kaskneem «Arvutusi elektrotehnikas». Eesti Riiklik Kirjastus, Tallinn 1952. a.

## SISUKORD

Sissejuhatus . . . . .	3
I peatükk. Elektrivool . . . . .	5
1. Elektronid ja elektrilaengud . . . . .	5
2. Elektrivool . . . . .	6
3. Elektrivoolu mõõtmine . . . . .	7
4. Pinge ja selle ühikud . . . . .	8
5. Pinge mõõtmine . . . . .	9
6. Elektrivooluallikad . . . . .	9
II peatükk. Elektrivooluring ja selle seadused . . . . .	13
7. Elektrivooluring . . . . .	13
8. Elektriline takistus . . . . .	14
9. Ohmi seadus . . . . .	16
10. Järjestikühendus . . . . .	20
11. Ohmi seadus kogu vooluringile . . . . .	22
12. Paralleelühendus . . . . .	26
13. Elektrivoolu võimsus ja töö . . . . .	31
14. Elektrivoolu soojuslik toime . . . . .	34
15. Takistid, reostaadid ja potentsiomeetrid . . . . .	36
III peatükk. Elektromagnetilised nähtused . . . . .	40
16. Püsivmagnetid ja nende omadused . . . . .	40
17. Elektromagnetid ja nende kasutamine . . . . .	43
18. Elektromagnetiline induktsioon . . . . .	46
IV peatükk. Vahelduvvool ja selle kasutamine . . . . .	50
19. Vahelduvvoolu mõiste . . . . .	50
20. Vahelduvvoolu perioodilisus ja sagedus . . . . .	53
21. Pulseerivvool . . . . .	54
22. Induktsioonpoolid . . . . .	56
23. Transformaatorid ja autotransformaatorid . . . . .	64
24. Kondensaatorid . . . . .	69
Lõppsõna . . . . .	79

Toimetaja A. Kaskneem.

Kaane kujundus N. Tomassov.

Tehniline toimetaja E. Plaks.

Korrektorid P. Hiie ja M. Sepp.

Ladumisele antud 26. X 1952. Trükkimisele antud 19. I 1953. Paber 54×84 sm, 1/16. Trükiarv 8000. Trükipoognaid 5. Formaadile 60×92 kohaldatud trükipoognaid 4,1. Arvutuspoognaid 4,33. Tellimise nr. 6795. MB-00015. Trükikoda „Kommunist“, Tallinn, Pikk 2.

На эстонском языке.

Hind rbl. 1.30.

Rbl. 1.30

A-19540  
M

TÜ RAAMATUKOGU



1 0300 00366431 7