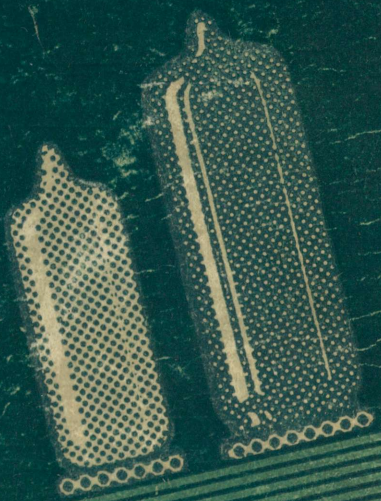
H. PEDUSAAR

ELEKTRO- JA RAADIO-TEHNIKA

algajaile



51945

Tagastage raamat õigeaegselt!
Возвратите книгу вовремя!

Н. Н. 1154. II 65. 100.000.

A-22498

H. PEDUSAAR

ELEKTRO- JA RAADIOTEHNIKA ALGAJAILE

EESTI RIIKLIK KIRJASTUS
TALLINN 1959

Teos on mõeldud ettevalmistuseta või vähese ettevalmistusega elektri- ja raadiohuvilistele, nagu iseõppijatele ja ALMAVÜ vastavatest kursustest osavõtjatele, samuti ka abivahendiks tehnikumide ning tehniliste koolide mitte-elektrotehniliste erialade ja üldharidus-like õppeasutuste õpilastele füüsika kursuse omandamisel. Matemaatiliste valemite kasutamisel pole rõhku pandud nende tuletamisele, vaid sisulisele selgitamisele ja praktilisele rakendamisele. Põhivalemeid saadavad arvutusnäited ja ülesanded. Õpiku lisas on antud algmõisteid nomograafiast ja olulisemate valemite nomogramm-yasted.

Olles omandanud teoses pakutava materjali, saab lugeja takistamatult asuda spetsiaalsema elektro- või raadiotehnilise kirjanduse läbitöötamisele.

N
Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu
51945

TARTU ÜLIKOOLI
RAAMATUKOGU

SAATEKS

Käesoleva elektro- ja raadiotehnika õpiku koostamisel on silmas peetud peamiselt algajate ja vähem edasijõudnud raadiohuviliste vajadust vastavasisulise eestikeelse teose järele, mis võimaldaks tutvuda elektrotehnika ja kaasaegse raadiotehnika alustega. Liigsest matemaatikast hoidumisega ning praktikas tarvilike valemite igakülgse tutvustamisega peaks olema tagatud õpiku arusaadavus ka 5- kuni 6-klassilise üldharidusliku ettevalmistusega noorele lugejale.

Materjal on antud õpikus sellises metoodilises järjestuses ja hulgal, mis vastab ka ALMAVÜ ja kultuuri- ning õppeasutuste arvukate tehnika-alaste klubide ning ringide vajadustele mitmesuguse profiiliga elektro- ja raadiotehniliste kursuste läbiviimisel. Samuti on raamat kasutatav üldhariduslike koolide ja mitte-elektrotehniliste kesk-eriõppeasutuste õpilaste poolt abivahendina füüsika kursuse vastavate osade omandamisel ning praktikumide ja laboratoorsete tööde läbiviimisel. Kõige selle kõrval on ka täiesti mõeldav algaja raadiohuvilise iseseisev töö käesoleva õpikuga.

«Elektro- ja raadiotehnikas algajaile» ei käsitleta lühi- ja ultralühilaine-tehnika iseärasusi ning televisiooni aluseid, samuti ka transformaatorite, võnkeringide jm. lülituselementide arvutamist, sest see väljuks algajatele määratud teose raamidest.

Elektrotehnikast antakse ülevaade sellises ulatuses, mis on vajalik edasise materjali omandamiseks. Lisaks sellele on ühe peatüki ulatuses vaadeldud tugevvooluseadiseid, elektriaparaate ning elektri tööstusliku rakendamise mõningaid küsimusi. Raadiotehnika osas on pisut suuremal määral rõhutatud helivõimendus- ja elektroakustilisi seadiseid käsitlevaid peatükke, sest valdav osa raadiohuvilistest tegutseb ka helijäädvustustehnikaga. Küllaltki põhjalik on peatükk raadiopraktikas kasutatavatest elektrimõõtmistest.

Esimese osa peatükkide lõpus on toodud vastused kordamisküsimustele («Olulisim»), mis peaks soodustama vastava materjali omandamist. Valemite tarvitamise selgitamiseks on tekstis rida arvutusnäiteid ja ülesandeid. Tähtsaimad valemid on ülevaatlikkuse mõttes koondatud vastavatesse tabelitesse. Raamatu lisana on käsitletud nomograafilisi arvutusvahendeid ning too-

dud kolm nomogrammi tähtsaimate elektriliste suuruste määramiseks.

Pärast käesoleva õpiku materjali omandamist ei tohiks algajal enam olla raskusi spetsiaalsema raadio- või elektrotehnilise kirjanduse juurde asumisel, samuti ka praktiliseks tegevuseks raadioamatöörina.

Loen oma meeldivaks kohuseks tänada kõiki, kes osutasid kaasabi käesoleva õpiku käsikirja viimistlemisel, eriti aga A. Isotamme, tehniliste teaduste kandidaati H. Sillamaad ning insenere I. Treikelderit ja A. Põdrust väärtuslike metoodiliste näpunäidete eest.

Autor

I OSA

ELEKTROTEHNIKA

1. PEATÜKK

ELEKTROTEHNIKA JA ELEKTRISIDE ARENGUST

§ 1. SISSEJUHATUSEKS

Oleme eneselegi märkamatult astunud ajastusse, mil on teoks saanud inimkonna ammune unistus — lend Kosmoses. 1957. aasta kanti ajalooraamatusse nimetuse all «sputniku aasta». Aga juba 1959. aasta esimestel päevadel hämmastas tervet maailma NSV Liidus väljalastud esimese kosmoseraketi jõudmine orbiidile Päikese ümber. Ja pole raske ennustada, mida toovad lähemad aastad, rääkimata aastakümnetest. Kõik, mis veel üsnagi hiljuti oleks tundunud teadusliku fantastikana, on nüüd saanud reaalsuseks.

Kõige selleni jõudmine poleks olnud mõeldav elektri kasutamiseta. Maakera on kattunud astronoomiliste arvudeni küündiva pikkusega elektrijuhtmestikuga nii õhuliinides kui ka vee- ja maa-alustes kaablites. Elekter on astunud meie ellu mitmekülgse ja asendamatu igapäevase abilisena.

Nõukogudemaa tormiliselt areneva tööstuse, põllumajanduse ja transpordi pidevalt suureneva energiavajaduse rahuldamiseks luuakse üha uusi elektrijaamu. Meiegi vabariigis asus 1955. aastal käiku üks uutest elektrijaamadest — Narva jõel asuv võimas hüdroelektrijaam. Peatselt valmib Balti Soojuselektrijaam, mille võimsus tuleb mitu korda suurem meie vabariigis seni töötavate elektrijaamade koguvõimsusest.

Suursündmuseks maailma teaduse ajaloos kujunes aga 1954. aastal esimese aatomienergial töötava elektrijaama käikulaskmine Moskva läheduses. Sellega astus Nõukogude Liit suure ja hinnatava sammu aatomienergia rahuotstarbelise kasutamise alal.

Tee selliste saavutusteni on olnud pikk ja pingeline. Saja-aastane areng esimesest traattelegraafist kaasaegse televisiooniseadmeni, esimesest algelisest elektrimasinast kuni mitmesaja tuhande kilovatise võimsusega elektrigeneraatoriteni on olnud tulvil suurepäraseid saavutusi.

Kuigi üksikuid elektrilisi nähtusi tundsid juba kahe ja poole

tuhande aasta eest vanad kultuurrahvad Vahemeremaades, on teaduslik uurimistöö sel alal veel üsna noor. Kogu kaasaegse tehnika lahutamatu osa — elektrotehnika — sünniajaks on 18. sajandi lõpuaastad ja 19. sajandi algus, mil teadus rikastus suurte, põhjapanevate avastustega elektri ja magnetismi alal. Itaalia looduseuurija Alessandro Volta (1745—1827) valmistas siis esimese rahuldavalt töötava keemilise vooluallika, nn. «volta samba». Pisut hiljem leiutas vene akadeemik Vassili Petrov (1761—1834) kaarleegi ja osutas selle rakendamise võimalustele valgustamisel ja metallurgias.

Suurepäraseid uurimisi teostas oma ajastu mitmekülgseim õpetlane Mihhail Lomonossov (1711—1765) atmosfäärielektri nähtuste alal ja püstitas nende tekkimise kohta teravmeelse teooria.

Huvitav on märkida, et esimesena rakendati elektrit ulatuslikumaks praktiliseks otstarbeks just sidetehnika valdkonnas — telegraafiside loomiseks. Esimese elektromagnetilise telegraafi süsteemi töötas välja ja rakendas praktikasse 1832. aastal vene õpetlane P. L. Šilling; esimese isetrükkiva telegraafiaparaadi valmistas 1850. aastal omaaegne väljapaistev vene elektrotehnik ja esimese suure elektrimasina konstruktor akadeemik B. S. Jakobi.

1873. aastal püstitas inglise füüsik J. C. Maxwell oma tööga «Treatise on Electricity and Magnetism» elektromagnetiliste lainete teooria. Ta näitas matemaatiliselt, et elektromagnetilised lained esinevad reaalsuses ja et valgus ning soojuskiirgus on elektromagnetiliste lainete avaldused. Maxwelli teooria kinnitas katseliselt 14 aastat hiljem noor Karlsruhe Tehnikaülikooli füüsikaprofessor Heinrich Hertz.

Suur vene õpetlane Aleksander Stepanovitš Popov tegi mööndunud sajandi lõpul kogu sajandi tähtsaima avastuse — toetudes Maxwelli teooriale ja Hertzi katsetele näitas ta esimesena, et elektromagnetilisi laineid on võimalik kasutada sidepidamiseks ühendusjuhtmete abita.

Tuleb märkida, et Popovi leiutis ei kandnud juhuslikku iseloomu, vaid oli geniaalse uurija-teadlase aastatepikkuse järjekindla loova töö vili. Popovil kujunes esimesena välja kindel ja õige seisukoht elektromagnetiliste lainete rakendamise võimalustest signaalide traadituks üleandmiseks.

Kahjuks ei suhtunud mahajäänud tsaari-Venemaa tolleaegsed valitsevad ringkonnad Popovi leiutisse kuigi tõsiselt. Ei suudetud ega tahetudki mõista kodumaise teadlase tööde tähtsust ja Popovile ei antud nimetamisväärset materiaalset toetust. Alles Suure Sotsialistliku Oktoobrirevolutsiooniga tekkis põhjalik pööre raadio tähtsuse hindamises. Sellest ajast said Popovi suure elutöö jätkajad, eesrindlikud nõukogude raadioeriteadlased kõik võimalused igakülgseks loovaks uurimistööks sellel veel üsna noorel teadusalal.

§ 2. RAADIOTEHNIKA AJALOOST

Rohkem kui kuuskümmend aastat on möödunud ajast, mil konstrueeriti esimesed traadita telegrafeerimist võimaldavad seadmed ja rakendati need praktiliselt tegevusse. 7. mail 1895. aastal esines noor Peterburi füüsik, Kroonlinna Miinikooli õppejõud Aleksander Stepanovitš Popov Vene Füüsika-Keemiaühingu koosolekul ettekandega, mis kandis väga tagasihoidlikku nimetust: «Elektrivõnkumiste mõjust metallipulbritele». Kuid see tagasihoidlik ettekanne tähistas uue ajastu — raadioajastu — algust kogu maailma tehnika ajaloos.

Aleksander Stepanovitš Popov sündis 4. (16.) märtsil 1859. aastal ühes väikeses Uraali metallitööliste asunduses. Juba varakult osutas andekas noormees suurt tähelepanu tehniliste teaduste, eriti aga füüsika ja elektrotehnika vastu. 1877. aastal astus A. S. Popov Peterburi Ülikooli füüsika-matemaatika teaduskonna matemaatikaosakonna üliõpilaseks. Vaatamata äärmiselt raskele materiaalsele olukorrale, mille tõttu kulus palju aega ja energiat elatusvahendite hankimiseks, alustas õpihimuline nooruk varakult iseseisvat teaduslikku tööd. Saanud neljanda kursuse üliõpilaseks, täitis Popov juba professori assistendi ülesandeid.

1883. aastal lõpetas A. S. Popov ülikooli eeskujulike hinnetega ja asus tööle Kroonlinna Miinikooli füüsikaõpetajana. Otsese õppetöö kõrval teostas Popov ulatuslikke uurimisi elektrotehnika ja magnetismi alal. Selles õppeasutuses oli muide noore teadlase kasutada tolleaegse Venemaa parim füüsikakabinet.

Niipea kui 1888. aastal ühes elektrotehnilises ajakirjas ilmusid märkmed Heinrich Hertzi poolt tehtud katsete üle elektromagnetiliste lainete valdkonnas, asus ka Popov lähemalt uurima nende lainete iseloomu. Temal oli juba varakult kujunenud kindel arusaamine elektromagnetiliste lainete ulatusliku kasutamise võimalustest traatide vahenduseta side alal.

Popov saavutas uurimistöös hiilgavaid tulemusi. Katsetades 1894. a. oma elektromagnetiliste lainete indikaatoriga, märkas Popov, et seda aparaati võib kasutada meteoroloogiliseks otstarbeks: seade registreeris atmosfääris arenevaid elektrilisi nähteid. Sellest tingituna nimetaski A. S. Popov oma aparaati — maailma esimest raadiovastuvõtjat — «äikeseregistreerijaks».

Ülalmainitud ettekandes Vene Füüsika-Keemiaühingus avaldas Popov esmakordselt oma uurimistöö tulemused ja demonstreeris sealjuures «äikeseregistreerijat». Elektromagnetilisi laineid tekitas eriline seade, Popovi poolt täiendatud Hertzi vibraator; lainete olemasolu tegi kindlaks Popovi aparaat. Oma ettekandes avaldas Popov veendumust, et tema aparaat on kasutatav traadita telegrafeerimise otstarbeks. Mõni kuu hiljem, 1895. aasta septembris, märkiski juba Popov äikeseregistreerija abil signaalid telegraafiaparaadi lindile — «äikeseregistreerija» oli selleks ajaks lõplikult muutunud raadiotelegraafi vastuvõtjaks.

1896. aasta märtsis demonstreeris Popov oma raadiovastuvõtjat Vene Füüsika-Keemiaühingu istungil Peterburi Ülikoolis, kus anti morse tähestiku abil edasi traadita telegramm 250 meetri kaugusele ühest hoonest teise.

Saate- ja vastuvõtuseadmete täiendamine võimaldas tõsta nende tegevusulatust. 1897. aasta kevadel saavutati Kroonlinna reidil ühendus juba 640 meetri kaugusel asuvate laevade vahel. Sama aasta suvel Popovi lähim kaastööline ja sõber Pavel Nikolajevitš Rõbkin andis telegramme edasi juba viiekilomeetrilises raadiuses. Sajandi vahetusel loodi traadita telegraafi ühendus Soome lahes karile sõitnud soomusristleja «Kindraladmiral Apraksin» ja neljakümne kilomeetri kaugusel asuva Suursaari vahel laeva päästetööde läbiviimiseks.

Aleksander Stepanovitš Popov jätkas raadioseadmete täiendamist ja sellealast uurimistööd, kuni seda katkestas tema ootamatu surm 13. jaanuaril 1906. a.

Päeva, millal A. S. Popov esmakordselt avaldas ametlikult oma katsete tulemused, 7. maid, tähistatakse Nõukogude valitsuse otsusel igal aastal Üleliidulise Raadiopäevana.

§ 3. RAADIOTEHNIKA NÕUKOGUDE LIIDUS

Juba esimestel päevadel pärast nõukogude võimu loomist hakati Venemaal raadiotehnika tähtsust õigesti hindama. Vladimir Iljitš Lenin oli isiklikult väga huvitatud raadioala igakülgsest arendamisest. Tema otsesel ülesandel loodi Nižni-Novgorodis esimene nõukogude raadiolaboratoorium, mis hakkas M. A. Bontš-Brujevitši juhtimisel tegelema traadita side tehnika teoreetiliste ja praktiliste küsimustega.

Vladimir Iljitš Lenin juhtis tähelepanu raadiole kui «ajalehele ilma paberita ja kauguseta», kui kolossaalse tähtsusega vahendile laiade rahvamasside poliitilisel kasvatamisel ja revolutsioonilise valvsuse tõstmisel. «Tänu raadiole,» kirjutas V. I. Lenin, «kuulevad kõik Moskvas loetavat ajalehte.» Masside organiseerimiseks kasutas Nõukogude valitsus raadiotelegraafi juba 1917. aastal. Järgnevatel aastatel juhtisid partei ja valitsus plaanikindlalt ning süstemaatiliselt meie raadiotööstuse loomist, uute raadiojaamade ehitamist ja Punaarmee osade varustamist raadioseadmetega. Lenini algatusel alustas 1922. aastal tegevust meie esimene ringhäälingujaam — 12-kilovatise võimsusega Kominterni-nimeline saatja Moskvas. Sellest ajast algas meie raadiotööstuse, ringhäälingu ja raadioamatörismi areng. Märkida tuleb, et Kominterni-nimeline saatja oli tol ajal võimsaim maailmas. Selle jaama konstrueerisid Nižni-Novgorodi raadiolaboratooriumi töötajad Bontš-Brujevitši juhatusel.

Edasi valmis 1929. aastal Moskvas uus 100-kilovatise võimsusega saatja, mille konstrueeris A. L. Mints, ja 1933. aastal 500-

kilovatise võimsusega saatja. Suure Isamaasõja alguseks oli Nõukogude Liit juba esikohal Euroopas ringhäälingujaamade koguvõimsuse alal.

Meil teeb ringhääling rahvamassidele kättesaadavaks parimad muusika-, kirjandus- ning dramaturgiateosed, aidates seega kaotada erinevust suurte keskuste ja väikeste eraldatud punktide kultuuritaseme vahel. Moskva keskraadiosaatjad annavad kolme erineva programmi kaudu päevas ligi poolsada kontserti, rida ühiskondlik-poliitilisi, kirjanduslik-dramaatilisi ning lastesaateid. Nendele lisanduvad veel arvukad kohalikud programmid, mis on kohandatud vastavalt kohalikele vajadustele. Meie raadiotööstus toodab igal aastal miljoneid raadio- ja televisioonivastuvõtjaid. Raadio ja televisioon on meil kindlalt astunud laiade rahvamasside igapäevasesse ellu.

Kõik need edusammud teostusid tänu maa industrialiseerimise poliitikale, mis lõi eeldused võimsa ja välisriikidest sõltumatu kodumaise raadiotööstuse loomiseks.

Juba 1907. aastal avastasid vene raadiospetsialistid kaasaegse televisiooni põhimõtted ning ehitasid 1911. aastal televisiooniseadmete töötavad mudelid. Nõukogude teadlased jätkasid neid töid ja praegu on juba loodud uued täiuslikud seadmed — ülitundlikud televisioonikaamerad, mis võimaldavad teostada rahuldava kvaliteediga kujutise ülekannet ka nõrga valgustuse juures väljaspool stuudiot, ning head saate- ja vastuvõtuaparaadid, mis tagavad ülekantava kujutise loomulikkuse.

Televisioonikeskused töötavad paljudes meie linnades. Lühikese aja vältel lisandub nende nimistule veel kümneid uusi saatjaid. Praegu aga käib intensiivne töö värvilise ja ruumilise (stereoskoopilise) kaugnägemise probleemide lahendamiseks.

Raadiotööstuses, seadmete ekspluatatsiooni alal ja teaduslikes uurimisasutusis töötavad nõukogude raadiospetsialistid annavad pidevalt raadiotehnika varasalve uusi väärtuslikke panuseid raadiotehnika noorte harude — raadiolokatsiooni, raadioastronoomia, raadiogeoloogia, elektroonika arendamise ning pooljuhtseadiste viimistlemise ja rakendamise alal jm. Raadiolainete levimist on uurinud akadeemikud V. A. Fok, L. I. Mandelstam jt.; antennide teooria arendajaiks on akadeemikud M. V. Šuleikin, A. A. Pistolkors jt. Raadiotehnikast väljakasvanud iseseisva teadusala — ülikõrgete sageduste tehnika alal on juhtiv osa nõukogude õpetlastel akadeemik B. A. Vvedenskil, professor A. G. Arenbergil jt.

Palju uut on andnud raadiotehnika kõrvalharude arendamiseks nõukogude teadlased ja konstruktorid. Võimsate elektrovaakuumseadiste — vesijahutusega saatelampide esimeseks konstruktoriks maailmas on NSV Liidu Teaduste Akadeemia korrespondeeriv liige M. A. Bontš-Brujevitš. Akadeemikute V. P. Vologdini ja M. A. Spitsini konstrueeritud ja väljatöötatud elavhõbedaaurualaldajad on kaasaegses tehnikas asendamatud.

Raadiotehnika kasutamise võimalused ei piirdu ainult ring-

häälingu ja kaugsidetehnikaga. Praegusel ajal on raadiotehnika leidnud laialdast kasutamist arstiteaduses, metallide töötlemisel, maapõuevarade uurimisel ja paljudel teistel aladel.

Raadiotehnika tungib oma kõrvalharudega kõikjale teaduses ja rahvamajanduses. Teaduslikes uurimisasutusis kasutatakse elektronarvutusmasinaid, mis sooritavad automaatselt keerukaid matemaatilisi tehteid üllatavalt kiiresti ja suure täpsusega. Nende aparaatide kasutamisel vajatakse nüüd näiteks ulatuslike astronoomiliste arvutuste teostamiseks, milleks omal ajal kulus mitu kuud, kõigest mõnikümmend sekundit või mõni minut.

Tähtis koht meie kodumaa töötajate laiade masside kultuurilisel kasvatamisel on raadioamatörismil. Rohkearvulistesse raadioklubidesse ja raadioringidesse koondunud isetegevuslike raadiohuviliste kasutada on suurepärased võimalused tööst vaba aja kasulikuks veetmiseks. Mitmedki praegused nimekad raadioeriteadlased, nagu A. L. Mints ja E. N. Geništa, on alustanud oma tööd raadiohuvilistena.

«... Ühelgi teisel inimese teadmiste alal pole niisugust massilist ühiskondlik-tehnilist isetegevust, mis haaraks kõige erinevama vanuse ja erialaga inimesi, kui raadiotehnikas. Raadioamatörism — see on võimas liikumine, mis ... kannab eneses kodumaa teenimise ideed tema tehniliseks õitsenguks ja kultuuriliseks arenguks ...» (NSV Liidu Teaduste Akadeemia omaaegse presidendi S. Vavilovi kirjutusest.)

2. PEATÜKK

ELEKTRITEOORIA ALGMED

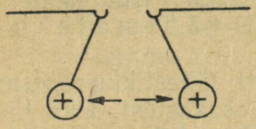
§ 1. ELEKTRILAENGUD

Juba kauges minevikus märgati merevaigu hõõrumisega kaasuvat omapärast nähtust — vaik omandab lühemaks ajaks võime kergeid esemeid nagu udusulgi, paberitükke jm. enda külge tõmmata. Ka võivad hõõrumisel tekkida väikesed sädemed. Esimesena pandi seda tähele merevaigu juures, kuid hiljem leiti mitmetel ainetel samalaadseid omadusi.

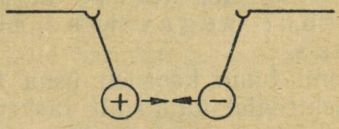
Esimesed teaduslikud uurimised 18. sajandi esimesel poolel näitasid, et hõõrumisel ilmuvad kehade pinnale erilised «elektri osakesed» ehk *elektrilaengud.* Ka selgus, et erinevad ained *elektriseeruvad* (omandavad elektriliselt laetud olukorra) kahel viisil. Üksikult võttes toimivad mõlemat «liiki» laengud mittelaetud kehadesse täpselt ühteviisi — tõmbavad enda poole kergeid laenguta esemeid. Erinevus laengute omadustes tuleb ilmsiks ainult nende koosmõjul. Üksik laeng (elektriliselt laetud keha) tõukab enesest eemale teisi e n d a s a r n a s e i d laenguid; e r i l i i g i l i s e d laengud seevastu t õ m b u v a d üksteise poole.

See erinevus elektrilaengute vahel põhjustaski kummagi liigi kohta erinevate nimetuste kasutuselevõtmist. Üht liiki elektrit (seda, mis tekib klaasile tema hõõrumisel siidriidega) hakati nimetama *positiivseks elektriks*, teist liiki (mis tekib merevaigule selle hõõrumisel villase riidega) — *negatiivseks elektriks*.

Niisiis samanimelised elektrilaengud — kaks positiivset või kaks negatiivset — tõukavad teineteist ja kaks erinimelist laengut — üks positiivne ja üks negatiivne — tõmbuvad omavahel mehaanilise jõuga, mille suuruse määrab laengute suurus (laenguosakeste hulk kehal), keskkond, milles laengud asuvad ja nende kehade vahekaugus. Jõud on seda tugevam, mida suuremad on kehade elektrilaengud ja mida väiksem on nende vahekaugus.



Joonis 2. 1. Samanimelisi elektrilaenguid kandvad kehad tõukuvad.



Joonis 2. 2. Erinimelisi elektrilaenguid kandvad kehad tõmbuvad.

Lihtne katse võimaldab kindlaks teha elektrilaengute vaheliste mehaaniliste jõudude olemasolu. Puudutame siidriidega hõõrumise tagajärjel positiivselt laetud klaaspulgaga kaht niidikeste külge riputatud korkkuulikest (joonis 2. 1). Seejuures kandub osa klaaspulga elektrilaengut üle korkkuulikestele, mille tõttu kumbki kuulike laetakse positiivselt, seega samanimeliste laengutega. On näha, et kuulikesed eemalduvad teineteisest.

Kui üks kuulike laadida positiivselt laetud klaaspulgaga puudutamise teel positiivselt, teine aga villase riidega hõõrutud merevaigust või eboniidist pulga abil negatiivselt, siis võime tähele panna nüüd juba erinimeliselt laetud kuulikeste vahelist tõmbumist (joonis 2. 2).

§ 2. AATOMID JA MOLEKULID

Kauges minevikus jõudsid filosoofid järeldusele, et ained koosnevad väikestest jagamatutest osakestest — *aatomitest.* Sõna «aatom» omab kreeka keeles tähendust «jagamatu». Hilisemad uurimised füüsika ja teiste teadusharude valdkonnas tõendasid aatomite olemasolu, kuid lükkasid ümber tõekspidamise aatomite jagamatusest ja aatomitest kui mateeria vähimatest algosakestest. Praegused kaugeltki mitte lõplikud uurimised näitavad aatomit paljude veelgi väiksemate osakeste tervikliku süsteemina ja pole võimatu, et tuumafüüsika (aine ehitusega tegeleva teadus-

ala) edasisel arengul osutuvad praegused «vähimad» osakesed omakorda süsteemideks veelgi väiksematest osakestest.

Aatomid on niivõrd väikesed, et kõrvuti asetatuna mahuks neid millimeetri pikkusele joonele umbes kümme miljonit. Oma ehituselt sarnanevad aatomid päikesesüsteemile. Peamine osa massist on koondunud aatomi keskel asuvasse *tuuma* nagu Päikesesse. Tuuma ümber tiirlevad kergemad osakesed — *elektronid* — nagu planeedid ümber Päikese. Elektronide keskmine pöörlemiskiirus tuuma ümber on umbes 200 kilomeetrit sekundis.

Elektronid on negatiivse elektrilaengu kandjad — negatiivse elektrilaengu osakesed. Elektroni laeng on vähim seniajani kindlakstehtud elektrilaeng; sellest väiksemate elektrilaengute olemasolu, nagu näiteks pool või veerand elektroni laengut, pole märgatud. Niisiis tuleb teaduse käesoleva taseme juures pidada elektrone negatiivse elektri vähimateks osakesteks.

Aatomi tuum koosneb üsna tihedasti lähestikku asetsevatest ning elektronist tunduvalt raskematest osakestest. Üks liik nendest osakestest — *prootonid* — on laetud positiivse elektriga. Siin väärib märkimist, et prootoni positiivne laeng on arvuliselt niisama suur kui elektroni negatiivne laeng.

Aatomi tuuma koostisse kuuluvatest suurematest osakestest tuleb nimetada veel elektrilaengut mitteomavaid *neutroneid.*

Keemiliste lihtainete aatomid erinevad üksteisest tuuma elektrilaengu poolest. Praegu tuntakse umbes sada keemilist lihtainet. Nende aatomid on mitmesuguse kaaluga. Kõige kergemast vesinikuaatomist on metall uraani aatom ligi 240 korda raskem. Kuid siiski on uraani aatomi mass vaid 0,000 000 000 000 000 000 000 4 grammi.

Lihtsaima ehitusega aatomis — vesiniku aatomis — tiirleb tuuma ümber üksainus elektron ja tuum koosneb ainult ühest prootonist; uraani aatomis on tuuma ümber tiirlevaid elektrone üheksakümmend kaks ja tuum on väga keerulise ehitusega. Kõigis aatomites on aga elektronid, samuti tuuma moodustavad osakesed, täiesti ühesugused.

Praktilises elektrotehnikas omavad tähtsust vaid aatomituumad kui tervikud ja tuuma ümbritsevad elektronid.

Tähtsamate aatomituuma moodustavate osakeste (prootoni ja neutroni) massi võrdlemisel elektroni massiga selgub, et elektron on nendest üle 1800 korra kergem. Niisiis on peamine mass aatomis koondunud selle tuuma.

Keemilistes ühendites — liitainetes — on mitmete erinevate lihtainete aatomid grupeeritud kindlate reeglite kohaselt suuremateks tervikuteks — molekulideks. Näiteks moodustub vee molekul kahest vesiniku- ja ühest hapnikuaatomist. Kuid ka rida lihtaineid võib esineda molekulidena, mis koosnevad kindlast arvust samasugustest aatomitest.

Keemilisi ühendeid märgitakse tavaliselt valemitena. Vee keemiline valem on näiteks H_2O. Vesinikuaatomi tähis on H, indeks 2 näitab vastavate aatomite arvu molekulis, hapnikuaatomit märgib O.

Keemiliste lihtainete tähised (lühendmärgid) on tuletatud nende ladina- ja kreekakeelsetest nimetustest. Vesiniku ladinakeelne nimetus on hydrogenium, hapnikul — oxygenium. Kummagi nimetuse esitähti kasutataksegi vastava keemilise lihtaine lühendmärgina. Nii on keerukama liitaine väävelhappe keemiline valem näiteks H_2SO_4 (S tähistab väävliaatomit — ladina keeles sulfur). Väävelhappe molekul koosneb kahest vesinikuaatomist, ühest väävli- ja neljast hapnikuaatomist.

Kõiki muutusi aine molekuli koostises nimetatakse keemilisteks reaktsioonideks. Keemilisi reaktsioone on hõlbus märkida võrranditena. Nii on näiteks süsiniku (ladina keeles: carboneum; lühend C) põlemine tema ühinemine hapnikuga, kusjuures tekib süsihappegaas:

$$\underset{\text{süsinik}}{C} + \underset{\text{hapnik}}{O_2} = \underset{\text{süsihappegaas}}{CO_2};$$

viimane aga võib tekitada veega uue reaktsiooni, mille tulemusena moodustub jällegi uus ühend — süsihape:

$$\underset{\text{süsihappegaas}}{CO_2} + \underset{\text{vesi}}{H_2O} = \underset{\text{süsihape}}{H_2CO_3}.$$

§ 3. IOONID

Eespool tutvusime elektrilaengutega ja nende omadusega tõugata samanimelist ja tõmmata erinimelist laengut. Ka teame, et aatomi osakesed on elektriliselt laetud: aatomituuma osake prooton ja seega kogu tuum on positiivne ning tuuma ümbritsevad elektronid on negatiivsed.

Iga aine aatomis on normaalolukorras kindel arv elektrone, kusjuures tuum omab positiivset laengut, mis on suuruselt võrdne kõigi elektronide negatiivse kogulaenguga. Seega valitseb aatomites ja molekulides normaalses olukorras elektriline tasakaal, mille tagajärjel aatomisisesed elektrilised jõud väljaspool aatomit ei avaldu.

Kui mingi välise mõju tagajärjel eraldub aatomist osa elektrone, siis ühes sellega kaob mainitud sisemine elektriline tasakaal ja aatom hakkab avaldama elektrilist välismõju. Kogu aatom omandab tervikuna positiivse elektrilaengu, sest aatomisse järelejäänud elektronide kogulaeng ei suuda enam tasakaalustada tervet tuuma endiseks jäänud positiivset laengut; viimane jääbki aatomis mõjuma ja see mõju ulatab ka väljapoole aatomi piire. Niisugust aatomit, mis on elektronide eraldumise

tõttu kaotanud elektrilise tasakaalu ja omandanud positiivse elektrilaengu, nimetatakse *positiivseks iooniks*.

Vastandjuhul — kui aatomis on elektrone normaalsest rohkem — on tegemist negatiivse iooniga. Elektriliselt tasakaalus neutraalne aatom muutub negatiivseks iooniks — avaldab negatiivse elektrilaengu välismõju, kui viia neutraalsesse aatomisse elektrone juurde. Sel juhul ei suuda tuuma positiivne laeng tasakaalustada kõigi elektronide negatiivset kogulaengut ja osa sellest avaldab mõju ka väljapoole aatomit.

Kõik käesoleva peatüki algosas käsitletud hõõrumiselektrinähtused leiavad aatomiõpetuse poolt kindla teoreetilise põhjenduse. Kahe keha vastastikusel hõõrdumisel ioniseeruvad pinna molekulid ühel kehal positiivselt ja teisel kehal negatiivselt, sest hõõrdumisel tarvitatud mehaanilise energia ühe osa arvel kandub ühelt kehalt mingi hulk aatomite koostisest vabanenud elektrone teise keha pinnale. Kehade elektrilised omadused on järelikult elektronide ja aatomituumade elektrilaengute kogumõju välised avaldused.

Lõpuks pole liigne märkida, et tähistused «positiivne» ja «negatiivne» anti laengutele ammu enne elektriteooria ilmumist. Alles palju hiljem selgus, et vanast laengute tähistamisest kinni pidades osutus aatomituuma elektrilaeng positiivseks ja elektroni laeng negatiivseks. Loomulikult oleksid need kokkuleppelised nimetused võinud kujuneda ka vastupidisteks.

Olulisim

1. Esineb kaht liiki elektrilaenguid — positiivsed ja negatiivsed.
2. Samanimelised elektrilaengud — kaks positiivset või kaks negatiivset — tõukuvad teineteisest.
3. Erinimelised elektrilaengud — üks positiivne ja üks negatiivne — tõmbuvad omavahel.
4. Kõik ained koosnevad väikestest algosakestest — aatomitest.
5. Aatom koosneb positiivse elektrilaenguga tuumast ja selle ümber tiirlevatest negatiivse elektrilaenguga osakestest — elektronidest.
6. Praegu peetakse elektroni laengut vähimaks elektrilaenguks.
7. Molekulid on keemiliste liitainete vähimad osakesed — neid moodustavate lihtainete aatomite grupid.
8. Keemilised reaktsioonid on muutused molekulide koostises.
9. Elektriliselt neutraalses kehas on aatomituumade positiivne laeng täielikult tasakaalustatud elektronide negatiivse kogulaenguga.
10. Positiivselt laetud kehas on normaalsest vähem elektrone. Tuuma positiivsest elektrilaengust jääb osa tasakaalustamata.

11. Negatiivse elektrilaenguga kehas on normaalsest rohkem elektrone. Nende negatiivne kogulaeng on suurem tuuma positiivsest laengust ja mõjub seetõttu väljapoole aatomit.

3. PEATÜKK

ELEKTRIHULK, VOOL JA PINGE; TAKISTUS

§ 1. KEHADE ELEKTRIJUHTIVUS

Elektronid on aatomi koostisosad. Kuna kõik ained koosnevad aatomitest, siis leidub ka elektrone kõikjal. Metallides on osa elektronidest kergesti liikuvad, mistõttu need elektronid võivad vabalt kanduda ühelt aatomilt teisele või liikuda korratult aatomite vahel, ühinedes kord ühega, kord teisega. Taolisi metallis vabalt liikuvaid elektrone nimetatakse *vabadeks elektronideks*.

Mingi välise jõu mõjul võib panna vabad elektronid metallis kindlas suunas liikuma. Seda liikumist tunneme *elektrivooluna*. Elektrivoolu olemasolu ei suuda meie otseselt kindlaks teha; küll aga kaasub sellega terve rida nähtusi (näiteks soojuse või valguse eraldumine, magnetilised nähtused jne.), mis on kas otseselt või kaudselt tajutavad. Aineid, milles elektrivool võib vabade elektronide olemasolu tõttu tekkida, nimetatakse *elektrijuhtideks*.

Kõik metallid on elektrijuhid. Neist on elektrotehnikas tähtsaimad vask, alumiinium ja raud. Mittemetalsetest elektrijuhtidest väärib mainimist süsi, mida kasutatakse peamiselt grafiidina.

Valdavas osas mittemetallides ja nende ühendites on tavalistes tingimustes vabade elektronide tekkimine ja seega kindlasuunaline liikumine aatomite vahel väga piiratud. Vabade elektronide vähesuse tõttu nendes ainetes voolu praktiliselt ei teki, seepärast nimetatakse neid *mittejuhtideks* ehk *dielektrikuteks*.

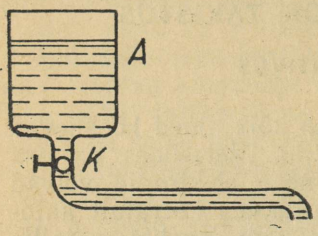
Mittejuhtide hulka kuuluvad kõik elektrotehnikas arvukalt kasutatavad isoleerained, nagu valdav enamus igasuguseid plastmasse, protselan, kummi, paber, õli ja õhk. Õhk on mitte väga kõrgete pingete puhul suurepärane mittejuht.

Ulatuslikku rühma elektrilistelt omadustelt juhtide ja mittejuhtide vahepealseid füüsikalisi kehi ja keemilisi aineid (mitmed oksüüdid, mineraalid ja sulfiidid) nimetatakse *pooljuhtideks*. Nende omadusi kasutatakse kaasaegses tehnikas paljude elektriseadmete valmistamisel.

§ 2. ELEKTRIVOOL METALLJUHTMES

Sisuliselt on elektrivool vabade elektronide suunatud kulgemine elektrit juhtivas materjalis. See elektronide liikumine toimub — kui mitte arvestada üksikuid erijuhtumeid — juhtme terve ristlõike ulatuses.

Elektrivoolu moodustavate elektronide liikumiskiirus juhtmes on üsna väike. Sageli arvatakse ebaõigesti, et elektrivoolu, s. o. elektronide liikumise kiirus juhtmes on võrdne valguse levimiskiirusega (300 000 kilomeetrit sekundis). Niisugune arvamus on väär; tegelikult liiguvad elektrivoolu tekitavad liikuvad elektronid sekundis juhtmes edasi kõigest mõne millimeetri. Kuid siiski süttib elektrihõõglamp silmapilkselt ka kaugel asuva lüliti keeramisel. See on tingitud elektronide olemasolust kogu juhtme ulatuses. Lülitamise hetkel hakkavad juhet «täitvad» elektronid liikuma mitte ainult lüliti juures, vaid peaaegu üheaegselt terves juhtmes. «Tõuge» vabade elektronide kindlasuunaliseks liikumahakkamiseks kandub juhtmes lüliti juurest edasi ligi valguse kiirusega.



Joonis 3. 1. Voolamisnähtus vedelikuga täidetud torus.

Selle mõistmiseks esitame analoogilise olukorra vedelike voolamisest. Pikk toru (joonis 3. 1) omab ühes otsas kraani *K* ja on täidetud veega. Niipea kui kraan avatakse, hakkab vedelik kohe torust väljuma. Esialgu voolab torust muidugi selles varem seisnud vedelik, sest kraanist juurdevoolav vedelik ei jõua kohe toru suudmeni. Kraani avamisega kandub anumas *A* oleva vedeliku surve torus olevale vedelikule ja selle kaudu kuni toru otsani, mistõttu vedelik väljubki torust.

§ 3. ELEKTRIHULK; KULON

Hõõrdumisel või ükskõik millisel muul põhjusel elektriseerub alati üks keha positiivselt ja teine keha negatiivselt — ühele kehale jääb positiivne ja teisele negatiivne elektrilaeng. Seejuures on kummalegi kehale jäävad erinimelised laengud arvuliselt võrdsed. Ühel või teisel viisil (näiteks sädet tekitades) võivad need laengud tasakaalustuda (neutraliseeruda), millega laetud kehad jällegi kaotavad oma väliselt märgatavad elektrilised omadused.

Elektriteooria annab seletuse elektrilaengute tekkimisele. Positiivselt laadimisel kaotab laetav keha osa elektrone, negatiivselt laetav keha aga saab elektrone juurde. Märkida tuleb, et elektriseerida saab kõiki aineid, nii dielektrikuid kui ka elektrijuhte. Kui esimestel tekkinud laeng jääb keha pinnale samasse kohta püsima, siis teiste puhul saab laeng kanduda ka pinna ülejäänud punktidesse või selle kehaga elektriliselt ühendatud teistele kehadele.

Mõnikord on vajalik keha laengu suurust väljendada arvuliselt. Ilmselt oleneb keha elektrilaengu suurus puuduvate või liigsete elektronide hulgast sellel kehal; järelikult võib laengu suurust

(elektrihulka) mõõta puuduvate või liigsete elektronide arvulise hulga võrdlemise kaudu mingi ühikuks võetud elektronide hulgaga. Üksiku elektroni laeng on elektrihulkade võrdlemisel praktiliseks kasutamiseks liiga väike; enamasti kasutatakse elektrihulga (laengu suuruse) väljendamisel suuremat ühikut *kulonit*. Rahvusvaheliselt tähistatakse seda ühikut tähega C ja venekeelses kirjanduses *к*. Matemaatilistes valemites kasutatakse elektrilaengu suuruse (kulonite arvu) väljendamiseks sümbolit *Q*. Ühe kuloni suuruse elektrihulga moodustab umbes 6 300 000 000 000 000 000 elektroni laeng (teisiti võib seda arvu kirjutada lühemal kujul $6{,}3 \cdot 10^{18}$). Ühe elektroni laeng on $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ kulonit.[1]

§ 4. ELEKTRIVOOLU TUGEVUS; AMPER

Veetorus voolava vee «voolu tugevuse» (voolu intensiivsuse) määrab arvuliselt toru mingit ristlõiget sekundis läbiva vee hulk, mõõdetuna liitrites. Analoogiliselt määratakse elektrivoolu tugevust — üht tähtsamat suurust elektrotehnikas. Juhet läbiv *vool* (valemites märgitav tähega *I*) on mõõdetav juhtme mingit ristlõiget läbiva elektrihulgaga sekundis. Elektrihulka mõõdame kulonites. Kui sekundis voolab läbi juhtme mingi ristlõike 1 kuloni suurune laeng ($6{,}3 \cdot 10^{18}$ elektroni), siis on vool 1 amper[2] (lühend A ning venekeelses kirjanduses *а*). Nõrgemate voolude mõõtmisel kasutatakse tehnikas väiksemaid ühikuid: milliamprit (mA ning vene keeles *ма*) ja mikroamprit (μA ning vene keeles *мка*). Seejuures

$$1\ \text{mA} = 0{,}001\ \text{A} = 1000\ \mu\text{A};$$
$$1\ \mu\text{A} = 0{,}001\ \text{mA} = 0{,}000\,001\ \text{A};$$
$$1\ \text{A} = 1000\ \text{mA} = 1\,000\,000\ \mu\text{A}.$$

Suuremate voolude puhul tarvitatakse tugevvoolutehnikas amprist tuhat korda suuremat ühikut — kiloamprit(kA ning vene keeles *ка*) ja miljon korda suuremat ühikut — megaamprit (MA ning vene keeles *ма*).

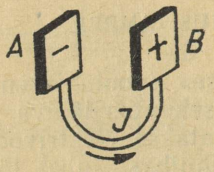
Mõnikord osutub vajalikuks kasutada *voolutiheduse* mõistet. See on arv, mis näitab, kui tugeva vooluga on juhtme materjal koormatud, s. o. mitu amprit voolab juhtmes selle ristlõike iga ruutmillimeetri kohta. Voolutiheduse tähis valemites on *j* ning ühik on amper ruutmillimeetri kohta (A/mm^2).

---

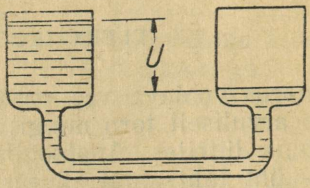
[1] Arvukate nullide vältimiseks ligikaudsete paljukohaliste arvude väljakirjutamisel kasutatakse korrutisena arvu 10 astmeid. Kuna $100 = 10^2$, $1000 = 10^3$ jne., siis positiivne astendaja näitab nullide hulka arvus. Negatiivne astendaja näitab murdarvu komale järgnevate kohtade arvu: $10^{-2} = 0{,}01$, $10^{-3} = 0{,}001$ jne. Näiteks on korrutis $3 \cdot 10^4 = 30\,000$; $3{,}65 \cdot 10^6 = 3\,650\,000$; $6 \cdot 10^{-4} = 0{,}0006$; $1{,}5 \cdot 10^{-5} = 0{,}000015$ jne.

[2] Üks amper vastab püsivale voolule, mis, läbides hõbenitraadi vesilahust, sadestab sellest välja 0,001118 g hõbedat sekundis.

Olgu kahest isoleeritud metallplaadist üks (*A*) laetud negatiivselt ja teine (*B*) positiivselt (joonis 3.2). Esimesel plaadil valitseb elektronide rohkus, s.t. «elektriline ülesurve», teisel plaadil aga puudus, s.t. «alasurve». Laengute tasakaalustamiseks püüab osa elektrone liikuda negatiivselt plaadilt positiivsele. Seepärast tekibki plaatide ühendamisel metalljuhtmega *J* selles elektronide suunatud liikumine — elektrivool — negatiivselt laetud plaadilt positiivselt laetud plaadile. Vool kestab kuni laengute tasakaalustumiseni plaatidel.



Joonis 3.2. Kahe erinimeliselt laetud metallplaadi ühendamisel metalljuhtmega tekib viimases elektronide kindlasuunaline liikumine ehk elektrivool.



Joonis 3.3. Vedelikuanumate ühendustorus tekib voolamine toru otstel valitsevate vedelikusammaste rõhkude erinevuste tõttu.

Vool plaate ühendavas juhtmes tekib ka siis, kui mõlemad plaadid on laetud samanimeliselt, kuid erineval määral (erineva elektrilise «üle-» või «alasurveni») ning kestab jällegi laengute võrdsustumiseni, s.o. ühtlase «üle-» või «alasurve» ilmumiseni kummalgi plaadil. Muidugi jäävad siis mõlemad plaadid absoluutses mõttes elektrilaengut omavaks — neil on kas elektronide üleküllus või puudujääk, kuid nende vahel pärast laengute võrdsustumist enam voolu tekkida ei saa.

Täpselt analoogiline praegukäsitletuga on olukord kahe erinevate nivoodeni täidetud anuma ühendamisel toruga (joonis 3.3). Vedeliku voolamine ühendustorus võib kesta nivookõrguste võrdsustumiseni. Vedeliku voolamise kutsub esile vahe nivookõrgustes *U*, seega m i t t e v õ r d s e d s u r v e d toru otstes.

Joonisel 2.1 ja 2.2 kujutatud rippuvate kuulikeste elektriseerimisel tekkiva asendi muutuse — niidikeste vahelise nurga — kaudu saab hinnata kuulikeste elektriseerimisastet. See aga oleneb elektriseeritavale kehale kantud elektrilaengust (elektronide arvust).

Elektriseeritava keha elektrilise seisundi — elektriseerimisastme — määrab mitte üksnes temale kantava laengu suurus, vaid ka keha mõõtmed ja kuju. Üks ja seesama elektrihulk avaldub erinevalt, kui ta oleks kantud kas suurele või väikesele kehale —

elektrilaengu osakeste paiknemise tihedus osutub suurel kehal väiksemaks kui väikesel kehal.

Kui mingile isoleeritult paigutatud elektrit juhtivale kehale on kantud teatav laeng, siis teise erinimeliselt laetud keha eemaldamisel esimese keha juurest tuleb ületada nende vahel mõjuv tõmbejõud, s. t. sooritada teatav hulk tööd. See tööhulk sõltub laengute suurusest ja kaugusest, kuhu soovitakse paigutada teine keha. Maksimaalne hulk tööd kulub keha viimiseks lõpmatusse.

Keha elektrilist laadimisastet ehk *potentsiaali* iseloomustabki töö hulk, mida tuleb sooritada teise keha viimiseks selle juurest lõpmatusse, kui teisele kehale on kantud ühe ühiku suurune elektrilaeng.

Kui ühendada juhtmega kaks erineva potentsiaalini laetud keha (joonis 3. 2), siis liigub teatava suurusega elektrilaeng ühendusjuhtme kaudu kõrgema potentsiaaliga kehalt madalama potentsiaaliga kehale — tekib vool, mis kestab kehade potentsiaalide võrdsustumiseni.

Elektrilise potentsiaali mõiste on analoogiline vedeliku nivoo mõistega anumas. Samuti nagu vedelikuga täidetud üksiku suletud anuma puhul ei teki voolamist, püsib ka elektrilaeng isoleeritud kehal, olgugi et ta on teatava potentsiaalini laetud. Niipea aga, kui tekib võimalus vedeliku liikumiseks (näiteks erinevate nivoodeni täidetud ühendatud anumates joonisel 3. 3), siis toimub see ainult n i v o o d e v a h e arvel, seega mittevõrdsete survete tõttu ühendustoru otstes. Ka elektrivoolu tekkimiseks juhtmes peavad potentsiaalid selle otstes olema erinevad — peab esinema p o t e n t s i a a l i d e v a h e.

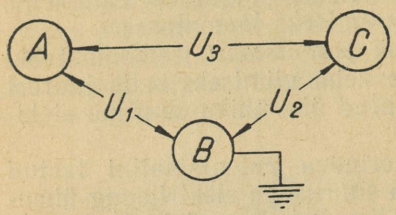
Igasugune elektrilise tasakaalu rikkumine (potentsiaalide vahe ilmumine) tekitab sellise «pingelise olukorra», mis nõuab elektrivoolu tekkimist. Mida suurem on kahe punkti potentsiaalide vahe, seda suurem on tasakaalustamistung ja seda tugevam vool võib tekkida juhtmes, mis ühendab neid punkte.

Potentsiaalide vahet kahe punkti vahel nimetame elektriliseks *pingeks*. Pinget tähistame valemites tähega U ja mõõdame voltides (lühend V, venekeelses kirjanduses *в*). P i n g e t m õ õ d e t a k s e a l a t i k a h e p u n k t i v a h e l.

Voldi kõrval kasutatakse ka sellest tuletatud suuremaid ja väiksemaid ühikuid — kilovolti (lühend kV, venekeelses kirjanduses *кв*) ja millivolti (lühend mV, venekeelses kirjanduses *мв*). Raadiotehnikas leiab kasutamist veelgi väiksem ühik — mikrovolt (lühend μV, venekeelses kirjanduses *мкв*). Need ühikud suhtuvad üksteisesse järgmiselt:

$$1\ \text{kV} = 1000\ \text{V};$$
$$1\ \text{mV} = 0{,}001\ \text{V} = 1000\ \mu\text{V};$$
$$1\ \mu\text{V} = 0{,}000\,001\ \text{V} = 0{,}001\ \text{mV};$$
$$1\ \text{V} = 1000\ \text{mV} = 0{,}001\ \text{kV}.$$

Kui kehal puudub elektrilaeng, siis omab ta nullpotentsiaali. Kõik maaga elektriliselt ühendatud (maandatud) kehad omavad nullpotentsiaali. Maandatud keha suhtes võivad teised kehad omada mitmesuguse suurusega positiivset või negatiivset potentsiaalide vahet ehk pinget. Võtame näitena süsteemi kolmest omavahel isoleeritud metallkehast A, B ja C joonisel 3.4. Kui B on maandatud, A omab elektronide küllust (negatiivset elektrilaengut) ning C — elektronide puudujääki (positiivset laengut), siis valitsevad kehade A, B ja C vahel pinged U_1, U_2 ja U_3 vastavalt tähistusele joonisel. Kuna A on negatiivselt laetud, siis ka U_1 omab negatiivset suurust; kuna C on positiivselt laetud, siis U_2 omab positiivset suurust. Kummagi keha pinge määramisel on siin aluseks võetud maandatud keha B nulliga võrduv potentsiaal.



Joonis 3.4. Laetud kehade vahelised potentsiaalide vahed ehk pinged.

Kui tuleb määrata näiteks keha A pinget vahetult C suhtes või C pinget A suhtes, siis osutub U_3 esimesel juhul negatiivseks ja teisel juhul positiivseks. See näitab, et pinge positiivsus või negatiivsus on täiesti suhteline ning oleneb sellest, kas seda mõõdetakse madalamat (negatiivsemat) või kõrgemat (positiivsemat) potentsiaali omava keha suhtes. Samuti osutub keha B potentsiaal A suhtes positiivseks või C suhtes negatiivseks.

Näide. Kui keha A omab —5-voldist negatiivset potentsiaali, B on maandatud ja C omab +10-voldist positiivset potentsiaali, siis on:

A pinge B suhtes $U_{AB} = -5$ V; B pinge A suhtes $U_{BA} = +5$ V;
C pinge B suhtes $U_{CB} = +10$ V; B pinge C suhtes $U_{BC} = -10$ V;
A pinge C suhtes $U_{AC} = -15$ V; C pinge A suhtes $U_{CA} = +15$ V.

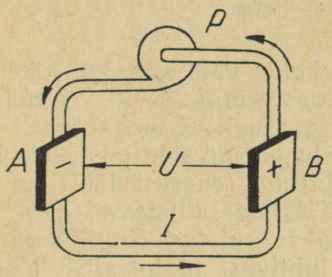
Näide. Kui keha A omab —7-voldist potentsiaali ja keha C omab —10-voldist potentsiaali keha B suhtes, siis on C pinge A suhtes $U_{CA} = -3$ V ja A pinge C suhtes $U_{AC} = +3$ V. Siinjuures pole muidugi tähtsust asjaolul, kas B omab nullpotentsiaali või mitte.

Elektrilaengute märgid määrati kindlaks ammu enne elektriteooria ilmumist. Ühtlasi otsustati hakata elektrivoolu suunda lugema positiivselt potentsiaalilt negatiivsele. Selle, nn. *kokkuleppelise* ehk *konventsionaalse voolusuunaga* seoti terve rida elektromagnetiliste nähtuste reegleid jne. Kuigi hiljem selgus, et elektrivoolu tegelik suund metalljuhtmes — elektronide liikumine — on kokkuleppelisele voolusuunale vastupidine — negatiivselt potentsiaalilt positiivsele, polnud enam võimalik üle minna tegeliku voolusuuna üldisele kasutamisele.

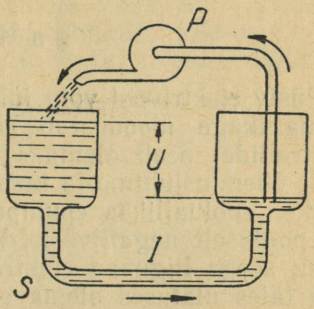
Kokkuleppeline elektrivoolu suund positiivselt potentsiaalilt negatiivsele on vastupidine elektronide liikumisele metalljuhtmes.

Joonisel 3. 2 esitatud näites ei saa plaate ühendavas juhtmes elektronide vool olla püsiv, sest selle kestel positiivsel plaadil elektronide hulk pidevalt täieneb ja negatiivsel plaadil kahaneb ning vastavalt sellele nende plaatide vaheline potentsiaalide vahe ehk pinge väheneb (tingimusel, et kehade laenguid vahepeal ei täiendata). Plaadid omandavad lõpuks võrdse potentsiaali ja vool juhtmes lakkab pinge puudumise tõttu.

Ühendusjuhtmes võib tekkida pidev vool ainult siis, kui selle otste vahel mõjuv pinge hoitakse püsivana. Seda võiks teha mingi



Joonis 3. 5. Pidev vool plaatide ühendusjuhtmes tekib ainult siis, kui mingi «elektronide pump» *P* hoiab plaatide potentsiaalide vahe püsivana.



Joonis 3. 6. Pidev vool vedelikuanumate ühendustorus saab tekkida ainult siis, kui pump *P* hoiab anumates nivoode vahe püsivana.

«elektrilise pumba» *P* abil, mis viib positiivselt plaadilt niisama palju elektrone negatiivsele plaadile tagasi, kui palju neid ühendusjuhtme kaudu positiivsele plaadile voolab (joonis 3. 5). Selleks «pumbaks» on mingi *vooluallikas* (näiteks keemiline vooluallikas või elektrigeneraator).

Analoogiline olukord tekiks siis, kui lisada eespoolkirjeldatud vedelikuanumate süsteemile joonisel 3. 6 pump *P*. Niikaua kui pump töötab, hoidub alal püsiv vedeliku nivoode vahe ja ühendustorus on pidev vedeliku vool. Sealjuures peab pump mingi jõu arvel pidevalt sooritama tööd.

Igal alalisvooluallikal on kaks ühendusklemmi, millede vahel valitseb püsiv pinge. Jõudu, mis tekitab vooluallika klemmide vahele pinge ja hoiab selle püsivana, nimetatakse *elektromotoorseks jõuks* (lüh. emj., vene keeles: э.д.с.). Elektromotoorse jõu suurust mõõdetakse, samuti kui pinget, voltides ja märgitakse valemites tähega *E*.

Pinge ja voolu mõistete segimineku vältimiseks rõhutame, et vool, s. t. elektronide kindlasuunaline liikumine, võib tekkida ainult pinge (elektromotoorse jõu) olemasolul. Seevastu võib aga pinge esineda ilma vooluta. Nii on näiteks akumulaatori või taskulambi patarei pooluste või valgustusvoolu võrgu pistikupesa kummagi ühenduspuksi vahel pinge ka sel puhul, kui elektronid piki juhet ei liigu. Pinge on ühe ühendusjuhtme kaudu edasikanduv elektronide «ülesurve» ja teise traadi kaudu edasikanduv elektronide «alasurve», mis alles siis tekitab voolu, kui läbi mingi tarbija [1] (näiteks elektrihõõglambi) saab toimuda pidev elektronide liikumine «ülesurvega» pooluselt «alasurvega» poolusele ning läbi elektromotoorse jõu allika kui «elektrilise pumba» taas «ülesurvega» poolusele.

§ 6. TAKISTUS; OOM

Püsiv elektrivool võib juhtmes tekkida vaid siis, kui juhe koos vooluallikaga moodustab *suletud vooluringi* (ehk vooluahela). Elektronidel peab olema võimalus vooluallika negatiivselt pooluselt ühendusjuhtme ja tarbija kaudu positiivsele poolusele liikumiseks. Vooluallikas «pumpab» elektrone (enesest läbi) positiivselt pooluselt negatiivsele, kus nad jällegi alustavad oma ringkäiku; seega liiguvad elektronid mööda suletud ringi. Vooluring peab täies ulatuses olema elektrit juhtivast materjalist. Kui see nõue pole täidetud — vooluring on kusagilt katkestatud —, pole ka püsiva voolu tekkimine mõeldav.

Vabade elektronide kindlasuunalist liikumist vooluringis, mis moodustab elektrivoolu, takistab nende põrkamine ja «hõõrdumine» vastu elektrijuhi aatomeid ning molekule. Seda protsessi saadab küllalt tugeva voolu korral juhtme märgatav kuumenemine — elektronide liikumisenergia, mis on saadud elektromotoorse jõu allikast mingi teist liiki energia muundumise protsessi tulemusena (keemilises vooluallikas näiteks keemilise reaktsiooni tagajärjel, elektrigeneraatoris aga mehaanilisest energiast), muundub soojusenergiaks.

Kirjeldatud takistavat mõju, mida iga elektrijuht avaldab temas kulgevale püsiva tugevusega ja suunaga voolule, nimetatakse *oom-* ehk *alalisvoolutakistuseks* (tähised valemites R ja r). Vooluhtme alalisvoolutakistuse suurus sõltub juhtme materjalist ning tema mõõtmetest (pikkusest ja ristlõikepindalast), samuti ka temperatuurist ja mõnest muust vähemtähtsast tegurist. Loomulikult on pika juhtme elektriline takistus suurem kui lühikesel juhtmel. Läbi jämeda juhtme on elektronidel kergem pääseda kui läbi peenikese juhtme. Nii avaldab pikk ja peenike juhe

[1] Tarbijad on elektriseadised, mis muundavad nendesse juhitavat elektrienergiat teisteks energialiikideks (hõõglamp — valguseks, elektrimootor — mehaaniliseks energiaks, elektrisoojendusahi — soojusenergiaks jne.).

elektrivoolule suuremat takistavat mõju kui lühike ja jäme juhe, samuti nagu pikk ja peenike toru takistab vedeliku läbivoolamist rohkem kui lühike ja jäme toru.

Elektriline takistus on teatavas mõttes sarnane vedelikuosakeste omavahelise mehaanilise hõõrdumisega või hõõrdumisega vastu toru seina. Nagu hõõrdumine takistab liikumist, nii ka elektrijuhi takistus pidurdab voolu voolamist.

Elektrijuhtide oomtakistuse ehk lühemalt takistuse mõõtmiseks kasutatav ühik on *oom* (lüh. Ω — kreeka tähestiku märk omega; vene kirjanduses *ом*). 1 Ω suurune takistus on 106,3 sentimeetri pikkusel ja ühtlase 1-ruutmillimeetrise ristlõikepinnaga elavhõbedasambal 0° C juures. Selle ühiku abil võib võrrelda mitmesuguste elektrijuhtide ja tarbijate takistusi.

Raadiotehnikas on sageli tarvis mõõta väga suuri takistusi. Selleks kasutatakse oomist suuremaid ühikuid: kilo-oomi (kΩ; vene k. *ком*) ja megaoomi (MΩ, vene k. *мгом*). Need ühikud suhtuvad omavahel järgmiselt:

1 kΩ = 1000 Ω = 0,001 MΩ;
1 MΩ = 1000 kΩ = 1 000 000 Ω;
1 Ω = 0,001 kΩ = 0,000 001 MΩ.

Mingi voolujuhi takistuse suurust R saab arvutada lihtsa valemi abil:

$$R = \frac{\varrho l}{q} = \frac{4\varrho l}{\pi d^2},$$

kus R avaldub oomides, kui juhtme pikkus l on väljendatud meetrites, juhtme ristlõikepindala q — ruutmillimeetrites, juhtme läbimõõt d — millimeetrites, $\pi = 3{,}14$ ja ϱ (kreeka tähestiku märk «roo») on kasutatava juhtme materjali eritakistus.

Tabel 1

Metallide eritakistused ja takistuse temperatuuritegurid [1]

Juhtme materjal	Eritakistus ϱ 20°C juures	Temperatuuritegur α
Hõbe	0,016	0,0036
Vask (tehniline)	0,0175...0,018	0,004
Alumiinium	0,029	0,004
Raud	0,12	0,006
Kroomnikkel	1,0	0,0007
Nikeliin (vase, nikli ja tsingi sulam)	0,33	0,0002
Manganiin (vase, nikli ja mangaani sulam)	0,43	0,00001
Konstantaan (vase, nikli ja mangaani sulam)	0,5	—0,000005

[1] Tabelis toodud suurused võivad võrdlemisi suurtes piirides muutuda metallisulamites leiduvate lisandite mõjul. Takistuse temperatuuritegurit vaadeldakse järgnevas paragrahvis.

Aine eritakistuseks nimetame sellest materjalist valmistatud 1 meetri pikkuse ja 1 ruutmillimeetrise ristlõikepinnaga ühtlase traadi takistust oomides temperatuuril 20° C. Tabelist 1 saame ülevaate mõnede metallide ja metallisulamite eritakistuse väärtustest.

Tabelist on näha, et näiteks 1 m pikkune ja 1 mm^2 suuruse ristlõikepinnaga raudtraat omab 0,12 oomi suurust takistust 20° C temperatuuril.

Takistuse pöördväärtust $\left(\frac{1}{R}\right)$ nimetatakse *juhtivuseks*. Juhtivuse tähis on G ja mõõtühik on *siimens* (tähis S). Matemaatiliselt võib juhtivuse ja takistuse vahekorda märkida järgmiselt:

$$G = \frac{1}{R} \text{ ja } R = \frac{1}{G},$$

mida suurem on takistus, seda väiksem on juhtivus ja vastupidi.

Vastavalt nimetatakse ka eritakistuse pöördväärtust $\left(\frac{1}{\varrho}\right)$ *erijuhtivuseks*. Erijuhtivust tähistatakse valemites kreeka tähestiku märgiga γ (gamma).

Näide. Leida 1 km pikkuse vasktraadi takistus, kui traadi ristlõikepindala on 2 mm^2. Leida sama traadi juhtivus.

Kasutades juhtme takistuse arvutamiseks toodud valemit $R = \frac{\varrho l}{q}$, saame juhtme takistuseks $R = \frac{0{,}018 \cdot 1000}{2} = 9$ oomi.

Juhtme eritakistuse leidsime tabelist (vasel $\varrho = 0{,}018$). Juhtivus kui takistuse pöördarv on sellel traadil

$$G = \frac{1}{R} = \frac{1}{9} = 0{,}11 \text{ S}.$$

Näide. Arvutada nikeliintraadi erijuhtivus.

Erijuhtivus on eritakistuse pöördväärtus $\gamma = \frac{1}{\varrho}$. Tabelist 1 leiame nikeliini eritakistuse $\varrho = 0{,}33$. Seega erijuhtivus $\gamma = \frac{1}{0{,}33} = 3{,}0$.

Näide. Leida 100 m pikkuse vasktraadi minimaalne ristlõikepindala, kui traadi takistus ei tohi olla üle 4 oomi.

Valemis $R = \frac{\varrho l}{q}$ esinevatest suurustest on teada $R = 4$ oomi, $l = 100$ m, $\varrho = 0{,}018$. Otsitav on q. Teisendame seda valemit q leidmiseks. Siis saame:

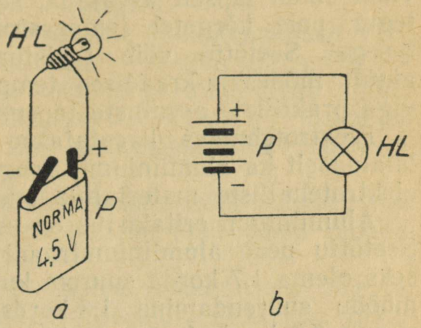
$$q = \frac{\varrho l}{R}.$$

Asetades tuntud suurused teisendatud valemisse, saame:

$$q = \frac{0{,}018 \cdot 100}{4} = 0{,}45 \text{ mm}^2.$$

Tehnikas kasutatakse vooluringi elemente, millede ülesanne on neid läbivat voolu takistada, piirata. Niisuguseid detaile nimetatakse *takistiteks*. Takistite poolt voolule avaldatav mõju on *takistus*, mille suurus avaldatakse oomides, kilo-oomides või megaoomides. (Vanemas kirjanduses ei tehtud vahet takisti kui elektrilise seadise ja takistuse kui selle seadise omaduse vahel — mõlemat nimetati takistuseks.)

Elektrilise seadme ehitusest annab ülevaate tema *elektriline lülitusskeem*. Igal seadme osal on oma kokkuleppeline tingmärk — skeemitähis: juhtmeid kujutame lihtsate joontena, mis on ülevaatlikkuse mõttes tõmmatud ikka horisontaalselt või vertikaalselt. Joonisel 3. 7 on elektrilise vooluringi skeemiga tutvumiseks näidatud tegelik lülitus (*a*), mis koosneb vooluallikast *P*, hõõglambist *HL* ja ühendusjuhtmetest, ning selle kõrval sama lülituse elektriline skeem (*b*). Üksikute lülituselementide skeemitähiseid kujutab õpiku lõpus toodud lisa 1.



Joonis 3. 7. Tegelik elektriline lülitus (*a*) ühes sellele vastava skeemiga (*b*).

§ 7. TAKISTUSE TEMPERATUURITEGUR

Aine eritakistus ja seega ka elektrijuhtme takistus sõltub tema temperatuurist. Kõigi metallide takistus koos temperatuuri tõusuga suureneb. Tahketest elektrijuhtidest ainult söe takistus temperatuuri tõusmisel väheneb.

Aine *takistuse temperatuuritegur* α (kreeka tähestiku täht «alfa») on arv, mis näitab, kui suurel määral muutub selle aine takistus temperatuuri tõusmisel mingist algtemperatuurist 1° C võrra [1].

Juhtme lõplik takistus $R_{lõplik}$ oomides pärast soojenemist t° C võrra avaldub valemist:

$$R_{lõplik} = R + Rat = R(1 + at),$$

kus R on juhtme esialgne takistus oomides.

Mõningaid algtemperatuurile 20° C vastavaid ainete takistuse temperatuuritegureid esitab tabel 1 koos eritakistustega. Ainete eritakistused antakse samuti 20° C juures.

[1] Ainetel, mille elektriline takistus suureneb temperatuuri tõusuga, on takistuse temperatuuritegur positiivse märgiga ja ainetel, mille takistus väheneb temperatuuri tõusuga, on see negatiivne.

Näide. Leida 100-oomise takistusega raudtraadi takistuse juurdekasv ja takistuse suurus kuumendamisel algtemperatuurilt 20° C kuni 70° C, s. o. $t = 50°$ võrra.

$$R_{lõplik} = 100(1 + 0{,}006 \cdot 50) = 130 \text{ oomi.}$$

Märkida tuleb, et elektrijuhi takistuse juurdekasvu tema kuumendamisel kõrgemate temperatuurideni ei saa näites toodud viisil enam täpselt arvutada, sest ainete takistuse temperatuuritegur pole kõrgetel temperatuuridel püsiva, konstantse väärtusega. Seetõttu võib takistuse temperatuuritegurit kasutada ainult mõnesaja-kraadises temperatuuridevahemikus, kus tekkiv viga praktiliste arvutuste täpsust veel oluliselt ei mõjuta.

Elektrotehnikas kasutatakse juhtmematerjalina vase kõrval laialdaselt ka alumiiniumi. Seega on kohane nende metallide kui elektrotehniliste materjalide omadusi võrrelda.

Alumiiniumi eritakistus on umbes 1,7 korda suurem kui vasel. Seetõttu peab alumiiniumtraadi ristlõige sama takistuse saamiseks olema 1,7 korda suurem kui vasktraadil. Sellele vastab läbimõõdu suurendamine 1,3-kordseks. Kuna aga alumiinium on vasest 3,2 korda kergem, siis osutub samade elektriliste omadustega alumiiniumjuhe siiski vaskjuhtmest umbes poole kergemaks. See ongi madala hinna kõrval üks alumiiniumi kasutamise eeliseid.

Alumiiniumist elektrijuhtmete kasutamisel tuleb silmas pidada, et ta kattub õhuhapniku ja niiskuse toimel halvasti elektrit juhtiva oksüüdikihiga. Hea ühenduskoha saamiseks tuleb alumiiniumjuhe keerata tugevasti kruviklemmi alla. Kohad, kus alumiinium on ühendatud vasega või pronksiga, tuleb katta niiskuskindlalt mõne isoleerlakiga või asfaldiga. Vastasel korral rikneb elektrokeemiliste reaktsioonide tagajärjel kontakt väga kiiresti. Alumiiniumi puudusena tuleb veel märkida tema rasket joodetavust tavalise pliitina-joodisega.

Olulisim

1. Metallides ja söes on aatomite vahelises ruumis kergesti liikuvaid vabu elektrone.
2. Vabad elektronid võivad väliste jõudude mõjul aines liikuda ka ühesuunaliselt, kandudes ühe aatomi koostisest teise aatomi koostisse. See on elektrivool.
3. Metallid ja süsi on elektrijuhid. Vask on parim tehnikas kasutatav elektrijuht.
4. Valdavas osas mittemetallides ja nende ühendites ei ole vabad elektronid normaaltingimustes praktiliselt liikuvad. Elektrivoolu nendes ainetes seetõttu tekitada ei saa. Need ained on elektrilised mittejuhid ehk dielektrikud.
5. Elektrihulga (elektrilaengu suuruse) mõõtmise ühikuna on kasutusel kulon. Ühe kuloni suurune elektrilaeng moodustub 6300 biljonist elektronist.

6. Elektrivoolu juhtmes mõõdetakse juhtme ristlõiget ühes sekundis läbiva elektrihulgaga. Kui elektrivoolu tugevus juhtmes on üks amper, siis läbib ühes sekundis juhtme ristlõiget üks kulon elektrit.

7. Elektrivoolu juhtmes põhjustab juhtmele mõjuv pinge — elektriliste potentsiaalide vahe juhtme otstel («elektriliste rõhkude» erinevus). Pinget mõõdetakse voltides.

8. Elektrivoolu suunda juhtmes loetakse kokkuleppeliselt välises vooluringis (väljaspool vooluallikat) positiivselt pooluselt negatiivsele. Püsiv elektrivool võib tekkida ainult suletud vooluringis. Tegelik elektrilaengute (vabade elektronide) liikumissuund metalljuhtmes on vastupidine kokkuleppelisele (konventsionaalsele) voolusuunale.

9. Jõud, mis tekitab vooluallika ühendusklemmide vahele pinge ja hoiab selle püsivana, on elektromotoorne jõud. Seda mõõdetakse samuti kui pinget voltides.

10. Iga voolujuht tõkestab teda läbivat elektrivoolu. See on voolujuhi elektrilise takistuse avaldus. Voolujuhi elektrilise takistuse mõõtühik on oom.

11. Voolujuhtme materjali eritakistus on sellest materjalist valmistatud ühe meetri pikkuse traadi takistus oomides 20° C juures, kui traadi ristlõikepind on 1 ruutmillimeeter.

12. Takistuse pöördarv on elektrijuhtivus.

13. Voolujuhtme materjali erijuhtivus on sellest ainest valmistatud ühe meetri pikkuse ja ühe ruutmillimeetri suuruse ristlõikepinnaga ühtlase traadi juhtivus. Erijuhtivus on eritakistuse pöördväärtus.

Ülesanded

1. Leida 200 m pikkuse ja 0,5 mm^2 ristlõikepindalaga konstantaantraadi takistus. (Vastus: 200 Ω.)

2. Leida 0,24 mm^2 ristlõikepindalaga raudtraadi pikkus, kui selle takistus peab olema 75 oomi. (Vastus: 150 m.)

3. Leida 700-oomise takistusega raudtraadi läbimõõt, kui selle pikkus on 2 kilomeetrit. (Vastus: 0,66 mm.)

4. PEATÜKK

VOOLU, PINGE JA TAKISTUSE PÕHISEOSED

§ 1. ELEKTRIVOOLU, PINGE JA VOOLURINGI TAKISTUSE VAHELINE SEOS

Eespool tutvusime elektriliste põhisuurustega: pingega ja vooluga. Nägime, et igasugune elektrijuht avaldab teda läbivale voolule takistust. Olenevalt elektrijuhtide kujust ja materjalist

ning mõningatest välistingimustest on nende elektriline takistus erisugune.

Juba möödunud sajandi algul märgati, et elektrivoolu, vooluallika pinge ja vooluringi takistuse suuruste vahel kehtib kindel seos. Selle seose sõnastas 1826. aastal saksa füüsik *Georg Simon Ohm,* kelle nime see elektrivoolu põhilisim seadus praegugi kannab. Ohm leidis, et igas suletud ning mittehargnevas vooluringis on vool võrdeline pingega ja pöördvõrdeline vooluringi takistusega. See tähendab: mida kõrgem pinge mõjub kindla suurusega takistusele või mida väiksem on see takistus konstantse (püsiva) pinge puhul, seda tugevam vool läbib seda takistust.

Nähtus on sarnane joonisel 3. 6 kujutatuga. Mida võimsamalt töötab pump *P,* seda suuremaks kujuneb kummaski anumas asuvate veehulkade nivoode vahe *U* ja seda intensiivsemalt hakkab voolama vesi ühendustorus. Järelikult sõltub veevoolu tugevus torus selle toru otstega ühendatud anumates asuvate veehulkade nivoode vahe suurusest *U.*

Peale selle sõltub veevoolu tugevus torus ka toru enda mõõtmetest. On ju selge, et peenem toru ei lase voolata vett sellisel hulgal kui jämedam toru. Teisest küljest sõltub veevoolu tugevus ka toru pikkusest. Mida pikem on toru, seda nõrgem on veevool (seda vähem vett läbib toru mingit ristlõiget sekundis). Kui tähistada veevoolu tugevust tähega *I* (liitrite arv sekundis), nivoode vahet — *U* (mõõdetuna meetrites) ning ühendustoru takistava mõju suurust — *R* (*R* väärtus on 1 sellise toru puhul, millest ühemeetrise nivoode vahe puhul voolab ühe sekundi jooksul läbi üks liiter vett), siis saame nende suuruste kohta kindla matemaatilise seose, mida võib kirjutada järgmisel kujul:

$$\text{veevoolu tugevus } I = \frac{\text{nivoode vahe } U}{\text{ühendustoru takistus } R}.$$

Täpselt sarnane praegukirjeldatuga on ka olukord elektrivoolu puhul. Suletud mittehargnevas vooluringis on elektrivoolu tugevuse, pinge kõrguse ja vooluringi elektrilise takistuse suuruste vahekorrad täpselt sarnased eelnenud näites toodud veevoolu tugevuse, nivoode vahe ja alumise ühendustoru takistava mõju seosega:

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

Siin on voolu tugevus *I* mõõdetav amprites, pinge *U* voltides ja takistus *R* oomides. Järelikult: kui 1-oomise takistuse otste vahel mõjub 1-voldine pinge, siis tekib selles takistuses vool, mille tugevus on üks amper.

Ohmi seaduse põhivalemi

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

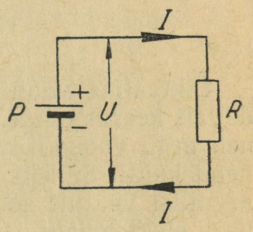
teisendid on:

$$U = IR \text{ ja } R = \frac{U}{I}.$$

Need kolm valemit võimaldavad leida kolmest seostatud suurusest: pingest, voolust ja takistusest üht tundmatut suurust, kui ülejäänud kaks suurust on tuntud.

Järgnevate arvuliste näidete najal püüame selgitada Ohmi seaduse kasutamist praktikas. Nende näidete juures eeldame, et ühendusjuhtmete ning vooluallika enese takistused on võrreldes takisti R takistusega niivõrd väikesed, et neid võib jätta arvestamata.

Näide. Olgu antud joonisel 4. 1 kujutatud ühest vooluallikast P ja ühest takistist R koosnev suletud vooluring. Vooluallika pinge U on 5 volti, takisti takistus R on 10 oomi. Leida vool I selles vooluringis.



Joonis 4. 1. Näidete juurde arvutustest mittehargnevas vooluringis.

Kuna vaadeldav vooluring on mittehargnev, siis peab vool olema selle vooluringi igas punktis ühe ja sama tugevusega. Vooluallika pinge mõjub juhtme kaudu otseselt takistile. Voolu arvulise väärtuse võib hõlpsalt leida Ohmi seaduse abil:

$$I = \frac{U}{R} = \frac{5}{10} = 0{,}5 \text{ amprit.}$$

Näide. Tavalist 25-vatist 220-voldist elektrihõõglampi läbiva voolu normaalne tugevus on umbes 0,11 amprit. Leida hõõgniidi takistus oomides.

Selles näites toodud andmetele vastavalt kujuneb lülitus joonisel 4. 1 tooduga sarnaseks. Ainult takisti R kujutab siin sümboolselt lambi hõõgniidi takistust; pinge U, mis mõjub lambile, on 220 volti, ja vool I, mis läbib lampi (loomulikult ka ühendusjuhtmeid ja vooluallikat), on 0,11 amprit. Jällegi on kaks suurust arvuliselt teada ja neile vastav kolmas suurus — takistus — avaldub Ohmi seadusest:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{0{,}11} \approx 2000 \text{ oomi.}$$

Ääremärkusena tuleks siinkohal nimetada, et see hõõglamp omab arvutatud takistust ainult normaaltemperatuuril kuumutatud hõõgniidi puhul; külmas olekus on R tunduvalt väiksem, kuna volframtraadi temperatuuritegur $\alpha = 0{,}0045$ ja kuumutamise temperatuur on 2000° C.

Näide. Mõõtmisel selgus, et elektritriikraua küttekeha takistus on umbes 30 oomi. Ühtlasi saab küttekeha takistustraadi

läbimõõdu järgi oletada, et seda küttekeha võib koormata maksimaalselt 3 ampri tugevuse vooluga. Kas seda triikrauda võib kasutada valgustusvõrgus, mille pinge on 220 volti?

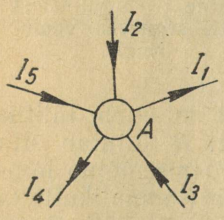
Siin on tuntud suurusteks takistus ja maksimaalne vool. Lülitusskeem on jällegi samasugune joonisel 4. 1 tooduga. Otsitav tundmatu on maksimaalne lubatav talitluspinge, mille juures vool ei ületa veel 3 amprit. Pinge avaldub siingi Ohmi seaduse kaudu:

$$U = IR = 3 \cdot 30 = 90 \text{ volti.}$$

Ilmselt pole võimalik seda triikrauda kasutada 220-voldises valgustusvõrgus, sest see on ehitatud 127-voldise elektrivõrgu jaoks. (Niisuguse pingega valgustusvõrk on näiteks Leningradis.) Arvutamine andis tulemuseks 127 voldi asemel 90 volti seetõttu, et küttekeha takistuse mõõtmine, mis toimus külmas olekus, andis mõnevõrra väiksema tulemuse, kui on lõplik takistus normaalse talitlustemperatuuri juures.

§ 2. VOOLU HARGNEMINE

Lihtsaima vooluringi kõrval kohtume praktikas pidevalt tunduvalt keerukamate olukordadega, kus ühesainsas vooluringis esineb mitu vooluallikat, mitu takistit ja peale selle ka voolu hargnemiskohti. Selleks et neid olukordi õigesti hinnata ja vajalikke arvutusi veatult sooritada, on tarvis täiendavalt tundma õppida veel elektrivoolu hargnemise reeglit — *Kirchhoffi esimest seadust.*



Joonis 4. 2. Kirchhoffi I seaduse rakendamine vooluringi hargnemispunktis.

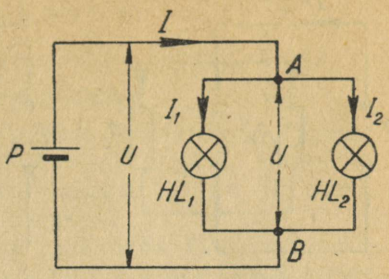
Kirchhoffi esimese seaduse kohaselt on juurdevoolavate voolude summa vooluringi igas hargnemispunktis võrdne äravoolavate voolude summaga.

Joonisel 4. 2 on voolude hargnemispunkti A suubuvateks vooludeks I_2, I_3 ja I_5, äravoolavateks vooludeks I_1 ja I_4. Seega Kirchhoffi I seaduse põhjal:

$$\underbrace{I_2 + I_3 + I_5}_{\text{juurdevoolavate voolude summa}} = \underbrace{I_1 + I_4}_{\text{äravoolavate voolude summa}}.$$

Ilmselt vastab see tõele, sest kui juurdevoolavate voolude summa mingis hargnemispunktis poleks võrdne sealt äravoolavate voolude summaga, vaid oleks viimasest suurem või väiksem, tekiks selles hargnemispunktis kas elektrivoolu moodustavate vabade elektronide kuhjumine või puudujääk, sest sel juhul voolaks mingi aja jooksul hargnemispunkti juurde vastavalt kas rohkem või vähem elektrone kui sealt sama aja vältel ära voolab, mida aga muidugi olla ei saa.

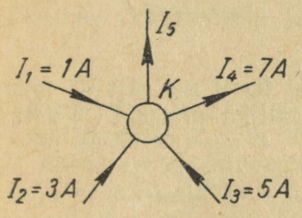
Näide. Vooluringi (joonis 4. 3) on vooluallika P klemmidega ühendatud paralleelselt kaks hõõglampi HL_1 ja HL_2, mida läbivad voolud vastavalt $I_1 = 1$ A ja $I_2 = 2$ A. Leida vooluallikat läbiv vool I.



Joonis 4. 3. Näidete juurde arvutustest hargnevas vooluringis.

Siin on vooluring hargnev: vooluallika pinge U on rakendatud (mõjub) otseselt hargnemispunktidele A ja B. Kuna voolud kummaski harus on teada, siis võime leida näiteks hargnemispunkti A juurdevoolava voolu I (mis ongi vooluallikat läbiv vool). Kirchhoffi esimese seaduse põhjal peab see vool olema võrdne äravoolavate haruvoolude summaga. Seega

$$I = I_1 + I_2 = 1 + 2 = 3 \text{ amprit.}$$



Joonis 4. 4. Näite juurde Kirchhoffi I seaduse kasutamisest vooluringi hargnemispunktis.

Näide. Hargneva vooluringi mingisse punkti K voolavad voolud $I_1 = 1$ A; $I_2 = 3$ A ja $I_3 = 5$ A, ning sealt eemale voolavad voolud $I_4 = 7$ A ja I_5, mille suurus tuleb kindlaks määrata (joonis 4. 4).

Kuna siinselgi juhul juurdevoolavate voolude summa on võrdne äravoolavate voolude summaga, siis kehtib võrdus:

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_4 + I_5$$

ehk

$$1 + 3 + 5 = 7 + I_5.$$

Toome kõik tuntud suurused vasakule poole:

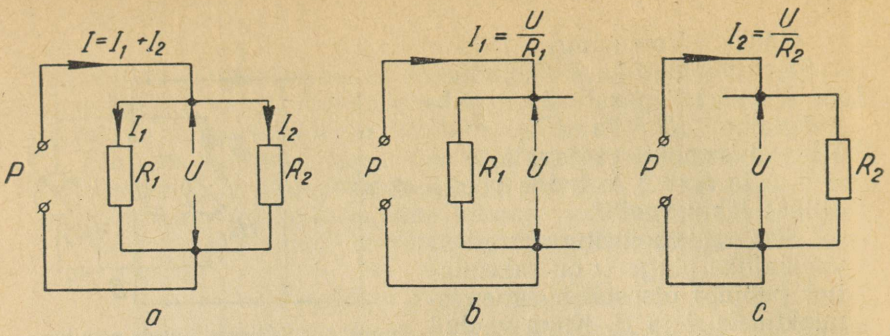
$$1 + 3 + 5 - 7 = I_5,$$

ehk

$$I_5 = 2 \text{ amprit.}$$

Ohmi seadust on võimalik rakendada mitte ainult terve vooluringi, vaid ka iga selle osa kohta eraldi. Näitena võtame vaatluse alla hargneva vooluringi jooniselt 4. 5-*a*. Siin mõjub vooluallika P pinge U vooluringi kummalegi harule ning tekitab nendes harudes voolud I_1 ja I_2. Haruvoolud pole siinsel juhul teineteisest sõltuvad (kuigi kehtib seos $I = I_1 + I_2$, on kumbki haruvool määratud vaid vastava haru takistusega ja sellele mõjuva pingega).

Nähtuse selgitamiseks vaatleme selle vooluringi üksikuid harusid eraldi. Oletame esmalt (joonis 4. 5-*b*), et vooluallikaga on ühendatud vaid vooluringi vasakpoolne haru, s. o. ainult üks



Joonis 4.5. Ohmi seaduse rakendamine hargneva vooluringi osades.

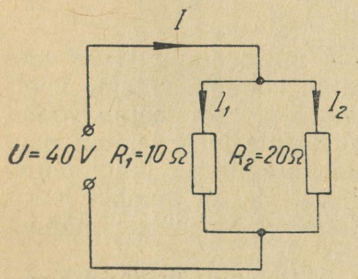
tarbijatest (mis on sümboolselt kujutatud takistina R_1). Sellises vooluringis mõjub takistile R_1 vooluallika klemmidel valitsev pinge U. Ilmne on, et taolisel juhul tekib vool I_1, mille määrab Ohmi seadus:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}.$$

Nüüd vaatleme vooluringi parempoolset haru iseseisvalt (joonis 4.5-*c*). Siingi mõjub takistile R_2 vooluallika pinge U. Vastav vool selles harus

$$I_2 = \frac{U}{R_2}.$$

Niiviisi jõudsime selgusele selles, et antud hargneva vooluringi harudes ü k s i k u l t (ja loomulikult ka vooluallikas eneses) voolavad voolud vastavalt I_1 ja I_2. Oleksid aga esialgse lülitusskeemi kohaselt vooluallikaga ühendatud korraga mõlemad paralleelsed (rööbitised) vooluharud, siis ilmselt haruvoolud jääksid endisteks, sest harude takistustele mõjub endine pinge, kuid vooluallikat hakkab läbima vool tugevusega $I = I_1 + I_2$.



Joonis 4.6. Näite juurde arvutustest hargnevas vooluringis.

Näide. Joonisel 4.6 kujutatud hargnevas vooluringis on harude takistused $R_1 = 10$ oomi ja $R_2 = 20$ oomi. Nendele takistustele on rakendatud pinge $U = 40$ volti.

Leida haruvoolud I_1 ja I_2 ning vooluallikat läbiv vool I.

Kuna on teada harudele rakendatud pinge ja kummagi haru takistuste suurused, saame Ohmi valemist otseselt:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{40}{10} = 4 \text{ amprit};$$

$$I_2 = \frac{U}{R_2} = \frac{40}{20} = 2 \text{ amprit.}$$

Kogu vooluallikat läbiv vool on haruvoolude summa, seega

$$I = I_1 + I_2 = 4 + 2 = 6 \text{ amprit.}$$

Näide. Eelmisega sarnases hargnevas vooluringis (joonis 4. 5-*a*) on vooluallikat läbiv vool $I = 1{,}5$ amprit. Harudele mõjub pinge $U = 5$ volti. Ühe haru takistus R_1 on 10 oomi. Leida haruvoolud ja teise haru takistus R_2.

Esimese haru kohta saame kohe rakendada Ohmi seadust, sest on teada haru takistus ja sellele mõjuv pinge. Vool selles harus on

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = \frac{5}{10} = 0{,}5 \text{ amprit.}$$

Kuna on teada, et vooluallikat läbib 1,5-amprine vool, siis vool teises harus peab Kirchhoffi esimese seaduse alusel olema

$$I_2 = I - I_1 = 1{,}5 - 0{,}5 = 1{,}0 \text{ amprit.}$$

Nüüd on aga ka teise haru kohta kaks suurust teada; pinge ja vastava haruvoolu jagatisena saamegi teise haru takistuse:

$$R_2 = \frac{U}{I_2} = \frac{5}{1} = 5 \text{ oomi.}$$

Kui tahame määrata koguvoolu, siis on paralleelsete vooluharude takistusi R_1, R_2, R_3 jne. võimalik elektrilises mõttes asendada üheainsa takistusega R_p, mida läbib niisama tugev vool kui esialgseid harutakistusi läbivate voolude summa. Matemaatiliselt saab näidata, et mitut paralleeltakistit asendav takistus

$$R_p = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots},$$

kusjuures valemisse asetatavad suurused peavad olema antud ühesugustes ühikutes, s. o. kõik takistused peavad olema väljendatud kas oomides, kilo-oomides või megaoomides, kuid mitte nii, et näiteks osa takistusi on mõõdetud oomides ja osa kilo-oomides.

Suurust R_p eeltoodud valemist võime nimetada vooluringi paralleelselt lülitatud takistite R_1, R_2, $R_3 \dots$ *kogutakistuseks* voolude hargnemispunkti ja koondumispunkti vahel.

Toodud valemist on näha, et paralleelselt lülitatud takistite kogutakistus on alati väiksem ükskõik millisest harutakistusest.

Kuna elektriline juhtivus on võrdne takistuse pöördväärtusega ja takistus on võrdne juhtivuse pöördväärtusega

$$G = \frac{1}{R} \text{ ning } R = \frac{1}{G},$$

siis järeldub ülaltoodud valemist, et

$$\frac{1}{G_p} = \frac{1}{G_1 + G_2 + G_3 + \dots} \text{ ehk } G_p = G_1 + G_2 + G_3 + \dots,$$

kus G on vooluringi paralleelharude kogujuhtivus ja G_1, G_2, G_3, ... on üksikute harude juhtivused.

Niisiis on paralleelsete vooluharude kogujuhtivus võrdne üksikute harude juhtivuste summaga.

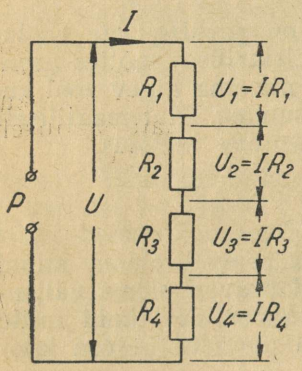
Kui on paralleelselt ühendatud ainult k a k s takistit, siis nende kogutakistuse saab arvutada käepärasema valemiga:

$$R_p = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Tabelis 2 toodud andmed võimaldavad orienteeruda mitmesugustel juhtumitel, kui on tarvis leida mitmest takistusest koosneva vooluringi või selle osa kogutakistust. Ühtlasi märgime, et õpiku lisas on toodud rööbiti-lülituses takistite kogutakistuse määramist hõlbustav nomogramm.

§ 3. PINGELANG VOOLURINGIS

Kui mingis vooluringis on vooluallika klemmide vahele lülitatud järjestikku mitu takistit (joonis 4.7), siis läbib kõiki neid võrdne vool. Pinge U, mis on rakendatud takistite ahela otstele, sunnib elektrone voolama kogu vooluringi ulatuses.



Joonis 4.7. Osapingete määramine Ohmi seaduse rakendamise teel mittehargneva vooluringi osades.

Eespool veendusime, et Ohmi seadust võib rakendada ka vooluringi üksikute osade kohta. Üksikutel takistitel esinevaid pingeid (U_1, U_2, U_3, U_4) nimetatakse *osapingeteks* ehk *pingelangudeks*. Pingelangude suurused avalduvad vastavate takistuste ja vooluringi läbiva voolu kaudu Ohmi seaduse põhjal:

$U_1 = IR_1$; $U_2 = IR_2$; $U_3 = IR_3$; $U_4 = IR_4$ jne.

Vooluallika pinge on võrdne vooluringis tekkivate üksikute järjestikuste pingelangude summaga:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + U_4.$$

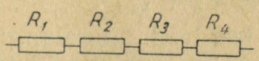
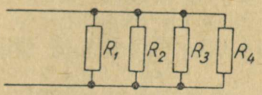
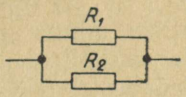
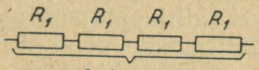
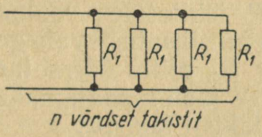
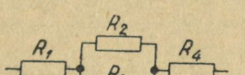
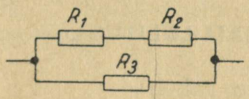
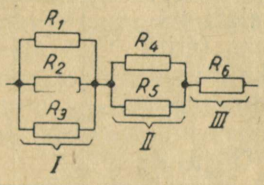
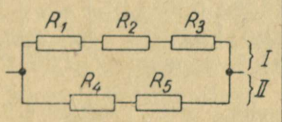
Seda väljendab Kirchhoffi teine seadus, mille kohaselt elektromotoorsete jõudude summa kinnises vooluringis võrdub sama vooluringi takistites tekkivate pingelangude (osapingete) summaga.

Pingelangude asendamisel eelmises võrrandis nendega võrdsete suurustega — voolu ja vastava takistuse korrutisega, saame:

$$U = \underbrace{IR_1}_{U_1} + \underbrace{IR_2}_{U_2} + \underbrace{IR_3}_{U_3} + \underbrace{IR_4}_{U_4} = I(R_1 + R_2 + R_3 + R_4).$$

Tabel 2

Vooluringi kogutakistuse määramise valemid

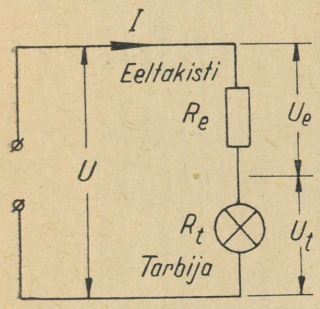
Lülitus	Skeem	Kogutakistuse leidmise valem
Takistid järjestikku-lülituses		$R_j = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + \dots$
Takistid paralleel-lülituses		$R_p = \dfrac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \dots}$
Kaks takistit paralleel-lülituses		$R_p = \dfrac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$
Võrdsete takistustega takistid järjestikku-lülituses		$R_j = n R_1$
Võrdsete takistustega takistid paralleel-lülituses		$R_p = \dfrac{R_1}{n}$
Takistid segalülituses (näiteid)		$R_s = R_1 + \dfrac{R_2 R_3'}{R_2 + R_3} + R_4$
		$R_s = \dfrac{(R_1 + R_2) \cdot R_3}{R_1 + R_2 + R_3}$
		$R_s = \underbrace{\dfrac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}}_{\text{I}} + \underbrace{\dfrac{R_4 \cdot R_5}{R_4 + R_5}}_{\text{II}} + \underbrace{R_6}_{\text{III}}$
		$R_s = \dfrac{\overbrace{(R_1 + R_2 + R_3)}^{\text{I}} \cdot \overbrace{(R_4 + R_5)}^{\text{II}}}{\underbrace{R_1 + R_2 + R_3}_{\text{I}} + \underbrace{R_4 + R_5}_{\text{II}}}$

Sulgudes asuv avaldis (kõigi järjestikuste takistuste summa) on vooluringi kogutakistus. Elektrilises mõttes võime seega asendada kõik järjestikku lülitatud takistid üheainsa takistiga, mille suurus R_j on võrdne järjestikuste takistuste summaga:

$$R_j = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots .$$

Kuna järjestikustel takistitel tekkivad pingelangud on mittehargnevas vooluringis võrdelised vastavate takistuste suurustega, sest neid läbib sama vool, siis ka osapingete ja vastavate osatakistuste suhted on võrdsed ja võrduvad neid läbiva vooluga:

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2} = \frac{U_3}{R_3} = \ldots = I.$$



Joonis 4.8. Eeltakisti kasutamine vooluallika pinge sobitamiseks tarbija talitluspingega.

Vooluallika pinge jagunemist järjestikustele takistitele kasutatakse sageli olukordades, kus vooluallika pinge U on kõrgem elektrienergia tarbija normaalsest talitluspingest U_t. Sellisel juhtumil lülitatakse vooluallika ja tarbija vahele järjestikku nn. *eeltakisti* (joonis 4.8). Sobiva suurusega eeltakistil R_e tekitatakse vooluallika pinge ja tarbija talitluspinge vahega võrdne pingelang U_e, mille võrra tarbijale mõjuv osapinge jääb madalamaks toitepingest.

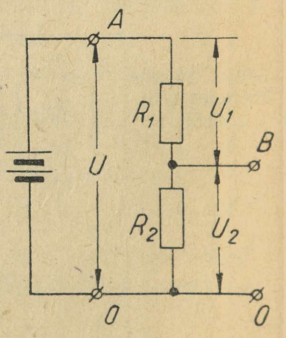
Eeltakisti takistus

$$R_e = \frac{U_e}{I} = \frac{U - U_t}{I},$$

kus takistus avaldub oomides, kui pinged väljendatakse voltides ja vool amprites.

§ 4. PINGEJAGAJA-LÜLITUS

Eeltakisti kasutamine tarbijale rakendatava pinge sobitamiseks liiga kõrget pinget omava vooluallikaga pole alati otstarbekas. Sageli kasutatakse selleks (eriti raadiotehnikas) joonisel 4.9 kujutatud kahest takistist R_1 ja R_2 koostatud seadist, nn. *pingejagaja-lülitust*. Vooluallikas lülitatakse seadme sisendklemmide O ja A vahele, mistõttu takisteid läbib püsiv vool, mille tugevuse määrab Ohmi seaduse põhjal vooluallika pinge ja vooluringi kogutakistus, s. o. $R_1 + R_2$ [1]. Kummalgi takis-



Joonis 4.9. Pingejagajalülitus koormuseta olukorras.

[1] Seda muidugi eeldusel, et vooluallika sisetakistus ja ühendusjuhtmete takistus on takistite R_1 ja R_2 suurustega võrreldes väga väikesed.

til tekib muidugi pingelang (vastavalt U_1 ja U_2), kusjuures kumbki osapinge on võrdeline vastava takisti suurusega ja seda takistit läbiva vooluga I:

osapinge takistil R_1 on $U_1 = IR_1$ ja
osapinge takistil R_2 on $U_2 = IR_2$.

Pingejagaja-lülituse väljandklemmide O ja B vahel mõjub takistil R_2 tekkiv osapinge U_2. Mida väiksem on takisti R_2 takistus, võrreldes kogutakistusega $R_1 + R_2$, seda väiksema osa pingejagaja-lülituse klemmidel O ja A mõjuvast *sisendpingest* U moodustab «alumisel» takistil tekkiv ning klemmide O ja B vahel mõjuv osapinge U_2, ja vastupidi: mida suurem on R_2 võrreldes takistusega $R_1 + R_2$, seda suuremaks kujuneb osapinge takistil R_2 ehk pingejagaja-lülituse *väljandpinge*.

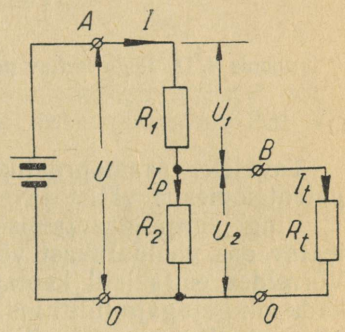
Juhul kui klemmidega O ja B pole ühendatud mingit voolutarbijat (haruühenduses voolu pole), kehtib võrdus:

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U,$$

mis võimaldab leida pingejagajalt saadava väljandpinge suurust.

See võrdus pole muidugi täpselt kehtiv siis, kui pingejagaja-lülitus on koormatud, s. o. kui klemmidega O ja B on ühendatud mingi tarbija, mida lülitusskeemis võib kujutada takistina R_t (joonis 4. 10). Niisugusel juhul läbib tarbijat vool I_t ja pingejagaja «ülemist» takistit R_1 läbiv vool I võrdub punktis C hargnevate voolude I_p ja I_t summaga:

$$I = I_p + I_t.$$



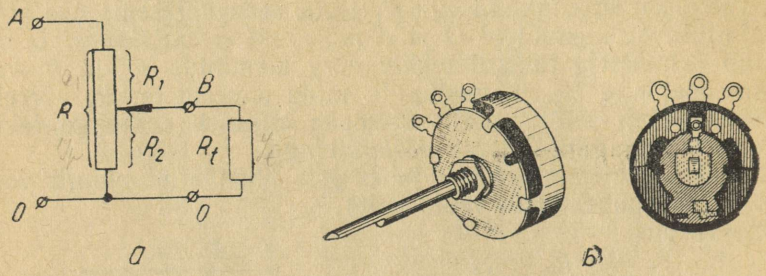
Joonis 4. 10. Pingejagaja-lülitus koormatud olukorras.

Muidugi kutsub takistit R_1 läbiv tugevnenud vool esile sellel suurema pingelangu, mis vähendab tarbijale mõjuva väljandpinge suurust U_2.

Pingejagaja-lülituselt saadav pinge pole nii suurel määral sõltuv tarbija voolust kui lihtsa eeltakisti kasutamisel. Seetõttu kasutatakse koormatud pingejagajaid raadiotehnikas juhtumeil, kui on eriti tähtis tarbijale rakendatava osapinge konstantsus tarbijat läbiva voolu muutliku tugevuse juures.

Koormuseta pingejagajaid kasutatakse raadiotehnikas alalis- või vahelduvpinge pidevaks muutmiseks, kusjuures tarbija takistus on praktiliselt lõpmatult suur (näiteks helitugevuse regulaator madalsagedusvõimendaja elektronlambi võreringis). Selleks kasutatav seadis, nn. *potentsiomeeter*, on valmistatud üheainsa takistina (joonis 4. 11-*a*), mille suurus on R. Takistil on liikuv

(liug-) kontakt, mis jagab kogutakistuse kaheks osaks R_1 ja R_2, kusjuures osade suurused sõltuvad liugkontakti asendist. Niipalju, kui ühe osa takistus liugkontakti nihutamisel väheneb, suureneb teise osa takistus, nii et nende summa $R_1 + R_2$ on alati võrdne potentsiomeetri takistusega R. Sisendpinge antakse sellisele pingejagajale takisti otsmiste klemmide (A ja O) kaudu; valitud suurusega väljandpinge saadakse liikuva kontakti B ja ühe või teise otsmise klemmi vahel.



Joonis 4. 11. Reguleeritav potentsiomeeter: *a* — skeem ja *b* — ehitus.

Tavalise, raadiopraktikas kasutatava pidevalt reguleeritava potentsiomeetri välist ja sisemist ehitust kujutab joonis 4. 11-*b*.

Pingejagaja kasutamisel pinge kohandamiseks muutub alati teatav osa vooluallikast võetavast võimsusest kasutult soojuseks. Võrreldes eeltakistil kaotatava võimsuse suurusega on võimsuskadu pingejagaja-lülituses suhteliselt suurem, sest siin läbib tarbijat ainult osa vooluallikast saadavast voolust. Muutuva koormuse korral on potentsiomeetrilt saadav väljandpinge seda püsivam, mida suurema osa vooluallikast saadavast voolust I moodustab potentsiomeetri «alumist» takistit läbiv vool I_p, kuid nimetatud voolu suurendamisega kasvab ka tekkiv energiakadu. Praktikas tuleb alati leida olukorrale sobiv lülitus vastavalt energiakao ja pinge stabiilsuse suhtes esitatavatele nõuetele. Kui energiakao mõningane suurenemine pole oluline ning on vajalik pinge stabiilsus, siis tuleb valida potentsiomeeterlülitus; teisel juhul, kui koormusvoolu muutumisel pole tarvis hoida pinget eriti püsivana ja suurenenud energiakadu pole vastuvõetav, tuleb kasutada lihtsat eeltakistit.

Olulisim

1. Suletud vooluringis on vool võrdeline elektromotoorse jõuga ja pöördvõrdeline selle vooluringi kogutakistusega.
2. Vooluringi hargnemispunktis on juurdevoolavate voolude summa alati võrdne äravoolavate voolude summaga.

3. Vooluringi mistahes osas on vool võrdeline sellele osale rakendatud pingega ja pöördvõrdeline selle osa takistusega.

4. Mitme paralleelselt lülitatud takisti kogutakistus avaldub valemist:

$$R_p = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \dots}.$$

5. Järjestikuste takistite kogutakistus on võrdne kõigi üksikute takistuste summaga:

$$R_j = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + \dots$$

6. Pingelang mingil takistil on võrdeline selle takistuse suurusega ja teda läbiva vooluga:

$$U = IR.$$

7. Vooluringis tekkivate järjestikuste pingelangude kogusumma võrdub vooluallika pingega:

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

Ülesanded

4. Leida vajalik eeltakisti 200-V talitluspingega ja 1,2-A vooluga tarbija lülitamiseks vooluallikaga, mille pinge on 220 V. (Vastus: 16 Ω.)

5. Leida joonisel 4. 5-*a* kujutatud hargnevas vooluringis pinge U, kui $I = 1$ A, $R_1 = 10$ Ω ja $R_2 = 30$ Ω. (Vastus: $U = 7{,}5$ V.)

6. Leida vooluringis joonisel 4. 7 pingelangud U_1, U_2, U_3 ja U_4, kui nende takistite takistused on vastavalt 5 kΩ, 10 kΩ, 15 kΩ ning 20 kΩ ja vool $I = 2$ mA. (Vastus: $U_1 = 10$ V; $U_2 = 20$ V; $U_3 = 30$ V; $U_4 = 40$ V.)

7. Leida eelmises ülesandes vooluallika pinge U. (Vastus: $U = 100$ V.)

8. Leida pingejagajal (joonis 4. 10) osapinge U_2, kui $U = 75$ V ja $R_1 = R_2 = R_t = 1000$ Ω. (Vastus: $U_2 = 25$ V.)

9. Leida samalt pingejagajalt toidetavat tarbijat läbiv vool I_t ja vooluallikat läbiv vool I. (Vastus: $I_t = 25$ mA ja $I = 50$ mA.)

10. Leida vool 220-V talitluspingega elektripliidi küttekehas, mille takistus on 55 oomi. (Vastus: $I = 4$ A.)

11. Leida vool sama pliidi küttekehas, kui see lülitada 127-V pingega elektrivõrku. (Vastus: 2,3 A.)

12. Leida auto 6-voldisest akumulaatorist võetav vool, kui sellest toidetakse kolme hõõglampi, millest kahe talitlusandmed on 6 V, 3 A ja ühel 6 V, 0,5 A. (Vastus: 6,5 A.)

13. Leida viie paralleeltakisti kogutakistus R_p, kui $R_1 = 5$ kΩ, $R_2 = 50$ kΩ, $R_3 = 500$ Ω, $R_4 = 0{,}5$ kΩ ja $R_5 = 50\,000$ Ω. (Vastus: $R_p = 235{,}8$ Ω.)

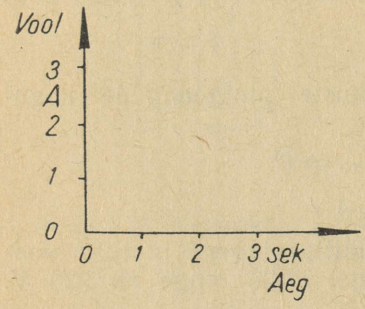
14. Leida vooluringi kogutakistus, mis koosneb kahest paralleelsest takistist $R_1 = 100$ Ω ja $R_2 = 0{,}1$ kΩ ning neile järjestikku ühendatud takistist $R_3 = 50$ Ω. (Vastus: $R = 100$ Ω.)

5. PEATÜKK

ALALIS- JA VAHELDUVVOOL

§ 1. ALALISVOOL

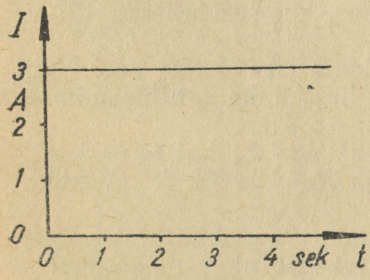
Elektrivoolu, mille suund ei muutu, nimetatakse alalisvooluks. Alalisvoolu toodavad mehaanilised ja keemilised vooluallikad, termo- ja fotoelemendid. Eriseadiste abil on võimalik ka teisi hiljem käsitletavaid vooluliike muundada alalisvooluks.



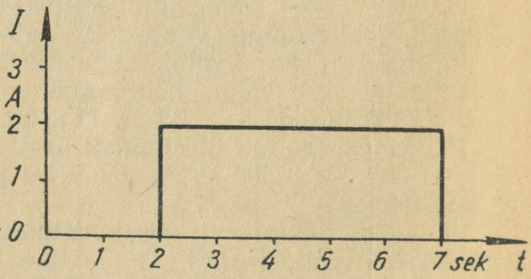
Joonis 5. 1. Teljestik voolu ajalise muutumise graafiliseks kujutamiseks.

Otstarbekas ja näitlik on kujutada elektrivoolu või pinge ajalist muutumist graafiliselt, sest sel juhul on võimalik piltlikult võrrelda üksikuid vooluliike ja hiljem käsitada vahelduvvooluringides tekkivaid nähtusi. Täisnurkse teljestiku ehk ristkoordinaadistiku (joonis 5. 1) rõhtteljele (mida nimetatakse abstsissteljeks) kantakse pikkusühikutena mingis mõõtkavas ajaühikud (näiteks sekundid või selle murdosad) ja püstteljele (ordinaatteljele) voolu või pinge ühikud (amprid, voldid). Selle graafiku pinnal saab joone abil ülevaatlikult kujutada mistahes elektrivoolu ajalist kulgu. Igale punktile graafikul vastab üks suurus rõhtteljel (ajamoment) ja üks suurus püstteljel (voolu või pinge hetkväärtus); kõik kokkukuuluvad ajamomentide ja voolu või pinge hetkväärtuste paarid annavadki ühe või teise kujuga joone graafikul.

Konstantse alalisvoolu puhul peab seda iseloomustav graafik olema sirge rõhtjoon, mille kaugus horisontaalsest ajateljest



Joonis 5. 2. Alalisvoolu graafik.



Joonis 5. 3. Lühiajalise voolutõuke graafik.

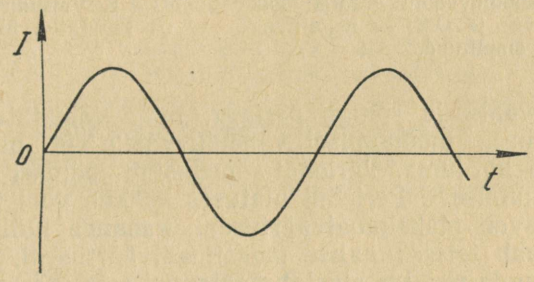
(mida tavaliselt märgitakse tähega t) on määratud antud voolu väärtusega. Joonis 5. 2 kujutab konstantset 3-amprist alalisvoolu ja joonisel 5. 3 on toodud viiesekundise kestusega 2-amprise voolupulsi graafik.

Konstantset alalisvoolu moodustav elektronide liikumine juhtmes toimub pidevalt kindlas suunas ja juhtme mingit ristlõiget läbivad võrdsetes ajavahemikes võrdsed hulgad elektrone.

§ 2. VAHELDUVVOOL

Elektrivoolu, mille tugevus ja suund perioodiliselt muutub, nimetatakse vahelduvvooluks.

Mingi ajavahemiku, nn. *perioodi* jooksul kulgeb vool juhtmes ühes suunas, tugevneb pidevalt kuni mingi maksimaalse väärtuseni, nõrgeneb seejärel kuni nullini ning uuesti tekkiv vastupidise suunaga vool omandab jällegi maksimaalse tugevuse ja nõrgeneb taas nullini. Edasi kordub kirjeldatud protsess perioodiliselt.



Joonis 5. 4. Siinuselise vahelduvvoolu graafik.

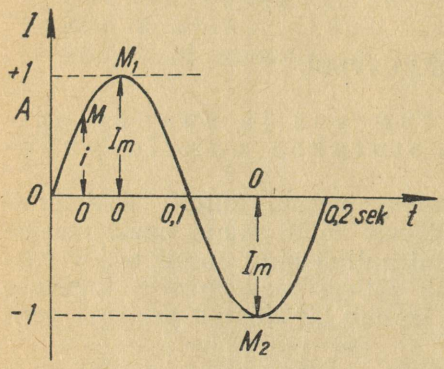
Lihtsaimat ja praktikas sagedamini kasutatavat vahelduvvoolu kujutab graafikul lainetaoline joon — matemaatikast tuntud siinusjoon (joonis 5. 4). Kuna voolu suund perioodiliselt muutub, tuleb juhtmes mingis kokkulepitud «positiivses» suunas voolava voolu väärtused kanda ajateljest ülespoole; vastupidised, «negatiivse» suunaga voolu väärtused sellest allapoole. Siinusjoone kujulist graafikut omav vahelduvvool — *siinusvool* — tekib näiteks silmusekujulises juhtmes selle pöörlemisel püsivas ühtlases magnetväljas.

Vahelduvvool on elektronide võnkuv liikumine juhtmes ühele ja teisele poole. Iga võnkumist, nii mehaanilist kui ka elektrilist, iseloomustab kolm põhisuurust: amplituud, periood ning sagedus.

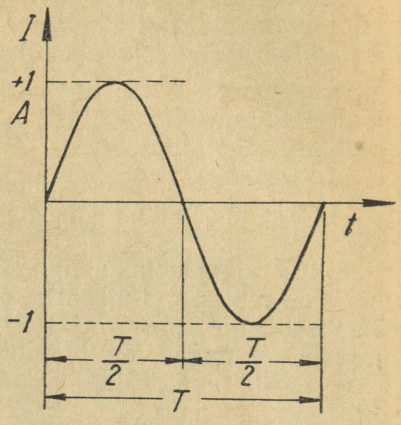
Vahelduvvoolu või -pinge *amplituud* on voolu või pinge maksimaalne väärtus. Joonisel 5. 5 väljendab amplituudi lõik OM_1 või

OM_2. Näeme, et kujutatud vahelduvvoolu amplituud on 1 amper. Vahelduvvoolu ja -pinge amplituudide väärtusi tähistatakse indeksiga *m*. Nii on joonisel 5. 6 toodud voolu amplituud $I_m = 1$ A.

Vahelduva elektromotoorse jõu, vahelduvpinge ning -voolu *hetkväärtusi* mingil hetkel tähistatakse vastavalt *e*, *u* või *i*.



Joonis 5. 5. Vahelduvvoolu graafik; lõik OM_1 — positiivne ja OM_2 — negatiivne amplituud.



Joonis 5. 6. Vahelduvvoolu graafik; on kujutatud üks periood.

Vahelduvvoolu ja -pinge *periood*, mida tähistatakse tähega *T*, on aeg, mille möödumisel vahelduvvoolu või -pinge muutumine hakkab korduma. Perioodi moodustab joonisel 5. 6 kujutatud osa võnkumisest. Perioodi ulatuses hakkab vool ühes suunas voolama, kasvab maksimaalväärtuseni, kahaneb nullini, muudab suunda, kasvab teisesuunalise maksimaalväärtuseni, langeb taas nullini ja suunda muutes alustab voolamist esialgses suunas, järelikult kuulub viimane juba järgmisse perioodi.

Periood *T* jaguneb kaheks poolperioodiks *T*/2 ja neljaks veerandperioodiks *T*/4. Sageli jaotatakse periood 360 faasikraadiks. Siis vastaks poolperioodile 180° ja veerandperioodile 90°.

Sagedus on võnkumise perioodide arv sekundis. Sageduse tähiseks on *f* ja mõõtühikuks *herts* (lühend Hz, venekeelses kirjanduses *гц*). Kui voolu või pinge võnkumise täisperioode toimub sekundis näiteks 100, siis on selle vahelduvvoolu või -pinge sagedus $f = 100$ Hz ja vool muudab suunda 200 korda sekundis.

Kerge on leida seost perioodi ja sageduse vahel. Kui võnkumise periood on näiteks $^1/_3$ sekundit, siis sekundis toimub ilmselt 3 täisvõnget (-perioodi) ja sagedus on 3 hertsi.

Seega saavad mõistetavaks järgnevad kaks valemit, mis seovad perioodi *T* (mõõdetud sekundites) sagedusega *f* (hertsides):

$$f = \frac{1}{T} \quad \text{ja} \quad T = \frac{1}{f} \quad \text{või} \quad fT = 1.$$

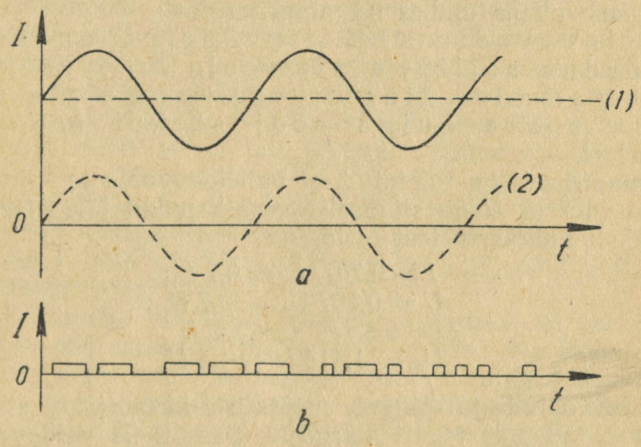
Tehnikas kasutatakse väga mitmesuguse sagedusega vahelduvvoole ja -pingeid. Valgustusvõrkudes on üleliiduliselt standardiseeritud voolu sageduseks 50 Hz. Raadiotehnikas aga rakendatakse voole, mille sagedus võib ulatuda mitme miljardi hertsini. Kõrgete sageduste mõõtmiseks kasutatakse ühikuna hertsist tuhat korda suuremat ühikut — kilohertsi (kHz, vene keeles *кгц*) ja miljon korda suuremat ühikut — megahertsi (MHz; vene keeles *мегц* ehk *Мгц*):

1 kHz = 1000 Hz = 0,001 MHz;
1 MHz = 1000 kHz = 1 000 000 Hz;
1 Hz = 0,001 kHz = 0,000 001 MHz.

Rea tugevvoolutehniliste eeliste tõttu kasutatakse elektrivõrkudes *kolmefaasilist süsteemi*: tarbijani juhitakse kolm võrdsete amplituudide ja võrdsete sagedustega, kuid omavahel 120 kraadi võrra faasis nihutatud pinget. Küsimust kolmefaasilisest energiasüsteemist vaadeldakse hiljem koos vahelduvvoolumasinate tööprintsiibiga (13. peatüki 8. paragrahv).

§ 3. LIITVOOLUD

Elektrivoolu, mis voolab küll ühes suunas, kuid aja jooksul muudab perioodiliselt oma tugevust, nimetatakse *pulseerivaks vooluks* (graafikud joonisel 5.7). Graafikul *a* kujutatud pulseerivvoolu või -pinget võib vaadelda kahe voolu (või pinge) liitumisel saadud vooluna, mille üks koostisosa ehk komponent (*1*) on konstantne alalisvool (joonisel on komponendid märgitud



Joonis 5.7. Pulseerivate voolude graafikuid: *a* — alalis- (1) ja vahelduvkomponendi (2) koosmõjul saadav liitvool; *b* — alalisvoolu impulsid telegraafiaparaadis.

punktiirjoonega) ja teine (*2*) on puhas vahelduvvool, mille sagedus on identne pulseeriva voolu vastava suurusega.

Pulseerivat voolu annavad alalisvoolugeneraatorid.

Teise iseloomuga pulseerivvool (graafikul *b*) võolab lihtsamat süsteemi telegraafiaparaatides, kus morse tähestiku abil antakse traadi kaudu edasi sõnumeid vooluimpulssidena. Joonisel on voolugraafik sõna «morse» üleandmisel.

Mitme vahelduvvoolu või -pinge liitumisel saadakse summana enam või vähem keeruka kujuga liitvool või -pinge. Kujukaks näiteks liitvooludest on 18. peatükis käsitletavad helisagedusvoolud.

§ 4. VAHELDUVVOOLU MÕÕTMINE; EFEKTIIVVÄÄRTUSED

Alati pole otstarbekas mõõta vahelduvvoole ja -pingeid amplituudväärtustega I_m ja U_m. Tunduvalt hõlpsam on kasutada nende *efektiivväärtusi*.

Elektrijuhe, mida läbib vahelduvvool, kuumeneb nagu alalisvoolu puhulgi. Kuid on ilmne, et vahelduvvool, mille amplituud on 1 amper, kuumendab juhet vähem kui arvuliselt sama tugevusega alalisvool (alalisvool omab p i d e v a l t üheamprist tugevust; vahelduvvoolu tugevus on 1 amper ainult kahel hetkel perioodis, muul ajal on ta sellest tunduvalt nõrgem). Kui otsida katseliselt siinuselist vahelduvvoolu, mille soojuslik toime oleks võrdne 1-amprise alalisvoolu toimega samades tingimustes, siis selgub, et selle vahelduvvoolu amplituud peab olema pisut üle 1,4 ampri.

Küsimust võib ka teisiti seada: millise tugevusega alalisvool on oma soojuslikult toimelt samaväärne antud 1-amprise amplituudiga siinuselise vahelduvvooluga? Selgub, et selle alalisvoolu tugevus peab olema umbes 0,7 amprit.

V a h e l d u v v o o l u e f e k t i i v v ä ä r t u s o n a r v u l i s e l t v õ r d n e s e l l i s e a l a l i s v o o l u t u g e v u s e g a, m i s t e k i t a b s a m a d e s t i n g i m u s t e s s a m a a j a v ä l t e l n i i s a m a s u u r e h u l g a s o o j u s t k u i s e e v a h e l d u v v o o l g i.

Matemaatiliselt on tuletatud, et vahelduvvoolu ja -pinge efektiivväärtused I ja U on siinuselise voolu puhul järgmises sõltuvuses maksimaalväärtustest I_m ja U_m:

$$I = 0{,}707\ I_m \approx 0{,}7\ I_m;$$
$$U = 0{,}707\ U_m \approx 0{,}7\ U_m;$$
$$I_m = 1{,}414\ I \approx 1{,}4\ I;$$
$$U_m = 1{,}414\ U \approx 1{,}4\ U.$$

Vahelduvvoolude ja -pingete mõõtmisel kasutatakse alati efektiivväärtusi, kui pole teisiti märgitud. Samuti ka valdav enamus vahelduvvoolutehnikas kasutatavaid mõõteriistu näitab efektiivväärtusi.

Näide. Leningradi valgustusvõrgus on vahelduvpinge efektiivväärtus 127 V. Leida selle amplituudväärtus.

Ülaltoodud valemi $U_m \approx 1{,}4\ U$ kohaselt

$$U_m \approx 1{,}4 \cdot 127 = 179 \text{ V}.$$

Märkida tuleb, et praktikas esineb harva täiesti siinuselise graafikuga vahelduvvoole. Käesolevaski näites leitud amplituudi suurus pole täiesti täpne, sest pinge valgustusvõrgus pole täpselt siinuseline. Kuid tekkiv ebatäpsus on praktiliselt tühine.

Näide. Leida 220-voldise valgustusvõrgu pinge maksimaalväärtus.

$$U_m \approx 1{,}4 \cdot 220 = 310 \text{ V}.$$

Näide. Vooluringis on siinuselise vahelduvvoolu amplituud 3,5 A. Leida selle voolu efektiivväärtus.

$$I \approx 0{,}7\ I_m = 0{,}7 \cdot 3{,}5 = 2{,}45 \text{ A}.$$

Vahelduvvoolu puhul kasutatakse Ohmi ja Kirchhoffi valemitega arvutamisel ikka efektiivsuurusi.

Olulisim

1. Alalisvoolu moodustavad elektronid liiguvad juhtmes pidevalt kindlas suunas.
2. Vahelduvvoolu puhul muutub elektronide liikumissuund ja voolu tugevus perioodiliselt.
3. Vahelduvvoolu või -pinge maksimaalne väärtus on selle voolu või pinge amplituud.
4. Vahelduvvoolu periood on aeg, mille vältel voolu hetkväärtus kasvab nullist positiivse maksimaalväärtuseni, kahaneb nullini, muudab suunda ja kasvab negatiivse maksimaalväärtuseni ning kahaneb taas nullini.
5. Sagedus on võnkeperioodide arv sekundis. Sageduse mõõtühik on herts. Hertside arv on sekundis toimuvate täisvõngete arv.
6. Sagedus on perioodi pöördväärtus ja vastupidi.
7. Tehnilise vahelduvvoolu sagedus on 50 hertsi.
8. Pulseeriv vool on ühesuunaline, kuid perioodiliselt muutuva tugevusega elektrivool.
9. Vahelduvvoolu efektiivväärtus on arvuliselt võrdne sellise alalisvooluga, mis samades tingimustes ja sama aja jooksul suudab sooritada selle vahelduvvooluga võrdse hulga tööd. Vahelduvvoolu ja -pinge efektiivväärtused on siinuselise voolu puhul umbes 30% võrra väiksemad vastavatest maksimaalväärtustest.
10. Vahelduvvoolu arvutustes kasutatakse peamiselt efektiivväärtusi.

15. Leida vahelduvvoolu sagedus, kui tema periood on 0,02 sek. (Vastus: $f = 50$ Hz.)

16. Leida, mitu kilohertsi on: a) 100 Hz; b) 1,36 MHz; c) 152 000 Hz; d) 3600 Hz.

17. Leida, mitu megahertsi on: a) 152 000 kHz; b) 152 000 Hz; c) 15 200 000 Hz; d) 10 000 Hz.

18. Arvutada siinuselise vahelduvpinge efektiivväärtus, kui amplituudväärtus $U_m = 380$ V. (Vastus: $U = 269$ V.)

19. Arvutada siinuselise vahelduvvoolu amplituud, kui efektiivväärtus on 3 A. (Vastus: $U_m = 4{,}2$ A.)

6. PEATÜKK

ALALISVOOLU TÖÖ JA VÕIMSUS

§ 1. ELEKTRIVOOLU TÖÖ

Kui elekter voolab metalljuhtmes, siis aineosakesed avaldavad liikuvatele elektronidele takistavat mõju. Niiviisi pidurdub elektronide liikumine ja osa nende liikumisenergiast kandub edasi aineosakestele ning eraldub soojusena.

Elektrivoolu poolt tehtava soojusliku või mehaanilise töö hulk sõltub juhtmes voolavast elektrihulgast Q ja juhtme otste vahelisest potentsiaalide vahest U. Kui tähistada tehtud töö hulka tähega A, siis

$$A = QU.$$

Kui antud seoses Q on mõõdetud kulonites ja U voltides, siis töö hulk A avaldub džaulides (lüh. J; venekeelses kirjanduses *дж*). Džauli nimetatakse ka vattsekundiks (Wsek).

Üks džaul on töö hulk, mille sooritab üks kulon elektrit liikumisel ühest punktist teise, kui nende punktide vahel on ühe voldi suurune potentsiaalide vahe.

Elektrivoolu poolt tehtava töö arvutamine on analoogiline mehaanilise töö hulga leidmisega. Mehaanikas on töö hulga ühikuks kilogramm-meeter (kgm). Ühe kilogramm-meetri suurune hulk tööd vabaneb ühe kilogrammi suuruse raskuse langemisel ühe meetri kõrguselt. Siin oleks raskuse ümberpaigutamise alg- ja lõpp-punkti kõrguste vahe mõiste analoogiline potentsiaalide vahega ja raskuse suurus — elektrihulgaga. Niisiis on ka mehaanikas kehtiv samasugune seos

$$A = QU,$$

kus A on tehtud töö kilogramm-meetrites. Q on vertikaalselt lan-

geva raskuse kaal kilogrammides ning U on selle ümberpaiknemise alg- ja lõpp-punkti vaheline kaugus meetrites.

Üks džaul on ligikaudu võrdne 0,1 kilogramm-meetriga, ehk täpsemalt

$$1 \text{ J} = 0{,}102 \text{ kgm}.$$

Džaulist suuremad töö mõõtmise ühikud on *vatt-tund* (Wh; venekeelses kirjanduses *втч*) ja *kilovatt-tund* (kWh; venekeelses kirjanduses *квтч*):

$$1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}; \quad 1 \text{ kWh} = 3\,600\,000 \text{ J};$$
$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ Wh} \text{ ja } 1 \text{ J} = 0{,}00028 \text{ Wh}.$$

§ 2. ELEKTRIVOOLU VÕIMSUS

Elektro- ja raadiotehnikas on sageli tarvis arvutada mitte voolu poolt tehtava töö hulka, vaid selle voolu võimsust.

Elektrivool, mis voolab juhtmes kõrgemalt potentsiaalilt madalamale, sooritab ühes sekundis seda rohkem tööd, mida suurem on potentsiaalide vahe ja mida suurem hulk elektrit läbib selle aja jooksul juhet. Töö hulka, mis teostatakse sekundi jooksul, nimetatakse *võimsuseks* (lühend P):

$$P = \frac{A}{t}.$$

Lihtsate matemaatiliste teisendustega saab näidata, et elektriline võimsus on võrdeline pinge ja vooluga. Elektrivool sooritab aja t jooksul töö A, mis on võrdeline pingega U ning vooluhulgaga Q:

$$A = UQ.$$

Võimsus väljendub ühes sekundis sooritatava töö hulgana:

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

ehk A asendamisel temaga võrdse suurusega UQ saame:

$$P = \frac{UQ}{t}.$$

Kuna elektrihulk, mis ühes ajaühikus läbib juhet, väljendab voolu I selles juhtmes:

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

siis

$$P = UI.$$

Kui U ja I on saadud valemis antud põhiühikutes — vastavalt voltides ja amprites, siis kujuneb võimsuse ühikuks džaul sekundis (J/sek). Elektrotehnikas nimetatakse seda ühikut *vatt* (lühend: W, vene keeles *вт*).

Suuremad võimsuse mõõtmise ühikud on kilovatt (kW; vene keeles *квт*) ja megavatt (MW; vene k. *мгвт* ehk *Мвт*), väiksemad ühikud on millivatt (mW; vene k. *мвт*) ja mikrovatt (μW; vene k. *мквт*):

1 kW = 1000 W = 0,001 MW;
1 MW = 1000 kW = 1 000 000 W;
1 mW = 1000 μW = 0,001 W;
1 μW = 0,001 mW = 0,000 001 W;
1 W = 1000 mW = 1 000 000 μW.

Mehaanikas kasutatakse võimsuse mõõtmiseks *hobujõudu* (lühend hj). Seda ühikut seob kilovatiga järgmine valem:

$$P_{(kW)} = 0{,}736\ P_{(hj)}{}^{1}.$$

Seega 1 hj = 0,736 kW ja 1 kW = 1,36 hj.

Elektrilise võimsuse leidmiseks vattides tuleb vool amprites korrutada pingega voltides. Kui nendest seostatud suurustest kaks on teada, siis avaldub tundmatu kolmas suurus valemitest

$$P = UI;\ U = \frac{P}{I} \text{ ja } I = \frac{P}{U}.$$

Väga tarvilikud on ka valemid, mis väljendavad võimsust takistuse ja pinge või voolu suuruste kaudu:

$$P = I^2R = IIR \text{ ja } P = \frac{U^2}{R} = \frac{UU}{R}.$$

Otstarbekuse mõttes on toodud tabelis 3 kõik alalisvoolu valemid, mis võimaldavad kahe suuruse tundmisel neljast: U, I, R, P ülejäänud kahte arvutada.

Juhtme või tarbija takistusel muundub osa seda läbiva voolu energiast soojuseks ja kandub ümbritsevatele esemetele või õhku. Eralduv soojushulk[2] on võrdeline ajaga ja võimsusega vaadeldavas vooluringis või selle osas.

Kuna vooluringi või selle osa takistus on enamasti püsiv suurus, siis saab soojuseks muunduvat võimsust määrata ka üksnes voolu kaudu valemist

$$P = I^2R.$$

---

[1] Selles valemis ja sageli ka edaspidi kasutame mõõtühikute märkimist sulgudes olevate indeksitena otse valemis vastava suuruse järel, mis annab ülevaatlikkuse ja väldib ebasobivate ühikute kasutamisel tekkida võivaid arvutusvigu.

[2] Soojushulka ei tohi ekslikult samastada temperatuuriga; viimane sõltub peale muunduva võimsuse veel jahtumistingimustest ja ümbritseva keskkonna temperatuurist.

Tabel 3

Alalisvoolu valemite koondtabel

Tuntud suurused \ Otsitavad suurused	Pinge U (voltides)	Vool I (amprites)	Takistus R (oomides)	Võimsus P (vattides)
Pinge U (voltides) Vool I (amprites)	—	—	$R = \frac{U}{I}$	$P = UI$
Pinge U (voltides) Takistus R (oomides)	—	$I = \frac{U}{R}$	—	$P = \frac{U^2}{R}$
Pinge U (voltides) Võimsus P (vattides)	—	$I = \frac{P}{U}$	$R = \frac{U^2}{P}$	—
Vool I (amprites) Takistus R (oomides)	$U = IR$	—	—	$P = I^2R$
Vool I (amprites) Võimsus P (vattides)	$U = \frac{P}{I}$	—	$R = \frac{P}{I^2}$	—
Takistus R (oomides) Võimsus P (vattides)	$U^2 = PR$ ehk $U = \sqrt{PR}$	$I^2 = \frac{P}{R}$ ehk $I = \sqrt{\frac{P}{R}}$	—	—

Siin tuleb erilist tähelepanu pöörata ruutsõltuvusele voolu ja võimsuse vahel. Seetõttu näiteks on ühendusjuhtmetes paratamatult tekkiv võimsuskadu võrdeline voolu ruuduga: kui voolu väärtus suureneb kaks korda, siis kasvavad soojuslikud energiakaod neljakordseks jne.

Soojuslike energiakadude osatähtsuse võimalikuks vähendamiseks kasutataksegi suurte energiahulkade ülekandmiseks kõrgepingeliine, kus sama võimsuse ülekandmine toimub võrreldes ülekandmisega madalamal pingel nõrgema voolu juures; väikesest voolust tingituna on soojuslikud energiakaod suhteliselt väikesed.

Energiakadusid ülekandeliinides aitab vähendada ka kolmefaasilise vahelduvvoolusüsteemi kasutamine (nn. keerdvoolusüsteemid).

TRÜ Raamatukogu

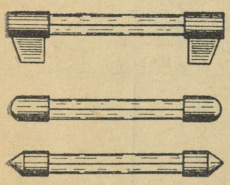
TARTU ÜLIKOOLI RAAMATUKOGU

§ 3. LÜHIS VOOLURINGIS

Kui vooluringis satuvad pingestatud juhtmed omavahel või mõne kõrvalise metalleseme kaudu ühendusse, siis tekib küllalt võimsa vooluallika olemasolul väga tugev vool, sest vooluallika pinge on rakendatud ainult juhtmete väikesele takistusele. Seda avariiolukorda nimetatakse *lühiseks* ja tekkivat voolu *lühisvooluks*.

Lühisvool tekitab ühendusjuhtmete takistusel suurel määral soojust, mille tagajärjel hävib isolatsioon, sulab juhtmete materjal, riknevad vooluringi lülitatud mõõteriistad jne. Halvimal juhul võib juhtmete ülekuumenemine olla põhjuseks isegi tulekahjule.

Lühiste tekkimise vältimiseks tuleb elektriseadmete monteerimisel pidada silmas ohutustehnika põhinõudeid: isoleermaterjal, mis katab juhtmeid, peab vastama kasutatavale pingele ning juhtmete ristlõikepind peab olema küllaldane selleks, et normaalse talitlusvoolu juures ei tekiks ülemäärase voolutiheduse tõttu juhtme ülekuumenemist. Samuti tuleb juhtmeid kaitsta mehaanilise vigastamise eest vastava kattega (näiteks plekist torud). Vooluallikad ja vooluringide üksikud osad varustatakse lühiste ohtlike tagajärgede vältimiseks nendesse järjestikku lülitatud kaitsmetega, näiteks *sulavkaitsmetega,* mis lühise tekkimisel katkestavad voolu.



Joonis 6. 1. Nõrkvoolutehnikas kasutatavaid sulavkaitsmeid.

Sulavkaitsmes olev peenike kergesti sulavast metallist traat sulab läbi voolu tugevnemisel üle lubatava normi. Nõrkvoolutehnikas kasutatakse sulavkaitsmetena kübarakujuliste metallkontaktidega varustatud klaastorukestesse paigutatud peeni traadikesi (joonis 6. 1).

Sulavkaitsmeid iseloomustavaks põhisuuruseks on *nimivool*, mis antakse amprites või milliamprites. Vastavalt kehtivatele normidele peab sulavkaitse taluma pidevat koormamist kuni 1,3-kordse nimivooluga ja läbi põlema 1,6-kordse nimivoolu puhul vähema kui ühe tunni vältel. Suuremal ülekoormamisel toimub läbipõlemine muidugi kiiremini — lühise puhul praktiliselt hetkeliselt. Seetõttu katkeb vooluring juba enne, kui lühisvool suudab juhtmeid nimetamisväärselt kuumutada.

§ 4. VÕIMSUSE ARVUTAMINE ALALISVOOLURINGIS JA AKTIIVTAKISTUSEGA VAHELDUVVOOLURINGIS

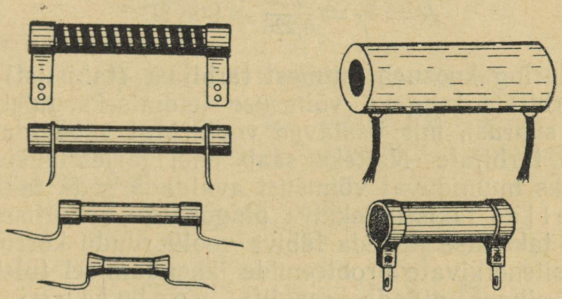
Eelmises paragrahvis toodud valemite praktilise kasutamise selgitamiseks toome siin rea arvutusnäiteid.

Käesolevas paragrahvis piirdume võimsuse määramisega alalisvooluringis või ainult aktiivtakistusi sisaldavas vahelduvvoo-

luringis. Viimasel juhul muidugi tuleb pinge ja vooluna kasutada nende efektiivväärtusi.

Aktiivtakistuse mõistet käsitletakse 10. peatüki 7. paragrahvis. Siinkohal märgime ainult, et küllalt madalate sageduste puhul on juhtme või tarbija aktiivtakistus praktiliselt võrdne selle alalisvoolutakistusega, kuid kõrgematel sagedustel (alates umbes 50 kilohertsist) osutub aktiivtakistus alalisvoolutakistusest märgatavalt suuremaks pinnaefekti tõttu. Viimatimainitu mõju vaadeldakse hiljem, seoses raadiotehniliste nähtustega (14. peatüki 6. paragrahvis). Nagu edaspidisest selgub, esineb vahelduvvooluringides ka reaktiivtakistusi, mis erinevad aktiivtakistusest selle poolest, et nemad võimsust ei tarbi — neid läbiva vahelduvvoolu energia ei muundu soojuseks.

Raadiopraktikas on enamasti tarvis määrata ühel või teisel takistil soojuseks muunduva võimsuse suurust, et vältida takistite ülekoormamist. Takistil eralduva soojuse hulk on võrdeline võimsusega. Liigse kuumenemise vältimiseks peab takistil eralduv võimsus jääma antud takisti jaoks lubatud piiridesse.



Joonis 6. 2. Raadioseadmetes kasutatavaid takisteid.

Raadioseadmete montaažil kasutatakse väikesi pulgakujulisi masstakisteid (joonis 6. 2), millede lubatav kestev koormatavus on vastavalt suurusele maksimaalselt 0,1; 0,25; 0,5; 1,0 ja 2,0 vatti. Nende võimsuste ületamisel takisti kuumeneb liigselt ja hävib. Suuremate võimsuste puhul on kasutusel suure eritakistusega metallsulamist valmistatud nn. takistustraadist keritud takistid. Viimased on tihti kaetud klaasikihiga.

Näide. Leida joonisel 4. 1 toodud vooluringi takistil R soojusena eralduv võimsus P, kui $U = 5$ V, $I = 0{,}5$ A ja $R = 10\ \Omega$.

Takistil R soojuseks muunduv võimsus on arvutatav mitmeti. Üks võimalus on järgmine. Takistit läbiv vool on teada, samuti ka takisti otste vahel mõjuv pinge. Võimsus avaldub nende korrutisena:

$$P = UI = 5 \cdot 0{,}5 = 2{,}5 \text{ vatti.}$$

Teisel viisil oleks see ülesanne lahendatav pinge ja takistuse suuruste kaudu:

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{5^2}{10} = \frac{5 \cdot 5}{10} = \frac{25}{10} = 2{,}5 \text{ vatti.}$$

Järelikult tuleb antud olukorras kasutada takistit, mille maksimaalne koormatavus on üle 2,5 vati.

Näide. Leida 50-vatist 220-voldist elektrihõõglampi läbiv vool ja hõõglambi takistus kuumas olekus.

Vastavad valemid võimaldavad otsitavaid suurusi kohe avaldada:

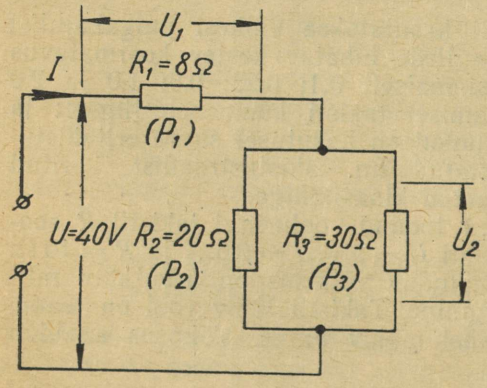
$$I = \frac{P}{U} = \frac{50}{220} = 0{,}226 \text{ A ja}$$

$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{50} = \frac{220 \cdot 220}{50} = 968\ \Omega.$$

Takistuse suurus on leitav pärast voolu arvutamist ka lihtsamini, ilma et oleks tarvis kasutada pinge ruutväärtust:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{220}{0{,}226} = 968\ \Omega.$$

Kui vooluring koosneb mitmest tarbijast (takistist), siis igale üksikule tarbijale langeva võimsuse leidmiseks tuleb kasutada ainult neid suurusi, mis vastavad vooluringi vaadeldavale osale, s. t. sellele tarbijale. Näiteks saab ühel järjestikustest takistitest soojuseks muunduvat võimsust avaldada seda takistit läbiva voolu ja sellel takistil tekkiva pingelangu korrutisena, või ka selle takisti takistuse ja teda läbiva voolu ruudu korrutisena jne. Praktikas esilekerkivate probleemide lahendamisel tuleb eksituste vältimiseks silmas pidada reeglit: vooluringi mingis osas või harus eralduva võimsuse määramiseks tuleb kasutada ainult vooluringi selle osa või haru takistust, sellele mõjuvat osapinget ning seda läbivat voolu.



Joonis 6. 3. Lülitusskeem arvutusnäitele.

Näide. Joonisel 6. 3 toodud lülituses on tarvis määrata takistitel soojuseks muunduv üldvõimsus ja üksikutel takistitel eralduvad võimsused.

Esmalt tuleb leida vool I. Selleks avaldame vooluringi kogutakistuse

R. Ilmselt on mõlemad pralleelselt ühendatud takistid R_2 ja R_3 asendatavad üheainsa takistiga, mille takistus

$$R_p = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = \frac{20 \cdot 30}{20 + 30} = \frac{600}{50} = 12\ \Omega.$$

Vooluringi kogutakistus $R = R_1 + R_p = 8 + 12 = 20\ \Omega$.

$$\text{Vool } I = \frac{U}{R} = \frac{40}{20} = 2\ \text{A}.$$

Nüüd saame leida üksikutel takistitel R_1, R_2 ja R_3 eralduvad võimsused (vastavalt P_1, P_2 ja P_3):

$$P_1 = I^2 R_1 = 2^2 \cdot 8 = 32\ \text{W}.$$

Rööbitistel takistitel R_2 ja R_3 eralduva võimsuse määramiseks on tarvis teada kas osapinget U_2 või siis haruvoolu I_2 või I_3. Kasutame esimest võimalust ja määrame takistitele R_2 ja R_3 rakendatud osapinge U_2. On pikemata selge, et see osapinge peab olema vooluallika klemmipingest madalam takistil R_1, tekkiva pingelangu U_1 võrra, mille suurus:

$$U_1 = IR_1 = 2 \cdot 8 = 16\ \text{V}.$$

Seega teine osapinge

$$U_2 = U - U_1 = 40 - 16 = 24\ \text{V}.$$

Kuna leitud osapinge U_2 mõjub kummalegi rööbitisele takistile, siis pole raske leida haruvoolusid nendes või otseselt vastavaid võimsusi:

$$P_2 = \frac{U_2^2}{R_2} = \frac{24^2}{20} = \frac{576}{20} = 28{,}8\ \text{W ja}$$

$$P_3 = \frac{U_2^2}{R_3} = \frac{24^2}{30} = \frac{576}{30} = 19{,}2\ \text{W}.$$

Kontrollimiseks arvutame, kas vooluallika poolt vooluringi antav võimsus $P = UI$ on võrdne osavõimsuste summaga kõigil takistitel $P_1 + P_2 + P_3$:

$$P = UI = 40 \cdot 2 = 80\ \text{W};$$

$$P_1 + P_2 + P_3 = 32 + 28{,}8 + 19{,}2 = 80\ \text{W}.$$

Seega $P_1 + P_2 + P_3 = P$ (ülesanne on õigesti lahendatud).

Sageli esineb juhtumeid, kus tarbija talitluspinge U_t erineb vooluallika pingest U. Sellise tarbija töölerakendamisel tuleb kasutada vooluringi järjestikku lülitatud eeltakistit, millel tekkiva pingelangu U_e tõttu voolutarbijale jääb normaalne pinge, kuid osa vooluallikast võetavast energiast muundub eeltakistil soojuseks. Eeltakisti arvutamisel tuleb määrata tema takistus R_e ja koormus P_e (joonis 4. 8).

Näide. 150-voldise talitluspingega (U_t) 15-vatine elektrihõõglamp rakendatakse tööle 220-voldises võrgus eeltakisti R_e abil (joonis 4. 8). Arvutada eeltakisti.

Eeltakistil tuleb tekitada pingelang

$$U_e = U - U_t = 220 - 150 = 70 \text{ V}.$$

Veel on tarvis teada eeltakistit läbiv vool I. See on aga järjestikku-lülituse tõttu võrdne lampi läbiva vooluga. Normaalse pinge korral on vool hõõglambis

$$I = \frac{P_1}{U_t} = \frac{15}{150} = 0{,}1 \text{ A}$$

ja eeltakisti takistus

$$R_e = \frac{U_2}{I} = \frac{70}{0{,}1} = 700 \ \Omega$$

ning koormus

$$P_e = U_e I = 70 \cdot 0{,}1 = 7 \text{ W}.$$

Käesolevas peatükis toodud näiteid ei või alati aluseks võtta siis, kui arvutatakse suurusi vahelduvvooluringis, kus esineb aktiivtakistuste kõrval ka reaktiivtakistusi (induktiivseid ja mahtuvuslikke takistusi).

Olulisim

1. Elektrivoolu poolt tehtava töö hulk A on võrdeline juhet läbinud elektrihulgaga Q ja pingega U.
2. Elektrivoolu võimsus P on voolu poolt ühe sekundi jooksul tehtava töö hulk. Võimsus on pinge ja voolu korrutis.
3. Elektrotehnikas on võimsuse põhiühikuks vatt.
4. Vooluringi mingis osas või harus on voolu võimsus võrdne sellele osale rakendatud pinge ja selles osas või harus esineva voolu korrutisega.
5. Vooluallika poolt vooluringi juhitav võimsus võrdub kõigi vooluringi osades tarbitavate osavõimsuste summaga.

Ülesanded

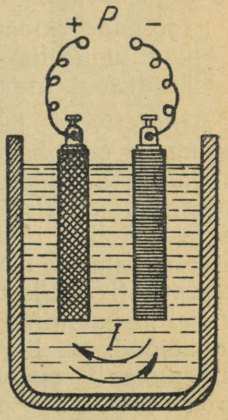
20. Leida eeltakisti suurus ja koormus, kui vooluallika pinge $U = 55$ V ja tarbijaks on 35-V talitluspingega ning 70-W võimsusega hõõglamp (joonis 4.8). (Vastus: 10 Ω; 40 W.)
21. Leida ülesandes nr. 4 eeltakisti koormus. (Vastus: 24 W.)
22. Leida ülesandes nr. 5 takistitel R_1 ja R_2 soojuseks muunduv võimsus. (Vastus: $P_1 = 5{,}625$ W ja $P_2 = 1{,}875$ W.)
23. Leida ülesandes nr. 6 toodud vooluringis vooluallikast võetav võimsus. (Vastus: $P = 0{,}2$ W.)
24. Leida samas vooluringis takistil R_3 eralduv võimsus. (Vastus: 0,06 W.)
25. Leida ülesandes nr. 8 kirjeldatud pingejagaja takistite R_1 ja R_2 koormused. (Vastus: $P_1 = 2{,}5$ W; $P_2 = 0{,}625$ W.)
26. Leida samast pingejagajast toidetava tarbija võimsus. (Vastus: $P_t = 0{,}625$ W.)

7. PEATÜKK

KEEMILISED VOOLUALLIKAD

§ 1. ELEKTROLÜÜS

Seni käsitlesime elektrivoolu kui elektrilaengute — vabade elektronide — suunatud liikumist metalljuhtmes. Katsed näitavad, et elektrivoolu juhivad ka hapete, leeliste ja soolade vesilahused. Kui paigutada mõne happe vesilahusesse kaks niisugusest metallist plaati, mida see hape keemiliselt ei mõjuta (näiteks plaatina) ja nendele anda vooluallikast *P* pinge, siis tekib vooluringis vool (joonis 7. 1). Elektronid liiguvad vooluallika negatiivselt pooluselt sellega metalljuhtme abil ühendatud plaadile — juhtmes tekib vool. Ka teist plaati vooluallika positiivse poolusega ühendavas juhtmes tekib vool. Ilmselt ei saa püsiva voolu olemasolu tõttu vooluring olla kusagilt katkestatud, niisiis peavad elektrilaengud kanduma ühelt plaadilt teisele läbi lahuse.



Joonis 7. 1. Elektrivool läbib hapete, soolade ja leeliste vesilahuseid.

Elektrit juhtivates vedelikes — hapete, leeliste ja soolade vesilahustes — ei kandu elektrilaengud edasi vabade elektronide liikumise kaudu nagu metallides, vaid lahustunud aine elektrilaengu omandanud osakeste (ioonide) liikumisega.

Kõigi hapete, leeliste ja soolade lahustamisel vees sidemed aine molekuli koostisse kuuluvate üksikute aatomite vahel nõrgenevad ja osa molekule jaguneb elektriliselt laetud osadeks — ioonideks [1].

Väävelhape H_2SO_4 on keemiline ühend, mille iga molekul koosneb ühest väävli aatomist (keemiline tähis S), kahest vesiniku aatomist (H_2) ja neljast hapniku aatomist (O_4). Väävelhappe molekulist võib lahustamisel moodustuda kolm iooni, milledest kaks koosnevad kumbki ühest vesiniku aatomist ja kolmas koosneb ühest väävli ning neljast hapniku aatomist. Vesiniku aatom oma normaalsel (elektriliselt neutraalsel) kujul koosneb tuumast ja selle ümber tiirlevast ühest elektronist. Siin aga on väävelhape niiviisi lagunenud, et vesiniku aatomitest koosnevad osad on jäänud täiesti elektronideta, sest need on koondunud kõik teise ossa — nn. happejäägi iooni. Sellega omandavad esimesed ioonid positiivse ja teised — negatiivse elektrilaengu [2]. Positiivset

[1] Lahustumisel tekkivat molekulide lagunemist ioonideks nimetatakse dissotsiatsiooniks.

[2] Esimesel osal on elektronide puudujääk, seega domineerib (on ülekaalus) aatomituumade positiivne laeng; teisel osal on elektronide üleküllus, seega domineerib seal elektronide negatiivne laeng.

vesiniku iooni märgitakse tähisega H^+ ja negatiivset happejäägi iooni tähistatakse $(SO_4)^{--}$. Plussmärk näitab elektroni puudumist ja iga miinusmärk — üleliigse elektroni olemasolu. Keemilise võrrandi abil võib väävelhappe dissotsieerumist lahustamisel kirjutada järgmiselt:

$$H_2SO_4 \rightarrow H^+ + H^+ + (SO)^{--}$$

Elektriliselt neutraalne väävelhappe molekul — positiivsed vesiniku ioonid — negatiivne happejäägi ioon

Samalaadselt lagunevad lahustamisel teisedki happed, leelised ja soolad:

soolhape (kloori ja vesiniku ühend) $HCl \rightarrow H^+ + Cl^-$;
kaaliumileelis (kaaliumseebikivi) $KOH \rightarrow K^+ + (OH)^-$;
keedusool (naatriumi ja kloori ühend) $NaCl \rightarrow Na^+ + Cl^-$.

Elektrivool tekib hapete, leeliste ja soolade vesilahustes laengute edasikandumisega nendes liikuvate ioonide abil. Välise vooluallika pinge mõjub ühendusjuhtmete kaudu vedelikus asetsevatele metallist või söest plaatidele, mida nimetatakse elektroodideks. Sellest tingituna omandab kumbki plaat erinimelise potentsiaali. Lahuses olevad ioonid püüavad liikuda plaatide poole, sest teatavasti valitseb erinimeliselt laetud kehade või aineosakeste vahel mehaaniline tõmbejõud ja ühenimeliselt laetud kehade vahel tõukejõud. Nii liiguvadki p o s i t i i v s e d ioonid n e g a t i i v s e t potentsiaali omavale elektroodile ja n e g a t i i v s e d ioonid p o s i t i i v s e t potentsiaali omavale elektroodile. Positiivset plaati nimetame *anoodiks* ja negatiivset — *katoodiks*. Väävelhappe vesilahuses liiguvad positiivsed vesiniku ioonid katoodile, negatiivselt laetud happejäägi ioonid aga anoodile.

Niisuguse pidevalt kestva protsessiga «kannavad» kummagi laengumärgiga ioonid elektrilaenguid läbi lahuse ühelt elektroodilt teisele. Anood saab lahusest elektrone, katoodilt aga siirdub elektrone lahusesse. Seega ei liigu lahuses tegelikult elektronid, vaid positiivsed ja negatiivsed ioonid.

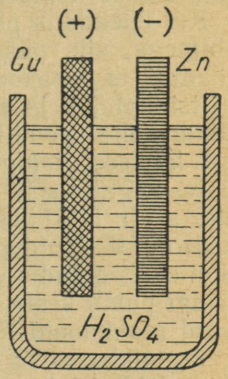
Kirjeldatud nähtus — elektrivoolu kulgemine vedelikus — erineb põhiliselt voolust metalljuhtmes või söes, kus vool esineb ainult negatiivsete elektrilaengu algosakeste, s. o. vabade elektronide kindlasuunalise liikumisena, mille puhul aatomid aines oma asendit ei muuda. Happe, leelise või soola vesilahuses — *elektrolüütides* — on aga voolukandjateks terved aatomid või aatomite grupid, mis omavad elektrilaengut. Voolu kulgemisel elektrolüütides toimub nende ainete keemiline lagunemine — *elektrolüüs*.

§ 2. GALVAANI ELEMENDID

Galvaanilised vooluallikad ehk *galvaani elemendid* on seadmed, milledes keemiline reaktsioon teatavate ainete vahel tekitab

elektromotoorse jõu. Selline keemiline vooluallikas suudab enam või vähem püsivalt anda elektrivoolu seni, kuni temas omavahel reageerivate ainete kogus on ära tarvitatud. Raadiotehnikas kasutatakse võrdlemisi laialdaselt mitmesuguseid keemilisi vooluallikaid raadioseadmete toitmiseks vajaliku alalisvoolu saamiseks.

Keemilised vooluallikad on ehituselt sarnased elektrolüüsi teostamise aparaadiga (joonis 7. 1). Nendes on elektrolüüti paigutatud kaks elektroodi, milledest ühele avaldab elektrolüüt tugevat keemilist mõju. Tekkiva keemilise reaktsiooni tagajärjel omandavad mõjutatav plaat ja elektrolüüt erinevad potentsiaalid.



Joonis 7. 2. Lihtsaima galvaani elemendi (keemilise vooluallika) ehitus.

Lihtsam ja ajalooliselt vanim, kuid praktikas mittekasutatav keemiline vooluallikas *volta element* on oma ehituselt järgmine: nõrgas väävelhappe lahuses asub kaks teineteist mitte puudutavat plaati — üks tsingist ja teine vasest (joonis 7. 2). Osa väävelhappest on vesilahuses dissotsieerunud positiivseteks ja negatiivseteks ioonideks:

$$H_2SO_4 \rightarrow H^+ + H^+ + (SO_4)^{--}.$$

Negatiivsed ioonid $(SO_4)^{--}$ on keemiliselt väga aktiivsed ja astuvad kergesti keemilisse ühendusse tsingiga, tekitades tsinksulfaadi. Positiivsed vesinikuioonid H^+ liiguvad lahuses vaskplaadile ja eralduvad sellel mullikestena. Kaks liigset elektroni, mis kanduvad happejäägi $(SO_4)^{--}$ iga iooniga tsinkelektroodile, jäävadki sellele, pääsedes välisesse vooluringi:

$$(SO_4)^{--} + Zn = ZnSO_4 + 2 \text{ elektroni}$$

happejäägi ioon (2 liigset elektroni) — tsink — tsinksulfaat — (jäävad katoodile)

Reaktsioon happejäägi ioonide ja tsingi vahel kestab ning tsingi elektriline laeng muutub elektronide juurdesaamise tõttu pidevalt negatiivsemaks. Reaktsioon vältab seni, kuni tsinkelektroodi negatiivne laeng muutub juba niivõrd suureks, et tõukejõud kahe samanimelise laengu vahel ei lase enam negatiivseid ioone samuti negatiivselt laetud plaadile ligi. Kuna keemilisel reaktsioonil kandub elektrone lahusest pidevalt tsinkelektroodile, omandab elektrolüüt ja temaga kokkupuutuv teine elektrood — vasest plaat — elektronide puudujäägi tõttu positiivse potentsiaali [1]. Kummalgi plaadil tekkivate potentsiaalide vahe — pinge — on püsiv ja antud tingimustel oleneb ainult reageerivatest ainetest. Tavalistes galvaanilistes vooluallikates on see võrdlemisi väike —

[1] Mõttekäigu lihtsustamiseks jätame vaatlusest kõrvale elektrolüüdi ja positiivse elektroodi vahel samuti esineda võiva potentsiaalide vahe mõju.

olenevalt elektroodide materjalist ja elektrolüüdi koostisest umbes 0,8 kuni 1,9 volti.

Plaatide pindala või elektrolüüdi kogus potentsiaalide vahe suurusele mingit mõju ei avalda. Suurema plaadipinna juures võib reaktsioon kulgeda küll laiemas ulatuses, kuid tekkiv potentsiaalide vahe pole tingitud reaktsiooni ulatusest, vaid keemilisest reaktsioonist osa võtvatest ainetest ja väiksemal määral ka temperatuurist ning lahuse kontsentratsioonist.

Kui ühendada plaadid omavahel mingi elektrijuhiga — metalljuhtmega, siis pääseb selle kaudu elektrone tsinkplaadilt vaskplaadile, et tasakaalustada plaatide potentsiaalide vahet. Niipea kui tsinkplaadi ja elektrolüüdi potentsiaalide vahe pisutki langeb, jätkub kohe keemiline reaktsioon ja elektrone «pumbatakse» jällegi lahusest tsingile. Selle tagajärjel tekib terves vooluringis püsiv negatiivsete elektrilaengute ringvool elektrolüüdist tsingile, sealt läbi ühendusjuhtme vasele ja viimase kaudu jällegi elektrolüüti. Muidugi toimub ka pidev positiivsete laengute liikumine elektrolüüdis vaskelektroodi suunas. Vool peaks suletud vooluringi puhul kestma seni, kuni kogu tsink või elektrolüüt on muutunud reaktsiooni lõpp-produktideks.

Tegelikkuses on olukord pisut keerukam. Senises mõttekäigus ei vaadeldud lahuses tekkivate vesiniku ioonide mõju tervele protsessile. Positiivne vesiniku ioon liigub vaskplaadile, kus ta saab juurde puuduoleva elektroni ja muutub kohe gaasiliseks vesinikuks. Vaskplaadil tekib reaktsiooni vältel üha enam vesinikku; kuigi osa sellest väljub lahusest, «kleepub» seda mullikestena plaadi pinnale ega lase elektrolüüti kokkupuutesse plaadiga. See loomulikult takistab elemendi tööd (vesinik, nagu kõik teisedki gaasid, on normaalsetes tingimustes elektrit mittejuhtiv). See keemilise vooluallika tööd häiriv protsess kannab *polarisatsiooninähtuse* nimetust. Polarisatsiooni kõrvaldamiseks tuleb galvaani elementides kasutada eriseadiseid või lisavahendeid — depolarisaatoreid. Tavaliselt on depolarisaatoriteks mõned keemilised ained, mis seovad positiivse plaadi läheduses vesiniku selle tekkimisel mõneks teiseks ühendiks, näiteks veeks. See väldib positiivse plaadi kattumise vesiniku mullikestega ja tagab seadme häireteta talitluse. Depolarisaatorina kasutatakse isegi õhuhapnikku, mis juhitakse vastava kanali kaudu elementi.

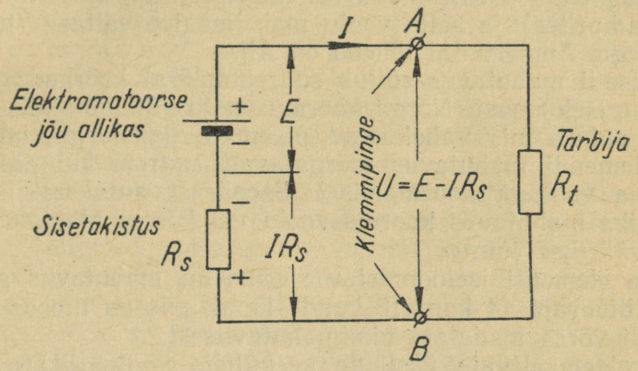
Kirjeldatud primitiivsel tsingist, vasest ja väävelhappe lahusest koostatud elemendil on vaid teoreetiline tähtsus; praktikas seda depolarisatsiooni puudumise tõttu rakendada ei saa.

§ 3. KEEMILISE VOOLUALLIKA ELEKTROMOTOORNE JÕUD, PINGE JA MAHUTAVUS

Keemilise vooluallika kasutamisel on tarvis teada tema elektromotoorset jõudu ja klemmipinget. Elemendi elektromotoorseks

jõuks nimetatakse koormamata elemendi klemmide vahel esinevat potentsiaalide vahet. Elemendi *klemmipingeks* nimetatakse pinget koormatud (tarbijaga ühendatud) elemendi klemmide vahel.

Pole voolujuhti, mis oleks takistusvaba. Nii on ka igal keemilisel vooluallikal nn. *sisetakistus,* mille all tuleb mõista elektrolüüdikihi, elektroodide ja ühendusjuhtmete takistust. Näitlikkuse mõttes jagame elemendi takistusvabaks elektromotoorse jõu allikaks E ja sisetakistuseks R_s, mis on lülitatud järjestikku vooluallika ühendusklemmide A ja B vahele (joonis 7.3). Elemendi



Joonis 7.3. Vooluallika klemmipinge U kujunemine koormamisel vooluga I.

koormamisel peab vool läbima ka sisetakistuse R_s. Ohmi seaduse põhjal tekib sisetakistusel pingelang, mille suurus on IR_s. Vooluallika klemmide A ja B vahel mõjub nüüd pinge U, mis on elemendi elektromotoorsest jõust E sisetakistusel tekkiva pingelangu võrra madalam:

$$\text{klemmipinge } U = E - IR_s.$$

Elemendi klemmipinge sõltub koormusvoolust ja sisetakistusest. Mida tugevam on koormusvool või mida suurem on sisetakistus, seda suurem on pingelang sisetakistusel ja koormustakistusele (tarbijale) mõjub madalam klemmipinge.

Elemendi sisetakistus sõltub elektroodide pinna suurusest ja nende kaugusest. Mida suuremad on elektroodid ja mida väiksem on nende vahekaugus, seda väiksem on elemendi sisetakistus. Ka sõltub sisetakistus elektrolüüdi materjalist ja kontsentratsioonist.

Polariseerumine suurendab sisetakistust. Seega sõltub koormatava elemendi klemmipinge depolarisaatori ühtlasest töötamisest. Tavaliste taskulambi patareidena kasutatavate kuivelementide kestvamal koormamisel klemmipinge langeb aegamööda ning taastub lühemaajalise mittekoormamisega. Kirjeldatud nähtuses

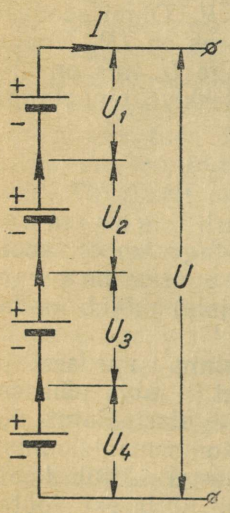
on süüdi depolarisaatori ja positiivsel elektroodil eralduva vesiniku vahel toimuva keemilise reaktsiooni mitteküllaldane intensiivsus.

Keemilise vooluallika *mahutavuseks* nimetatakse temasse keemilise energiana salvestunud energiahulka, mida ta suudab toota oma talitlusea vältel (eeldusel, et koormusvool jääb lubatavatesse piiridesse). *Talitluseaks* loetakse ajavahemikku, mille möödumisel koormatava elemendi klemmipinge langeb teatava normides ette nähtud minimaalse väärtuseni. Mahutavust mõõdetakse ampertundides ning tema arvuline väärtus on võrdne normaalse koormusvoolu (amprites) ja selle voolu maksimaalse vältuse (tundides) korrutisega. Ampertunni lühend on Ah.

Elemendi mahutavus sõltub suurel määral koormusvoolust ja koormuse iseloomust. Nõrga koormusvoolu või lühiajaliste voolutõugete puhul, mis vahelduvad pikemate pausidega, on ühe ja sama elemendi mahutavus märgatavalt suurem kui pideval või tugevama vooluga koormamisel. Seepärast antaksegi keemilise vooluallika mahutavus koormusvoolu või koormustakistuse mingi kindla väärtuse juures.

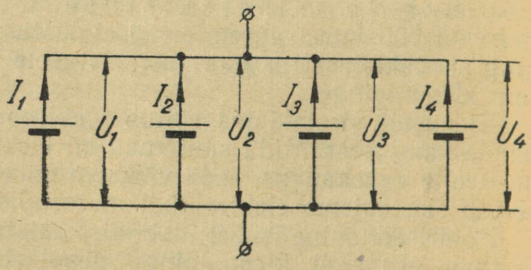
Teine elementi iseloomustav suurus on mahutavus garanteeritud säilivusaja (4 kuni 18 kuud) lõpul, mis on umbes 30 . . . 40 protsendi võrra madalam nimimahutavusest.

Kui olemasolevate üksikute keemiliste vooluallikate talitlusandmed (elektromotoorne jõud, koormatavus ja mahutavus) pole vahetuks kasutamiseks sobivad, siis lülitatakse nende sobitamiseks ühe või teise konkreetse olukorra nõuetega kaks või enam elementi kokku *patareiks*.



Joonis 7. 4. Järjestikku ühendatud vooluallikad.

Keemilisi vooluallikaid võib patareideks liita väga mitmeti. Mitme elemendi *järjestikuseks lülitamiseks* tuleb ühe elemendi negatiivne poolus ühendada teise elemendi positiivse poolusega; selle elemendi negatiivne poolus järgmise positiivsega jne. Esimese elemendi positiivne ja



Joonis 7. 5. Rööbiti ühendatud vooluallikad.

viimase elemendi negatiivne poolus jäävad vabaks (joonis 7.4) ning moodustavad patarei klemmid, mis ühendatakse tarbijaga.

Järjestikuse patarei elektromotoorne jõud võrdub üksikute elementide elektromotoorsete jõudude summaga ja sisetakistus võrdub üksikute elementide sisetakistuste summaga (takistite järjestikune ühendamine!). Üksikud elemendid järjestikku ühendatud patareis peavad olema võrdse mahutavusega. Selle nõude mittetäitmise korral muutuvad väiksema mahutavusega elemendid ekspluatatsiooniprotsessis kiiremini tarvitamiskõlbmatuks ja halvavad kogu patarei edasist tööd. Patarei lubatav koormusvool on võrdne üksiku elemendi maksimaalse lubatud koormusvooluga, sest kogu järjestikku-ühenduses patareist saadav vool läbib iga üksikut elementi. Järjestikuse patarei mahutavus võrdub üksiku elemendi mahutavusega (võrdse tühjendamisvoolu puhul).

Teine lülitusviis on vooluallikate *rööbiti-* ehk *paralleellülitus.* Selleks ühendatakse kõikide elementide positiivsed poolused omavahel ja negatiivsed poolused omavahel (joonis 7.5).

Paralleelsel ühendamisel saadava patarei kogumahutavus on võrdne üksikute elementide mahutavuste summaga. Maksimaalne vool võrdub üksikute paralleellülituses elementide maksimaalsete koormusvoolude summaga, kuid elektromotoorne jõud on võrdne üksiku elemendi elektromotoorse jõuga. Patarei sisetakistus on ühesuguste elementide korral nii mitu korda väiksem ühe elemendi sisetakistusest, kui mitu elementi on paralleelselt lülitatud.

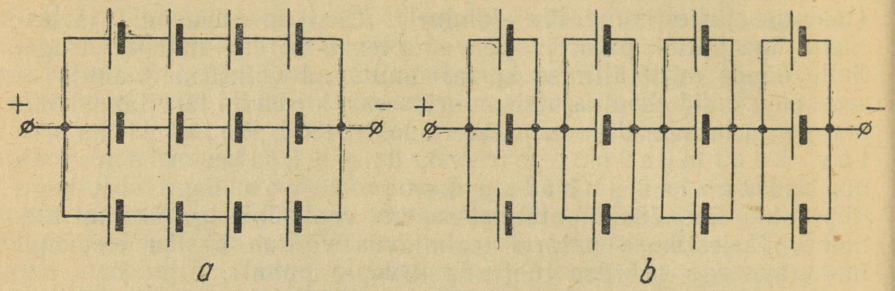
Paralleelselt võib patareiks ühendada ainult ühesuguseid (võrdsete elektromotoorsete jõududega) elemente. Kui see nõue pole täidetud, tekib suurema elektromotoorse jõuga elemendi isetühjenemine läbi väiksema elektromotoorse jõuga elemendi.

Elementide järjestikust ühendamist patareiks kasutatakse siis, kui on nõutav kõrge elektromotoorne jõud suhteliselt nõrga vooluga koormamise juures (raadiotehniliste seadmete toiteks kasutatavad anoodpatareid).

Paralleelsel ühendusviisil elektromotoorne jõud ei suurene, küll aga võidetakse patarei mahutavuse ja maksimaalse koormatavuse osas. Sellist patareid kasutatakse madalapingeliste, kuid suhteliselt suurema vooluga vooluringide toiteks (raadiotehnikas nn. küttepatareid).

Mõnikord on tarvis patareist saada suure koormatavuse juures kõrgemat pinget. Siis tuleb elemendid ühendada *segalülitusse.* Selleks moodustatakse samatüübilistest järjestikku ühendatud elementidest paralleelsed grupid või paralleelsetest elementidest järjestikused read (joonised 7.6-*a* ja *b*). Igas reas peab olema võrdne arv elemente. Patarei elektromotoorne jõud on võrdne

üksiku rea järjestikuste elementide elektromotoorsete jõudude summaga. Mahutavus kui ka koormatavus võrduvad paralleelsete ridade arvu ja üksiku elemendi mahutavuse või koormatavuse korrutisega. Sisetakistus on segalülituses patareil omandanud suuruse, mis avaldub samatüübiliste elementide kasutamisel ühe rea

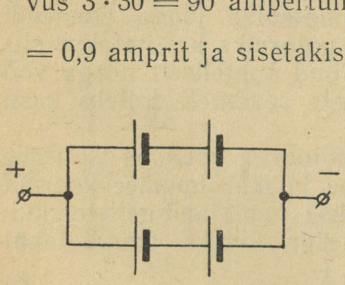


Joonis 7. 6. Segalülituses vooluallikate patareid.

järjestikuste elementide arvu ning ühe elemendi sisetakistuse korrutise ja paralleelsete ridade arvu jagatisega. Vaatamata vooluallikate erinevale ühendusviisile joonisel 7. 6 antud skeemides on kummagi patarei elektrilised iseloomustussuurused — kogupinge ja koormatavus — ühetüübiliste elementide kasutamisel täpselt samad.

Näide. Joonisel 7. 6-*a* toodud lülituses on 12 võrdset elementi, millest igaühe elektromotoorne jõud on 1,5 volti, mahutavus 30 ampertundi, lubatav maksimaalne koormusvool 0,3 amprit ja sisetakistus normaalse vooluga tühjendamisel 0,15 oomi. Leida patarei andmed.

Patarei elektromotoorne jõud on $4 \cdot 1{,}5 = 6$ volti, mahutavus $3 \cdot 30 = 90$ ampertundi, maksimaalne koormatavus $3 \cdot 0{,}3 = 0{,}9$ amprit ja sisetakistus $\frac{4 \cdot 0{,}15}{3} = 0{,}2$ oomi.



Joonis 7. 7. Lülitusskeem arvutusnäitele.

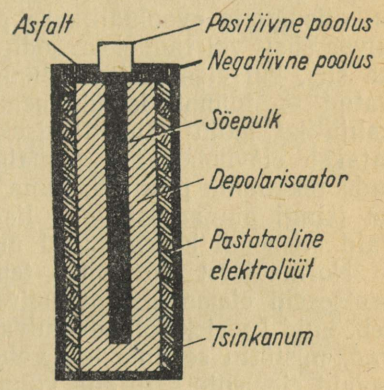
Näide. Joonis 7. 7 kujutab segalülitust neljast eelmises näites esitatud talitlusandmetega elemendist. Leida patarei andmed!

Patarei elektromotoorne jõud on reas olevate elementide arvu ja ühe elemendi elektromotoorse jõu korrutis; seega $2 \cdot 1{,}5 = 3$ volti. Mahutavus on rööbitiste harude arvu ja üksikelemendi mahutavuse korrutis, seega $2 \cdot 30 = 60$ ampertundi; maksimaalne koormatavus on vastavalt $2 \cdot 0{,}3 = 0{,}6$ amprit ja sisetakistus on võrdsete elektriliste andmetega elementide puhul

järjestikuste elementide arvu ja üksikelemendi sisetakistuse korrutise jagatis rööbitiste ridade arvuga, seega $\frac{2 \cdot 0{,}15}{2} = 0{,}15$ oomi.

§ 4. PRAKTIKAS KASUTATAVAID GALVAANI ELEMENTE

Raadiopraktikas kasutatakse laialdaselt nn. kuivelemente. Negatiivse elektroodi materjaliks on kuivelemendis tsink, kusjuures silindriline elektrood moodustab ühtlasi elemendi anuma. Positiivseks elektroodiks on anuma keskel asuv tsingist isoleeritud söepulk, mida ümbritseb depolarisaatorina toimiva pruunkivi (mangaandioksüüdi MnO_2) ja grafiidipulbri segu (joonis 7.8). Grafiidi lisand on vajalik parema elektrijuhtivuse saavutamiseks. Elektrolüüdiks on salmiaagi (ammooniumkloriidi NH_4Cl) vesilahus, mis on vastavate lisandite abil muudetud pastataoliseks, et poleks karta elektrolüüdi väljavoolamist. Kuivelementide väiksemad tüübid on suletud õhukindlalt (tavaliselt asfaldiga) ning seetõttu säilib elemendi täiteaine — pastataoline elektrolüüt — pikemat aega niiskena ja talitluskõlblikuna.



Joonis 7.8. Kuivelemendi ehitus.

Ühendades elemendi elektroodid mõne elektrienergia tarbija kaudu, tekib elemendis keemiline reaktsioon tsingi ja ammooniumkloriidi vahel.

Selles reaktsioonis tõrjub tsink ammooniumkloriidi lahusest välja ammoniaagi NH_3 ja vesiniku H_2. Negatiivne vesiniku ioon liigub positiivsele süsielektroodile, saab sealt puuduva elektroni ja muutub gaasiliseks vesinikuks.

Depolarisaatorina toimiv mangaandioksüüd annab kergesti ära osa oma koostises olevast hapnikust, muutudes mangaanoksüüdiks. See hapnik ühineb süsielektroodi pinnal eralduva vesinikuga veeks.

Mangaanoksüüd on vees mittelahustuv aine, mille «kuhjumine» elementi ei takista selle talitlust. Depolarisatsiooniprotsessis vabanev vesi on aga isegi vajalik elemendi töötamisel auramise tagajärjel kahaneva veetagavara täiendamiseks.

Salmiaagi lahusest väljatõrjutud gaasiline ammoniaak NH_3 koguneb osaliselt söele, peamiselt aga lahustub vees ja moodustab sellega uue ühendi — ammooniumhüdroksüüdi NH_4OH, mis enam keemilistest reaktsioonidest osa ei võta.

Tugeva vooluga koormamise korral on vesiniku eraldumine

anoodil siiski niivõrd intensiivne, et depolarisaator ei suuda tekkivat gaasi küllaldaselt kiiresti siduda. Süsielektrood kattub vesiniku mullikestega ja elemendi elektroodide vaheline pinge langeb polarisatsiooni tõttu. Vooluringi lühivältelisel katkestamisel kaob vesinik elektroodilt ning element võib mõnda aega töötada jällegi normaalselt.

Kuivelemendi elektromotoorne jõud on ligi 1,55 volti, kuid tema sisetakistus on võrdlemisi suur ja kasvab koormamisel veelgi, mistõttu see vooluallikas pole eriti sobiv kestvaks suure koormusega töötamiseks.

Elementides kasutatav tsink peab olema keemiliselt täiesti puhas. Kõrvaliste ainete, näiteks süsiniku või raua lisandid elektroodi pinnal moodustavad ühes tsingiga nagu mikroskoopilisi galvaani elemente, mis pidevalt töötades (negatiivne tsinkelektrood on niisuguses «vooluallikas» pidevas elektrilises ühenduses positiivse süsi- või raudelektroodiga!) hävitavad elektrolüüti ja tsinki ka siis, kui elemendi tegelikud elektroodid pole tarbijaga ühendatud — toimub isetühjenemine. Nende, nn. kohalike voolude kahjuliku mõju vähendamiseks amalgaamitakse tsinki (mõjustatakse elavhõbedaga). Amalgaamimise tõttu on kohalike voolude tekkimine piiratud, kuna elavhõbeda amalgaami kiht katab ka tsingi pinnas leiduvad lisandid. Tsinki satub siis lahusesse vaid elemendi koormamisel mingi tarbijaga.

Normaalsest kõrgemal temperatuuril muutuvad keemilised protsessid elemendis intensiivsemaks, elektromotoorne jõud tõuseb, kuid ka elektrolüüdi kuivamine ja kohalikud voolud suurenevad, mistõttu seadme iga väheneb. Seepärast tuleb mittekasutatavaid elemente säilitada võimalikult jahedas kohas.

Taskulambipatareisid ja raadioseadmete toitepatareisid («küttepatareisid») valmistatakse anumakujulistest kuivelementidest koosseisuga tsink-ammooniumkloriid-mangaandioksüüdsüsi.

Mangaanoksüüd-depolarisaatoriga elementide kõrval toodetakse ka mangaanoksüüd-õhk-depolarisaatoriga keemilisi vooluallikaid (tüüp МВД). Viimastes on depolariseerivaks massiks mangaandioksüüdi ja poorse aktiveeritud söepulbri segu. Välisõhk pääseb eriliste kanalite kaudu depolarisaatorini ja söepulber imab enesesse hapnikku, mis astub samuti reaktsiooni positiivsel elektroodil eralduva vesinikuga.

МВД-tüüpi elemendid on samade välismõõtmete ja kaalu juures märksa suurema koormatavusega ja mahutavusega, kuna depolarisatsiooniprotsess nendes toimub intensiivsemalt.

Nõrku voolé vajavate vooluringide toitmiseks kasutatakse eritüübilisi kuivelemente, nn. *galettelemente*. Väliselt on galettelemendid briketikujulised liistakud, mille ühe pinna moodustab lame tsinkelektrood; sellele on asetatud ülestikku elektrolüüdiga immutatud papist vahekiht ning positiivse elektroodi ja depolarisaatori ülesannet täitev aglomeraatmass (segu pulbrilisest man-

gaandioksüüdist, nõest ning grafiidipulbrist). Vajalik arv galettelemente asetatakse ülestikku ja seotakse väikese survega kokku. Ühe elemendi positiivne poolus, s. o. aglomeraatmass, on kokkupuutes järgmise elemendi tsinkelektroodiga ning moodustab elementide vajaliku järjestikku-ühenduse.

Galettelementide eeliseks senikäsitletud anumakujuliste elementidega võrreldes on parem säilivus, mõnevõrra väiksemad mõõtmed ning kaal samade elektriliste omaduste juures, samuti ka hõlpsam ja odavam tootmine (värvilise metalli kokkuhoid!) ning kõigist loetletud teguritest tingitud madalam hind. Nende halvaks omaduseks on suurem sisetakistus ja väiksem koormatavus.

Toodetavaid galvaani elemente eristatakse seoses ettenähtud talitlusrežiimiga «suvisteks», «külmakindlateks» ja «universaalseteks». Need tüübid erinevad üksteisest ainult elektrolüüdi ja depolarisaatori koostise poolest, mitte aga ehituselt.

«Suvised» elemendid ja patareid võivad töötada temperatuurivahemikus —20 . . . +60° C, kuid minimaalsele lähedastel temperatuuridel nendemahutavus ei ületa 30 . . . 40% nimiväärtusest. Kõik МВД-tüüpi elemendid kuuluvad «suviste» liiki (kuid omavad minimaaltemperatuuri —10° C).

«Külmakindlad» elemendid ja patareid on konstrueeritud töötamiseks temperatuurivahemikus —40 . . . +40° C. Minimaaltemperatuuril on nende mahutavuseks umbes 20% nimiväärtusest.

«Universaalsed» elemendid ja patareid võivad töötada temperatuurivahemikus —40 . . . +60° C.

Siiski tuleb märkida, et kõigi galvaani elementide normaalseks talitlustemperatuuriks — vaatamata tüübile — on vahemik +15 . . . +20° C, mille puhul nende elektrilised omadused on kõige paremad.

Kuna elektronlampe sisaldavate raadioseadiste toiteks vajatakse kahte iseseisvat keemilist vooluallikat — madalapingelist küttepatareid ja kõrgemapingelist anoodpatareid, siis toodetakse meil toitekomplekte mitmete kodumaiste patareivastuvõtjate jaoks. Need koosnevad ühisesse pappkesta asetatud ühest või kahest suure mahutavusega kütteelemendist (kogupingega 1,3 . . . 2,6 V) ja väikese mahutavusega anoodpatareist (kogupingega 50 . . . 90 V). Toitekomplekti ühendamiseks vastuvõtjaga on esimene varustatud kontaktpesaga ja teine — vastavakujulise ühenduskahvliga, mis väldib ebaõige ühendamise võimalused.

§ 5. AKU

Keemiliste vooluallikate hulgas on tähtsal kohal *akumulaatorid* ehk *akud*. Akud on vooluallikad, milledesse on võimalik salvestada elektrienergiat keemilise energiana ja seda vajaduse korral sealt

jällegi elektrienergia näol tagasi saada. Selles suhtes erinevad akud tavalistest galvaani elementidest, mis võivad töötada vaid seni, kuni kogu nendes peituva keemilise energia tagavara on ära tarvitatud.

Akudesse antakse keemiline energia neist läbijuhitava elektrivooluga — laadimisvooluga. Sellega kaasub elektrilis-keemiline protsess — elektrolüüs, mille jäägid — uued keemilised ühendid — salvestuvad akusse. Niiviisi laetud aku elektroodide ühendamisel mingi tarbijaga (aku tühjendamisel) tekib vastupidine keemiline reaktsioon, mis kutsub esile laadimisvoolule vastupidise suunaga elektrivoolu — tühjenemisvoolu — akus ja tarbijas. Tühjenemisvool võib kesta kuni keemilise energia tagavarade täieliku lõppemiseni akus. Siis on taastunud esialgne keemiline olukord ja akut tuleb taas laadida kõrvalisest vooluallikast saadava alalisvoolu abil. Akude eluea pikendamiseks ei tühjendata neid siiski kunagi täielikult, vaid ainult teatava kindlaksmääratud piirini.

Kasutuselolevad akud jagunevad kahte liiki — happe- (plii-) ja leelis- (raudnikkel- või kadmiumnikkel-) akudeks.

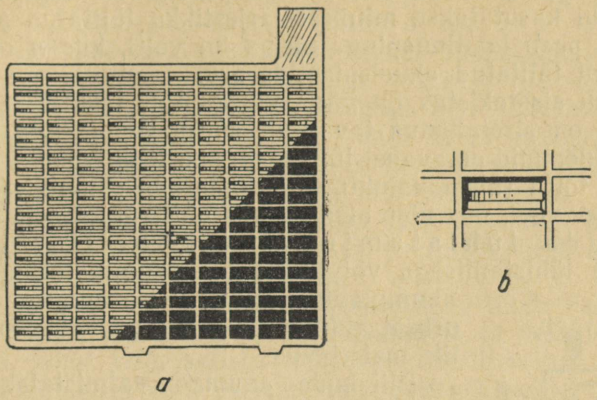
Lihtsaim aku koosneb väävelhappe lahusesse asetatud pliiplaatidest. Väävelhappe mõjul kattuvad need plaadid pliisulfaadi — $PbSO_4$ kihiga. Kui juhtida selle aku elektrolüüdist plaatide kaudu läbi mingist kõrvalisest vooluallikast saadud alalisvoolu, siis toimub väävelhappe elektrolüüs. Positiivse plaadi pinnale moodustub pliidioksüüd PbO_2 ja negatiivne plaat kattub urbse pliiga. Kui eemaldada laadiv vooluallikas, siis võib laetud aku töötada tavalise galvaani elemendina — väävelhape, positiivse plaadi pinnal asuv pliidioksüüd ja negatiivse plaadi plii astuvad plaatide ühendamisel voolutarbijaga omavahel keemilisse reaktsiooni, mille tagajärjel tekib elektromotoorne jõud ja vool. Positiivse plaadi pliidioksüüd ja negatiivse plaadi urbne plii muutuvad tühjenemisel taas pliisulfaadiks ning plaadid kattuvad sellega. Vool kestab seni, kuni kogu pliidioksüüd on muutunud pliisulfaadiks. Tühjenenud akut võib jällegi laadida kõrvalise vooluallika abil, kusjuures kordub sama keemiliste reaktsioonide tsükkel, ilma et oleks tarvis täiendada kemikaalide tagavarasid akus.

§ 6. PLII- EHK HAPPEAKU

Eelmises paragrahvis kirjeldasime protsesse lihtsaimas pliiehk happeakus. Praktikas kasutatavad pliiakud on oma ehituselt täiuslikumad, kuid töötavad täpselt samuti.

Pliiakusse kogutava energia hulk sõltub keemilisest protsessist osavõtvate ainete kogusest plaatide pinnal ja elektrolüüdis. Mida suurem on nende ainete hulk, s. t. mida suurem on plaatide pind, seda pikema aja vältel suudab aku anda tühjendamisel mingi konstantse tugevusega voolu, s. t. seda suurem on tema mahuta-

vus. Seepärast püütakse aku plaadid valmistada võimalikult suure pinnaga. Massiivsete pliiplaatide asemel kasutatakse võre- või restitaolisi õõnsustega pliiplaate. Laetud aku positiivse plaadi õõnsused on täidetud pliidioksüüdiga ja negatiivse plaadi õõnsused urbse pliiga (joonis 7. 9).



Joonis 7. 9. Pliiaku plaadi ehitus.

Laadimisel suureneb väävelhappe hulk elektrolüüdis, sest kummalgi plaadil toimuvas reaktsioonis tekib väävelhapet juurde. Väävelhape on tunduvalt raskem veest: 1 kuupsentimeeter kontsentreeritud väävelhapet kaalub 1,84 grammi. Niisiis saab aku laetuse astet määrata elektrolüüdi erikaalu mõõtmise teel. Laetud aku elektrolüüt peab olema erikaaluga 1,24 grammi kuupsentimeetri kohta (autodel kasutatavatel akudel kuni 1,30 g/cm^3).

Laadimisel tõuseb pliiaku klemmipinge kiiresti 2,2 voldini. Edasisel laadimisel pinge kasvab algul aeglaselt ja lõpupoole jällegi kiiremini kuni 2,7 voldini. Laadimine tuleb siis lõpetada, sest kogu plaatide aktiivmass on muutunud pliidioksüüdiks (ühel plaadil) ja pliiks (teisel plaadil). Laadimisvoolu edasine läbilaskmine akust oleks kasutu, sest sellega tekiks vaid intensiivne vee elektrolüüs — lagunemine vesinikuks ja hapnikuks — mis avaldub elektrolüüdi «keemisena» (gaasimullide energilise eraldumisena) ja elektrolüüdi taseme alanemisena.

Aku tühjendamisel väävelhappe kontsentratsioon väheneb, sest tekkivas reaktsioonis tarvitatakse väävelhapet ja vabaneb vett. Lubatud määrani tühjendatud pliiakus on elektrolüüdi erikaal 1,18.

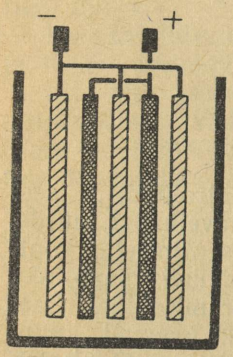
Hästilaetud pliiaku tühjendamisel langeb tema klemmipinge kiiresti 2,1 voldini, millest edasi alaneb jätkuval koormamisel üsna aeglaselt.

Kui pliiaku pinge on langenud 1,8 voldini, tuleb aku viivitamatult laadida. Edasisel tühjendamisel või tarvitamata olekus

seismisel langeb pinge kiiresti ja aku rikneb. Iga ülemäärane tühjendamine vähendab aku mahutavust.

Pliiaku laadimiseks võib kasutada ainult alalisvoolu või pulseerivat alalisvoolu (alaldatud vahelduvvoolu). Täislaetud pliiaku maksimaalset elektromotoorset jõudu (2,7 V) arvestades peab laadimispinge olema umbes 3 volti pliiaku iga üksiku elemendi kohta. Kui kasutatakse mitmest järjestikku lülitatud akust patareid, siis peab laadimispinge olema $3n$ volti, kus n on üksikute järjestikku lülitatud akuelementide arv.

Pliiaku sisetakistus on väga väike. Aku tüübist ja suurusest olenevalt on sisetakistus tavaliselt suurusjärgus alla 0,05 oomi. Kui aku klemmid omavahel lühistada, siis tekib vooluringi väikese takistuse tõttu (ühendusjuhtmete takistus on samuti väga väike!) väga tugev vool, mis võib akule saada ohtlikuks. Seetõttu on aku klemmide lühistamine kategooriliselt keelatud. Iga lühistamisega või ülemäärase koormamisega pudeneb akumulaatori plaatidelt anuma põhja pisut urbset aktiivmassi, millega väheneb aku tegelik mahutavus.



Joonis 7. 10. Paljuplaadilise pliiaku ehitus.

Pliiakude anumad valmistatakse peamiselt klaasist. Samuti kasutatakse selleks eboniiti, kõvakummit, tselluloidi, plastmassi või teisi isoleerivaid aineid, mis on mehaaniliselt piisavalt vastupidavad ega lagune väävelhappe mõjul.

Aku mahutavuse suurendamiseks asetatakse anumasse lähestikku palju plaate, kusjuures negatiivsed ja positiivsed plaadid paigutatakse vaheldumisi. Üksikud samanimelised plaadid ühendatakse omavahel (joonis 7. 10). Äärmisteks plaatideks on pliiakus alati negatiivsed plaadid; seega on negatiivseid plaate akus ühe võrra rohkem kui positiivseid. Plaatide vahele asetatakse nende kokkupuutumise ja kõverdumise vältimiseks isoleerainest pulgakesed või perforeeritud (s. o. aukudega varustatud) plaadid, nn. separaatorid.

Väliselt võib happeaku plaate teineteisest eristada nende värvuse järgi. Laetud pliiaku positiivsed plaadid omavad šokolaadipruuni ja negatiivsed plaadid sinakashalli värvust; tühjendatud aku puhul on nii positiivsed kui ka negatiivsed plaadid valkjashallid. Seega saab plaatide värvuse järgi (kui anum on läbipaistvast materjalist) määrata ka pliiaku laadimisastet.

Pliiaku plaadid ei ulatu anuma põhjani, sest sinna tuleb jätta pisut ruumi pudeneva aktiivmassi jaoks.

Pliiakud nõuavad väga hoolikat käsitsemist. Uue aku kasutuselevõtmisel täidetakse aku väävelhappe lahusega, mille eri-

kaal on 1,21 (28% lahus) ja 3—4 tunni pärast kontrollitakse elektrolüüdi taset, mis peab olema 10 . . . 12 millimeetri võrra kõrgem plaatide ülemisest servast. Alles siis võib aku ühendada laadimisvooluallikaga. Laadimiseks tuleb aku positiivne klemm ühendada laadiva alalisvooluallika positiivse poolusega ja negatiivne klemm negatiivse poolusega.

Akut laetakse seni, kuni ta elementide klemmipinge on tõusnud 2,65 . . . 2,75 voldini. Laadimise lõpul hakkab elektrolüüdist eralduma gaase eriti intensiivselt. Laetud aku elektrolüüdi erikaal peab olema 1,24. Elektrolüüdi erikaalu tuleb perioodiliselt kontrollida. Kui see on vähenenud, tuleb normaalse erikaalu saavutamiseks lisada akusse pisut kangemat väävelhappe lahust. Kui elektrolüüdi erikaal on suurenenud, tuleb lisada destilleeritud vett. Enamasti elektrolüüdi erikaal suureneb, sest akus toimub pidev vee elektrolüüs ja auramine.

Elektrolüüdi valmistamiseks pliiakudele tuleb kasutada keemiliselt puhast väävelhapet, nn. «akuhapet» ja destilleeritud vett. Äärmisel juhul võib selleks kasutada destilleeritud vee puudumisel ka keedetud vett, puhast vihmavett või puhta lume sulatamisel saadud vett. Kaks mahuosa kontsentreeritud väävelhapet ja viis mahuosa vett annavad pliiaku elektrolüüdiks sobiva kontsentratsiooniga lahuse.

Väävelhappe lahustamisel vees vabaneb suur hulk soojust. Seetõttu peab lahuse valmistamiseks kasutatav anum taluma järsku temperatuuri muutust ja kõrgemaid temperatuure. Eriti tuleb silmas pidada, et mingil juhul ei tohi kallata vett happesse, vaid ümberpöördult — hapet tuleb peenikese nirena kallata vette. Kui kallata vett happesse, pritsib see laiali ja võib tekitada põletushaavu.

Väävelhappega ümberkäimine nõuab suurt ettevaatust. Ta on väga tugevate söövitavate omadustega aine. Kui hapet satub kehale või riietusesemetele, tuleb seda kohta otsekohe loputada seebiveega või rohkes voolavas vees.

Väävelhape reageerib peaaegu kõigi metallidega. Seetõttu ei tohi hapet säilitada metallanumas.

Laadimisvoolu ja ka tühjendamisvoolu maksimaalne tugevus on antud aku kasutamise juhendis. Kui on teada ainult pliiaku mahutavus, siis tuleb lugeda laadimis- või tühjendamisvoolu suurimaks lubatavaks väärtuseks 1 amper mahutavuse iga 10 ampertunni kohta. Laadimisvoolu reguleerimiseks kasutatakse järjestikust reguleeritavat eeltakistit — reostaati.

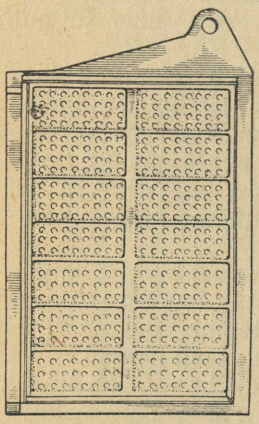
Pliiakut tuleb laadida vähemalt üks kord kuus ka siis, kui teda ei kasutata. Vastasel korral plaadid sulfateeruvad (kattuvad jämekristalse pliisulfaadi kihiga) ja aku mahutavus väheneb. Väiksemate pliiakude elektrolüüti tuleb vahetada vähemalt kord aastas. Aku ühendusklemme tuleb happe mõjul sööbimise vältimiseks aeg-ajalt puhastada ja katta tehnilise vaseliiniga.

Kui tarvitusel olevat pliiakut soovitakse mõneks ajaks seisma jätta, siis tuleb esmalt aku laadida, elektrolüüt eemaldada ja plaadid mitu korda läbi loputada destilleeritud veega.

Pliiaku laadimisel eraldub vesinikku, mis koos õhuhapnikuga moodustab kergesti plahvatava paukgaasi. Seepärast ei tohi laetavatele akudele kunagi läheneda lahtise tulega.

§ 7. LEELISAKUD

Leelisakude anum ja plaatide võrestik on valmistatud raudplekist. Positiivsel plaadil on aktiivmassiks nikkelhüdroksüüd $Ni(OH)_3$ ja negatiivsel plaadil raudhüdroksüüd $Fe(OH)_2$ koos elavhõbeda lisandiga või kadmiumhüdroksüüd $Cd(OH)_2$. Aktiivmass on pressitud plaatide taskukujulistesse õõnsustesse (joonis 7.11), mis on varustatud avadega elektrolüüdi juurdepääsuks. Elektrolüüt on vastavalt talitlustemperatuurile kaaliumvõi naatriumhüdroksüüdi vesilahus (KOH või NaOH), normaalse erikaaluga 1,18 kuni 1,20. Madalatel temperatuuridel töötavates akudes kasutatakse kaaliumhüdroksüüdi. Aku ea pikendamiseks lisatakse elektrolüüdile liitiumhüdroksüüdi (10 kuni 20 g elektrolüüti iga liitri kohta).



Joonis 7.11. Leelisaku plaadi ehitus.

Võrreldes happeakudega on leelisakudel rida paremusi. Nad on mehaaniliselt vastupidavamad, on sama mahutavuse juures pliiakust kergemad ja pole nii tundlikud ülekoormamise suhtes. Leelisaku ei rikne pikemaajalisel tühjalt või laadimatult seismisel. Ka pole leelisaku liigne tühjendamine kahjulik. Leelisaku eluiga on happeaku omast palju suurem. Puudustena mainitagu elemendi madalamat pinget, klemmipinge väiksemat püsivust tühjenemise vältel, madalamat kasutegurit[1] ja mõnevõrra suuremat sisetakistust.

Leelisaku laetuse astet pole võimalik määrata elektrolüüdi erikaalu kaudu, sest see jääb muutmatuks kogu laadimis-tühjenemistsükli vältel. Täislaetud raudnikkelaku klemmipinge on 1,35 kuni 1,4 volti, kadmiumnikkelaku klemmipinge on 1,2 kuni 1,25 volti. Laadimise lõpul tõuseb pinge 1,8 voldini. Normidekohaseks tühjenemispingeks on 1,1 volti.

Leelisakust eraldub töötamisel pidevalt gaase; seetõttu tuleb

[1] Aku kasutegur on arv, mis näitab laadimiseks kulunud elektrihulga ja tühjendamisel saadava elektrihulga suhet. Pliiakudel on kasutegur 0,8...0,9, kadmiumnikkelakudel 0,65...0,7 ja raudnikkelakudel 0,35...0,4 piires.

alati hoida aku korkide õhukanalid puhtad. Aeg-ajalt tuleb kontrollida akus elektrolüüdi erikaalu ja nivood. Elektrolüüt peab ulatuma umbes 10 mm üle plaatide ülemise serva.

Elektrolüüdi valmistamisel tuleb kasutada destilleeritud vett või hädakorral puhast vihmavett. Elektrolüüdiks on lubatud ainult — olenevalt eeskirjadest — kas kaalium- või naatriumhüdroksüüdi vesilahus. Mistahes happe sattumine leelisaku elektrolüüti rikub aku silmapilkselt. Eeskirjade kohaselt on keelatud isegi leelisakude ja happeakude laadimine ühises ruumis.

Leelisaku elektrolüüt rikneb õhus leiduva süsihappegaasi mõjul. Selle ärahoidmiseks tuleb valada igasse leelisaku purki mõni kuupsentimeeter vaseliinõli või petrooleumi, mis jääb elektrolüüdi pinnale ja väldib selle kokkupuutumise õhuga.

Positiivne poolus on leelisakudel peaaegu alati ühendatud metallanumaga.

Isetühjenemise vähendamiseks tuleb akude pealsed ja kontaktkruvid hoida puhtad ning katta happevaba vaseliini õhukese kihiga.

Olulisim

1. Elektrivool läbib hapete, leeliste ja soolade vesilahuseid — elektrolüüte — ning tekitab nendes keemilisi reaktsioone.
2. Mittekoormatud keemilise vooluallika pinge sõltub ainult selles reageerivatest kemikaalidest, mitte nende hulgast.
3. Kuivelemendi elektromotoorne jõud on ligi 1,55 V.
4. Vooluallika klemmipinge U on tema elektromotoorsest jõust E väiksem sisetakistusel tekkiva pingelangu IR_s võrra:

$$U = E - IR_s,$$

kus I on vooluallika koormusvool.

5. Vooluallika mahutavus on temas keemilise energiana peituv elektrihulk, mõõdetud ampertundides (lühend Ah).
6. Järjestikku lülitatud elementide patarei elektromotoorne jõud võrdub üksikute elementide elektromotoorsete jõudude summaga. Paralleellülituses patarei elektromotoorne jõud võrdub üksiku elemendi elektromotoorse jõuga.
7. Pliiaku elektromotoorne jõud on umbes 2 volti. Pliiaku elektrolüüdiks on väävelhappe vesilahus.
8. Raudnikkel- ja kadmiumnikkelaku elektromotoorne jõud on umbes 1,2 ... 1,4 volti. Nendes akutüüpides on elektrolüüdina kasutusel alati (vastavalt eeskirjadele) kaalium- või naatriumleelise vesilahus ühes liitiumhüdroksüüdi lisandiga.
9. Laetud pliiaku elektrolüüdi erikaal on 1,24 g/cm^3. Laadimise lõpul eraldub akus intensiivselt gaase, mis tekivad vee elektrolüüsil.
10. Akust eraldub laadimisel plahvatavaid gaase. Seetõttu ettevaatust lahtise tulega!

11. Väävelhappe lahjendamisel eraldub suur hulk soojust. Lahjendamisel tuleb alati valada väävelhapet vette, mitte vastupidi. .

Ülesanded

27. Leida 1-oomise sisetakistusega kuivelemendi klemmipinge koormamisel 300-milliamprise vooluga. (Vastus: $U = 1{,}2$ V.)

28. Leida viiest järjestikusest kuivelemendist koostatud patarei klemmipinge, kui kõigi elementide sisetakistused on 5 oomi ja koormusvool on 100 mA. (Vastus: $U = 5$ V.)

29. Leida sama patarei klemmipinge 0,01 A tugevuse koormusvoolu puhul. (Vastus: $U = 7{,}25$ V.)

30. Leida sama patarei mahutavus ampertundides, kui iga üksiku elemendi mahutavus on 2,75 Ah. (Vastus: 2,75 Ah.)

31. Leida patarei klemmipinge ja mahutavus, kui samad elemendid (arvult 5) on lülitatud paralleelselt ja koormusvool on 0,1 A. (Vastus: 1,4 V ja 13,75 Ah.)

8. PEATÜKK

ELEKTRIVÄLI

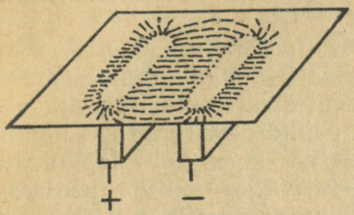
§ 1. ELEKTRIVÄLI

Elektrilaengut ümbritsevas ruumis esineb eriline sundolukord, mida nimetatakse *elektriväljaks*. Elektriväli avaldub mehaaniliste jõudude olemasolus, mis mõjuvad teistele laetud osakestele. Laenguid ümbritsevate elektriväljade koosmõju tõttu tõukuvad samanimelisi laenguid kandvad kehad teineteisest eemale ja erinimeliste laengute kandjad tõmbuvad teineteise poole.

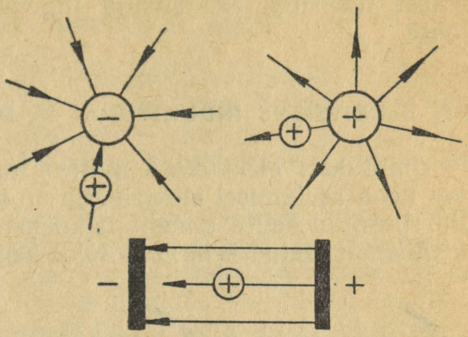
Elektriliselt neutraalse keha ümber pole elektrivälja mõju märgatav, sest tema aatomites tasakaalustub tuumade ümber olev väli elektrone ümbritseva väljaga. Kumbki väli on n. ö. «vastupidise mõjuga» (jõud, millega kumbki väli mõjutab mingit kõrvalist laengut, on küll võrdsed, kuid vastassuunalised, mistõttu nende summa on null).

Elektrivälja ühes või teises punktis esinevate mehaaniliste jõudude suuna ja tugevuse piltlikuks iseloomustamiseks kasutatakse nn. *jõujooni*. Jõujooned on mõeldavad jooned elektriväljas, mida mööda püüab liikuda sellesse välja asetatud laetud keha. Elektriliste jõujoonte suundi võib kindlaks teha, kui elektriseeritud (laengut omavatele) kehadele asetada klaasplaat, millele on ühtlaselt puistatud peent kuiva kristalse kipsi pulbrit. Kipsi osakesed elektriseeruvad elektriväljas ja moodustavad jõujoonte-suunalised ahelikud (joonis 8. 1).

Jõujoonte suunaks (jõudude mõjumise suunaks) elektriväljas loetakse leppeliselt suunda, mida mööda liiguks elektrivälja asetatud positiivse laenguga keha. Seega väljuvad jõujooned positiivselt ning suubuvad negatiivsele kehale (joonis 8. 2).

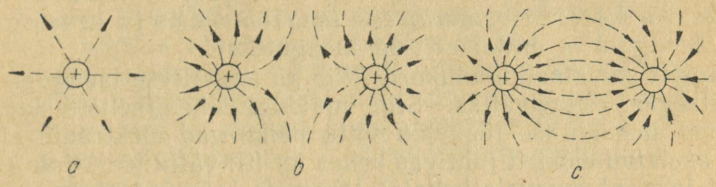


Joonis 8. 1. Elektrivälja jõujoonte nähtavaksmuutmine kristalse kipsi abil.



Joonis 8. 2. Elektrivälja suund mingis ruumi punktis on seal positiivselt laetud kehale avalduva mehaanilise jõu suund.

Üksikut laengut ümbritseva elektrivälja jõujooned väljuvad laengut omavast kehast (või suubuvad sellesse) risti keha pinnaga (joonis 8. 3-*a*). Mitme laengu koosmõjul tekkiv elektriväli



a *b* *c*

Joonis 8. 3. Üksiku laengu (*a*), kahe samanimelise laengu (*b*) ja kahe erinimelise laengu (*c*) elektriväli.

on hoopis teise kujuga. Kahelt lähestikku asetatud samanimelise laenguga kehalt väljuvad jõujooned püüavad teineteist «tõugata» ja muutuda omavahel paralleelseteks (joonis 8. 3-*b*). Erinimeliste laengute koosmõjul tekkiva elektrivälja jõujooned aga liituvad ühisteks joonteks, mis lähtuvad positiivse laenguga kehalt ja suubuvad negatiivse laenguga kehale (joonis 8. 3-*c*).

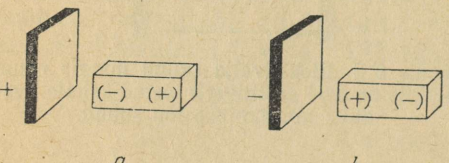
Elektrivälja tugevust võib mõõta tema poolt mingile laengule avaldatava mehaanilise jõu suuruse kaudu. *Väljatugevust* mingis elektrivälja punktis iseloomustab jõujoonte tihedus sellel kohal. Käesoleva paragrahvi ulatuses toodud joonistelt näeme, et väljatugevus on suurim lae-

tud kehade pinna lähedal, kus jõujooned paiknevad tihedamalt. Laetud kehast kaugenemisega väljatugevus nõrgeneb.

Väljatugevus näitab potentsiaali muutumist selles elektriväljas liikumisel jõujoonte suunas ühe pikkusühiku ulatuses. Just sellest tulenebki elektrivälja tugevuse ühik: voltide arv meetri kohta.

§ 2. ELEKTRILINE INDUKTSIOON JA DIELEKTRIKU POLARISATSIOON

Ümbrusest elektrilises mõttes täiesti isoleeritud elektrit juhtiva keha asetamisel elektrivälja on kehas leiduvad vabad elektronid sunnitud selles ümber paiknema. Kui elektrivälja tekitaja on positiivselt laetud keha, siis teise keha vabad elektronid kui negatiivsed laengud tõmbuvad elektrivälja tekitaja poolsesse otsa (joonis 8.4-*a*), kus elektronide külluse tõttu tekib välist mõju avaldav negatiivne laeng. Keha teises otsas tekib elektronide vähesuse tõttu muidugi positiivne laeng. Kirjeldatud nähtust, kus kõrvaline elektriväli tekitab neutraalses kehas elektrilaengud, nimetatakse *elektriliseks* või ka *elektrostaatiliseks induktsiooniks* ja kehasse tekitatud laenguid — indutseeritud laenguteks.



Joonis 8.4. Elektrostaatilise induktsiooni nähe positiivse (*a*) või negatiivse (*b*) keha elektriväljas.

Täpselt samalaadne olukord tekib ka negatiivse laenguga keha ümbritsevas elektriväljas. Siin muidugi ühenimeliste laengute vahelise mehaanilise tõukejõu tõttu paiknevad elektronid elektrivälja asetatud elektrit juhtivas kehas teisiti: välja tekitajale (negatiivset laengut omavale kehale) lähemale jääb indutseeritud positiivne laeng — elektronide puudujääk ja sellest kaugemale jääb negatiivne laeng — elektronide küllus (joonis 8.4-*b*).

Elektrivälja paigutatud elektrit mittejuhtivas kehas ei saa tekkida elektronide ulatuslikku ümberpaiknemist ja seetõttu ka elektrilist induktsiooni, sest dielektrikutes pole küllaldaselt vabu elektrone. Sellegipoolest tekib ka dielektrikutes elektrivälja mõjul induktsioonitaoline nähtus, *dielektriku polarisatsioon;* kuid oma ulatuselt piirdub see elektrilaengute ümberasetumine iga üksiku molekuliga. Sõltuvalt kehale mõjuva elektrivälja suunast surutakse tema molekulides elektronid oma õigetelt liikumisteedelt ühele poole kõrvale. Dielektriku molekulide ühele küljele koondub niiviisi negatiivne ja teisele küljele positiivne laeng. Kõrvutiasuvate molekulide polariseerumisel tekkinud laengute mõjud neutraliseeruvad (tasakaalustuvad), kuid keha otstel avaldavad polarisatsiooni laengud ühist elektrilist välismõju.

Dielektriku molekulide polariseerimisega salvestub nendesse teatav hulk energiat, mis vabaneb polarisatsiooni kadumisel näiteks soojusena või elektrienergiana.

§ 3. ELEKTRILINE MAHTUVUS; FARAD

Elektrijuhid ja mittejuhid elektriseeruvad erinevalt. Dielektrilise keha elektriseerimisel ei kandu laeng terves kehas laiali ühtlaselt, sest laengut kandvate osakeste — elektronide — liikumine pole nendes ainetes võimalik. Mittejuhi pinnale viidud laeng jääb niisiis sellele kohale püsima.

Elektrit juhtiva keha elektriseerimisel kandub kogu laeng laiali üle kogu keha pinna. Elektrijuhi negatiivsel laadimisel kantakse sellele mingi hulk elektrone, mis omavaheliste tõukejõudude tagajärjel asetuvad otsekohe tervele pinnale. Positiivsel laadimisel kehast kõrvaldatava elektronide hulga tõttu tekkiv elektronide puudujääk jaotub samuti üle terve keha pinna.

Laetud elektrijuht omandab, võrreldes neutraalse olekuga, teatava potentsiaali. Mingi kindla elektrihulga Q viimisel teatud kehale muutub selle potentsiaal U võrra. Sama elektrihulga Q viimine mõnele teisele kehale ei tarvitse muuta selle keha potentsiaali just U võrra, vaid sellest hoopis erineva suuruse võrra. Teisiti sõnastatuna võiksime sama mõtet väljendada niiviisi: erinevate kehade laadimisel on teatud potentsiaali tekitamiseks tarvilikud erinevad elektrihulgad. Selle nähtuse põhjuseks on elektrijuhtide erinevast suurusest tingitud erinev elektriline *mahtuvus*.

Elektrijuhi mahtuvus sõltub muude tegurite kõrval tema mõõtmetest; mida suurem on keha, seda suurem on tema elektrimahtuvus. Elektrijuhti salvestuva laengu suuruse Q, selle tulemusena tekkiva potentsiaali muutuse U ja elektrijuhi mahtuvuse C vahel on kindel seos:

$$Q = CU.$$

Valemis avaldub Q kulonites, kui U on väljendatud voltides ja C erilistes mahtuvuse mõõtmise ühikutes — faradites (lühend F, venekeelses kirjanduses ϕ). Üks farad on niisuguse elektrijuhi mahtuvus, millesse ühe kuloni suuruse laengu viimine muudab selle potentsiaali ühe voldi võrra. Esitatud valemi matemaatilised teisendid on:

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

Mahtuvuse mõõtühik farad on võrdne ampersekundiga voldi kohta, sest kulon on teatavasti ampersekund (üheamprise voolu juures läbib juhtme ristlõiget üks kulon elektrit sekundis). Nii on ka ühe faradi suuruse mahtuvusega keha potentsiaali muutmiseks

kiirusega ühe voldi võrra sekundis tarvilik üheamprine laadimisvool.

Analoogilisi olukordi otsides tuleb täheldada seda, et elektrilist mahtuvust ei saa samastada vedeliku puhul mingi anuma mahuga — ruumalaga. Anuma mahtuvus näitab, milline maksimaalne hulk vedelikku mahub sellesse (vedelikud pole teatavasti nimetamisväärselt kokkusurutavad). Elektriline mahtuvus seevastu mingit kehale maksimaalselt mahutatavat elektrihulka kindlaks ei määra. Kindla elektrimahtuvusega kehasse võib salvestada ükskõik millise elektrihulga; selle suurenemisega tõuseb vaid keha potentsiaal. Potentsiaal kasvab keha laengu suurendamisel muidugi seda kiiremini, mida väiksem on keha elektriline mahtuvus, ning vastupidi.

Elektriline mahtuvus on võrreldav gaasianuma ruumalaga. Üheliitrise ruumalaga anumasse mahub üheatmosfäärilise rõhu juures teatud kaaluline hulk gaasi. Kaheatmosfäärise rõhu all mahub samasse anumasse kahekordne kaaluline hulk, kolmeatmosfäärise rõhu puhul kolmekordne hulk jne. Siinses näites on anumasse mahutatud gaasihulga rõhk samaväärne elektrijuhti salvestatud elektrihulga potentsiaaliga, gaasihulk samaväärne elektrihulgaga ja anuma maht elektrilise mahtuvusega.

Mahtuvuse ühik farad on väga suur. Praktikas kasutatakse seepärast miljon korda väiksemat ühikut — mikrofaradit (lühend μF; vene keeles *мкф*), miljard korda väiksemat ühikut — nanofaradit (nF), tuhat miljardit korda väiksemat ühikut — pikofaradit ehk mikromikrofaradit (pF, μμF; vene keeles vastavalt *пф*; *мкмкф*).

1 F = 1 000 000 μF = 1 000 000 000 nF =
= 1 000 000 000 000 pF (μμF);
1 μF = 1000 nF = 1 000 000 pF (μμF) = 0,000 001 F;
1 nF = 1000 pF = 0,001 μF = 0,000 000 001 F;
1 pF (μμF) = 0,001 nF = 0,000 001 μF = 0,000 000 000 001 F.

Praktikas peaaegu mittekasutatav elektrilise mahtuvuse füüsikaline ühik on sentimeeter (cm).

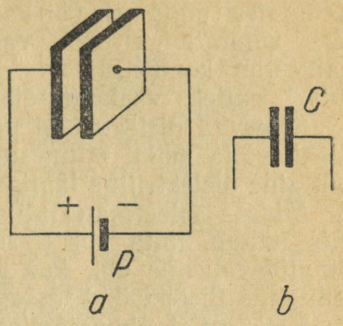
1 cm = 1,1 pF ja 1 pF = 0,9 cm.

Metallkuul, mille raadius on 1 cm, omab elektrilist mahtuvust, mille suurus on 1 cm (= 1,1 pF).

§ 4. KONDENSAATOR

Kondensaator on raadio- ja elektrotehnikas kasutatav seadis, mis on võimeline mahutama endasse elektrilaenguid. Kondensaator koosneb kahest lähestikku asetatud ja omavahel isoleeritud ühe või teise kujuga metallplaadist või plaatide grupist. Liht-

saima kondensaatori moodustab kaks tasapinnalist paralleelset plaati, millede vahel on dielektrikuks õhk (joonis 8. 5). Kui ühele plaadile anda positiivne ja teisele plaadile negatiivne laeng, siis püüab ühe plaadi laeng tekitada teisel plaadil elektrilise induktsiooni tõttu vastasnimelist laengut ja samuti ka vastupidi: teise plaadi laeng indutseerib esimesele plaadile vastasnimelise laengu. Kummagi plaadi laengute koosmõju tõttu mahub plaatidele nende mingi potentsiaalide vaheni laadimisel palju suurem elektrihulk, võrreldes juhuga, kui plaadid asuksid teineteisest kaugel. Kondensaatori tingmärk on esitatud joonisel 8. 5-*b*.



Joonis 8. 5. Tasapinnalistest metallplaatidest moodustatud kondensaator (*a*) ja kondensaatori skeemitähis (*b*).

Elektrilaengu suurus kulonites, mis plaatide vahel mõjuva ühe voldi suuruse pinge juures salvestub kondensaatorisse, väljendab kondensaatori mahtuvust. Kui kondensaatorisse salvestub üks kulon elektrit, siis on tema mahtuvus üks farad; mahtuvus (faradites) on võrdeline laenguga (kulonites) ja pöördvõrdeline pingega (voltides):

$$C = \frac{Q}{U} \quad \text{ehk 1 farad} = \frac{1 \text{ kulon}}{1 \text{ volt}} .$$

Täpselt samal viisil avaldub teatavasti ka üksiku elektrit juhtiva keha mahtuvus, ainult tähis U märgib siis laadimisel tekkivat keha potentsiaali muutust.

Iga kondensaatori mahtuvus sõltub tema mõõtmetest — plaatide pindalast ning nende vahekaugusest — ja plaate teineteisest isoleeriva dielektriku omadustest. Mida suurem on plaatide pind või mida väiksem on nende vahekaugus, seda suuremat hulka elektrone on kondensaatorisse võimalik mahutada kindla pinge juures ja seda suurem on seega kondensaatori mahtuvus. Plaatide vahekauguse vähendamisega suureneb kondensaatori mahtuvus, sest plaatidel asuvate laengute omavaheline mõju (elektrostaatiline induktsioon) suureneb kauguse vähenemisega. Kui tähistada plaatkondensaatori ühe plaadi ühe poole pindala tähega S, plaatide vahekaugus d ja plaatide vahelise dielektriku omadustest (polarisatsiooninähtuse intensiivsusest elektriväljas) sõltuv tegur kreeka tähega ε (epsilon), siis selle kondensaatori mahtuvus C avaldub lihtsa valemi kaudu:

$$C = 0{,}9 \cdot \frac{\varepsilon S}{4\pi d} .$$

Siin saame C pikofaradites, kui S on mõõdetud ruutsentimeetrites ja d sentimeetrites. Konstantne tegur $\pi = 3{,}14$.

Kondensaatori dielektrik polariseerub plaatide vahelises elektriväljas seda enam, mida suurem on väljatugevus. Polariseerimiseks kulub teatud hulk energiat, mis võetakse kondensaatori laadimisel plaatidega ühendatud vooluallikast elektrienergiana. Kondensaatori plaatide vahelise elektrivälja nõrgenemisel või kadumisel nõrgeneb või kaob ka dielektriku polarisatsioon ja selleks kulutatud energia vabaneb taas elektrienergiana. Energia salvestub kondensaatoris ka dielektriku polarisatsiooni puudumisel, näiteks vaakuum-dielektriku puhul.

Erinevad dielektrikud polariseeruvad ühe ja sama tugevusega elektrivälja mõjul mitmesuguse määrani. Seda määra iseloomustab aine dielektriline läbitavus ehk *suhteline dielektrikukonstant* ε.

Mingi isoleermaterjali suhteline dielektrikukonstant on arv, mis näitab, mitu korda suureneb kondensaatori mahtuvus, kui plaatidevaheline õhk kui dielektrik asendada selle ainega. Õhu suhteline dielektrikukonstant loetakse võrdseks ühega.

Välistest tingimustest sõltuvalt võib ühe või teise aine dielektrikukonstant teatavates piirides muutuda. Näiteks kutsub temperatuuri muutus enamasti esile dielektrikukonstandi ja seega kogu kondensaatori mahtuvuse väikese muutuse.

Seda muutust iseloomustab *dielektriku temperatuuritegur,* mis näitab, kui mitu korda muutub aine dielektrikukonstant temperatuuri tõusmisel 1° C võrra.

Tabelis 4 on toodud mõningate tähtsamate ainete suhtelised dielektrikukonstandid ja dielektriku temperatuuritegurid.

Tabel 4

Ainete dielektrikukonstante

Isoleeraine	Suhteline dielektrikukonstant ε	Dielektriku temperatuuritegur
Klaas	4 ... 6	
Kvartsklaas	4,5	$50 \cdot 10^{-6}$
Magneesiumtitanaat	12 ... 18	
Paber (immutatud õliga)	3,5	
Polüstürool	2,3 ... 2,6	$-35 \cdot 10^{-6}$
Portselan	6,3 ... 6,5	$180 \cdot 10^{-6}$
Rutiil	90 ... 170	
Steatiit	6,1	
Tibar	1200	$+10 \cdot 10^{-6}$
Tikond	25 ... 150	$(-150 \ldots -1500) \cdot 10^{-6}$
Vilgukivi	6,5 ... 8,0	$(20 \ldots 100) \cdot 10^{-6}$
Õhk	1,0	

Suure mahtuvusega kondensaatori saamiseks tuleb suure plaatide pinna juures kasutada võimalikult õhukest dielektrikukihti. Sageli kasutatakse kondensaatorite dielektrikuks parafineе-

ritud paberit paksusega 0,02 kuni 0,05 mm («paberkondensaatorid») või suurt dielektrikukonstanti omavaid keraamilisi aineid («keraamilised kondensaatorid»).

Kondensaatorit iseloomustavateks andmeteks on mahtuvuse kõrval täpsus- ehk veaprotsent ja maksimaalne talitluspinge. *Täpsusprotsent* on arv, mis näitab, mitme protsendi ulatuses võib normaalsetes tingimustes antud kondensaatori mahtuvus erineda nimiväärtusest. *Maksimaalse talitluspinge* suuruse määrab plaatidevahelise dielektriku vastupanuvõime elektrilisele läbilöögile. Kui dielektrikukihile mõjub mingist kindlast väärtusest tugevam elektriväli (plaatidevaheline pinge on teatud väärtusest kõrgem), siis polarisatsioon dielektrikus ületab aatomisisesed jõud, tekivad vabad elektronid ja dielektrik muutub elektrijuhiks. Niiviisi tekibki mingi kriitilise väljatugevuse ületamisel dielektriku läbilöök, mis muudab kondensaatori edasiseks tarvitamiseks kõlbmatuks. *Läbilöögipinge* on muidugi seda kõrgem, mida paksem on plaate eraldava dielektriku kiht. Maksimaalse talitluspingena U_{tal} (vene k. $U_{раб}$) märgitakse kondensaatoritele enamasti üks neljandik kuni kuuendik pingest, mis kutsuks dielektrikus esile läbilööki tekitava väljatugevuse. Sagedamini kasutatavate dielektrikute maksimaalsed väljatugevused, mõõdetuna kilovoltides dielektriku paksuse millimeetri koha, on esitatud tabelis 5.

Tabel 5

Maksimaalsed talitluspinged dielektrikutes

Dielektrik	Maksimaalne väljatugevus kestval koormamisel kV/mm
Õhk	2,8
Paber (immutatud õliga)	10...25
Kvarts	20
Klaas	10...40
Portselan	10
Parafiin	15...30
Vilgukivi	80...150

Valmistavas tehases kontrollitakse kondensaatorite vastupidavust nende lühiajalise koormamise teel talitluspingest kolm korda kõrgema nn. *proovipingega* (tähis: U_{proov}, vene k. $U_{исп}$). Sageli märgitakse kondensaatoritele talitluspinge ja proovipinge kaksikarvuna, näiteks

500/1500 V=

või

350/1000 V~

Märk «=» tähistab alalis- ja märk «~» vahelduvpinget. Kui kondensaatori talitluspinge on antud alalispingena, siis pole seda

kondensaatorit otstarbekas kasutada liiga kõrge vahelduvpinge puhul; igal juhul ei tohi see küündida üle 60...70% lubatud alalis-talitluspingest, sest ebakohase dielektriku materjali tõttu võib niisuguses kondensaatoris kergemini tekkida läbilöök.

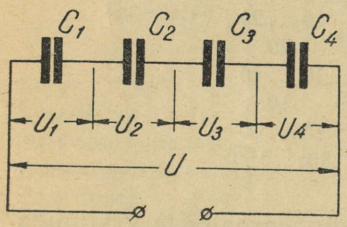
Kui mõnele kondensaatorile on märgitud näiteks andmed:

10 000 pF ± 10%
250/750 =
—40° ... +60° C

siis selle kondensaatori mahtuvus on umbes 10 000 pikofaradit, kuid valmistamisel on silmas peetud, et erinevus nimiväärtusest poleks suurem kui 10%. Nii võib selle kondensaatori mahtuvuse suurus asuda piires 9 000... 11 100 pF. Maksimaalne talitluspinge on 250-voldine ja proovipinge 750-voldine alalispinge. Mõnikord märgitakse kondensaatoritele talitlustemperatuuri lubatavad piirid. Antud juhul võib vaadeldava kondensaatori talitlustemperatuur kõikuda —40° C ja +60° C vahemikus ilma dielektrikut ohustamata.

§ 5. KONDENSAATORITE ÜHENDAMINE

Elektrilistes ja raadiotehnilistes seadmetes kasutatakse mõnikord sobiva suurusega mahtuvuse või talitluspinge saamiseks mitme kondensaatori ühendamist komplektiks (kondensaatorpatareiks). Üks ühendamisviis — järjestikku-lülitus — võimaldab kondensaatorpatarei talitluspinge valida suurema üksiku kondensaatori talitluspingest.



Joonis 8. 6. Järjestikku-lülituses kondensaatorite patarei.

Järjestikku lülitatud kondensaatorite (joonis 8. 6) kogumahtuvus C_j avaldub üksikute kondensaatorite mahtuvuste C_1, C_2, C_3 jne. kaudu valemiga:

$$C_j = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots},$$

kui kõik mahtuvused on esitatud samades mõõtühikutes (kõik kas pikofaradites või mikrofaradites; kuid mitte nii, et näiteks osa mahtuvusi on mõõdetud mikrofaradites ja osa pikofaradites). Järjestikku lülitatud kondensaatorpatarei kogumahtuvus on alati väiksem vähima kondensaatori mahtuvusest, sest kõikide kondensaatorite dielektrikukihid on nagu «ühendatud» järjestikku ja

nende kogupaksus on seega suurenenud. Paksemale dielektrikukihile vastab aga väiksem mahtuvus.

Kui on järjestikku lülitatud ainult kaks kondensaatorit, mahtuvustega vastavalt C_1 ja C_2, siis nende kogumahtuvus väljendub lihtsama valemi abil:

$$C_j = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$$

Rõhutada tuleb siinkohal vaid seda, et viimane valem on esitatud kujul kasutatav ainult k a h e ja mitte enama järjestikuse kondensaatori kogumahtuvuse määramiseks. Näiteks kolme järjestikuse kondensaatori üldmahtuvus avaldub valemiga:

$$C_j = \frac{C_1 C_2 C_3}{C_1 C_2 + C_2 C_3 + C_1 C_3}.$$

Kui järjestikku lülitatakse mitu ühesuuruse mahtuvusega kondensaatorit, siis nende kogumahtuvus

$$C_j = \frac{C}{n},$$

kus C on üksiku kondensaatori mahtuvus ja n — järjestikku lülitatud kondensaatorite arv.

Igasse järjestikusesse kondensaatorisse salvestub, vaatamata selle mahtuvusele, üks ja seesama elektrihulk Q, kuid üksiku kondensaatori plaatidel mõjuv pinge sõltub tuntud valemi

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

põhjal üksikmahtuvusest ja salvestuvast elektrihulgast. Järjestikuste kondensaatorite patarei maksimaalne talitluspinge on suurem üksiku kondensaatori talitluspingest, kuid ei tarvitse olla võrdne üksikute kondensaatorite maksimaalsete talitluspingete summaga, vaid on enamasti sellest väiksem.

Esitatud väite põhjendus pole keeruline. Üksikutele järjestikku-lülituses kondensaatoritele jäävad eeltoodud valemi põhjal erinevad osapinged. Mõnele kondensaatorile rakenduv pinge võib ületada sellele lubatud maksimaalse talitluspinge ja niiviisi kutsuda esile dielektriku läbilöögi, kuigi pinged teistel kondensaatoritel on võib-olla tunduvalt väiksemad nende maksimaalsetest talitluspingetest. Olgu märgitud, et mida v ä i k s e m on järjestikuste kondensaatorite komplektis üksiku kondensaatori mahtuvus, seda s u u r e m osa patareile mõjuvast kogupingest jääb temale, ja vastupidi. Üksikutele kondensaatoritele rakenduvate pingete U_1, U_2, U_3 jne. summa on muidugi võrdne patareile mõjuva kogupingega U:

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

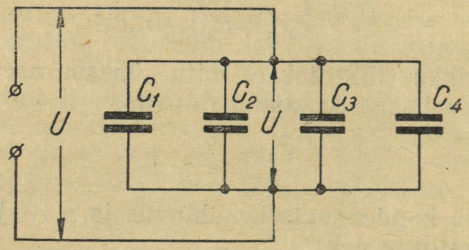
Järjestikusteľe kondensaatoritele langevate osapingete jaotu-

misele avaldab suurt mõju ka üksikute kondensaatorite sisetakistus (s. o. dielektrikukihi takistus). Paremakvaliteedilise dielektrikuga kondensaator on läbilöögi poolt rohkem ohustatud kui halvema kvaliteediga kondensaator.

Paralleelselt lülitatud kondensaatorite (joonis 8. 7) komplekti kogumahtuvus C_p avaldub üksikute kondensaatorite mahtuvuste C_1, C_2, C_3 jne. summana:

$$C_p = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots$$

Loomulikult peavad siingi olema kõik mõõtühikud valitud ühtlased.



Joonis 8. 7. Paralleellülituses kondensaatorite patarei.

Paralleelsete kondensaatorite patarei maksimaalse talitluspinge määrab vähima talitluspingega kondensaator, sest vooluallika pinge mõjub paralleelselt ja seega võrdselt kõikidele kondensaatoritele. Igasse kondensaatorisse salvestub paralleellülituse puhul tema mahtuvusest C ja vooluallika pingest U sõltuv elektrihulk

$$Q = CU.$$

Suurema mahtuvusega kondensaatorisse salvestub suurem, väiksemasse väiksem elektrihulk.

Mõnikord kasutatakse segalülituses kondensaatorpatareid, kus osa kondensaatoreid on ühendatud järjestikku, osa aga paralleelselt.

Segalülituses kondensaatorite kogumahtuvuse määramine on põhimõtteliselt täiesti analoogiline segalülituses takistite üldtakistuse leidmisega, ainult selle vahega, et vastavad valemid on vastupidised.

Järjestikuste kondensaatorite grupi kogumahtuvus avaldub paralleelsete takistite kogutakistuse leidmise valemiga sarnaneva valemi abil; paralleelselt lülitatud kondensaatorite grupi üldmahtuvust aga väljendab järjestikuste takistite kogutakistuse leidmise valemi taoline valem.

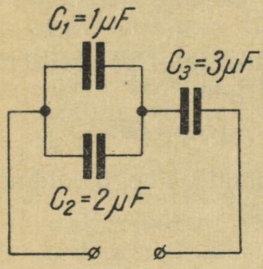
Näide. Leida joonisel 8.8 toodud segalülituses kondensaatorite kogumahtuvus C, kui $C_1 = 1\ \mu F$; $C_2 = 2\ \mu F$ ja $C_3 = 3\ \mu F$.

Esmalt leiame paralleelsete kondensaatorite C_1 ja C_2 kogumahtuvuse. See avaldub summana:

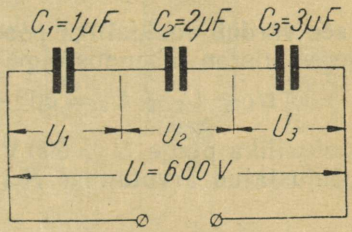
$$C_p = C_1 + C_2 = 1 + 2 = 3\ \mu F.$$

Teise sammuna võime avaldada patarei kogumahtuvuse C kahe järjestikuse kondensaatori kogumahtuvusena (üks nendest kondensaatoritest on C_3 ja teine on kondensaatorite C_1 ja C_2 äsja leitud kogumahtuvus $C_p = C_1 + C_2$):

$$C = \frac{3 \cdot 3}{3 + 3} = 1{,}5\ \mu F.$$



Joonis 8.8. Näite juurde kondensaatorite patarei mahtuvuse määramisest.



Joonis 8.9. Näite juurde järjestikku lülitatud kondensaatoritest.

Näide. Leida osapinged U_1, U_2, U_3 kolmel järjestikusel kondensaatoril $C_1 = 1\ \mu F$, $C_2 = 2\ \mu F$ ja $C_3 = 3\ \mu F$ nende ühendamisel 600-voldise alalispingeallikaga (joonis 8.9).

Nende kondensaatorite kogumahtuvus

$$C_j = \frac{1 \cdot 2 \cdot 3}{1 \cdot 2 + 2 \cdot 3 + 1 \cdot 3} = 0{,}545\ \mu F.$$

600-voldise pinge juures kantakse esimese kondensaatori negatiivsele plaadile elektrihulk

$$Q = CU = 0{,}000000545 \cdot 600 = 0{,}00033 \text{ kulonit.}$$

Täpselt sama elektrihulk kandub selle kondensaatori teiselt plaadilt teise kondensaatori esimesele plaadile ja selle teiselt plaadilt kolmanda kondensaatori esimesele plaadile. Kolmanda kondensaatori teiselt plaadilt kandub see elektrihulk vooluallika positiivsele poolusele. Niiviisi laetakse kõik järjestikused kondensaatorid võrdsete elektrilaengutega, kuid üksikutele kondensaatoritele rakenduvad osapinged sõltuvad kondensaatori mahtuvusest. Igal kondensaatoril tekivad sisselülitamise hetkel järgmised pinged:

$$U_1 = \frac{Q}{C_1} = \frac{0{,}00033}{0{,}000001} = 330 \text{ V};$$

$$U_2 = \frac{Q}{C_2} = \frac{0{,}00033}{0{,}000002} = 165 \text{ V};$$

$$U_3 = \frac{Q}{C_3} = \frac{0{,}00033}{0{,}000003} = 110 \text{ V}.$$

Hiljem need osapinged muutuvad, sest pinge jagunemisel järjestikustele kondensaatoritele saab määravaks nende isolatsioonitakistust läbiv nn. lekkimisvool. Vahelduvvooluringis kehtib selline pingete jagunemine.

Kontrollimiseks võime arvutada osapingete summa

$$U_1 + U_2 + U_3.$$

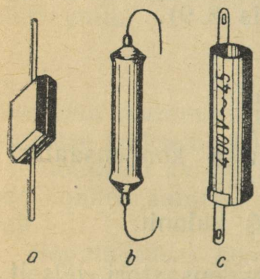
Kui see võrdub vooluallika poolt kondensaatoripatareile mõjuva pingega, siis on lahendus õige. Antud juhul

$$U_1 + U_2 + U_3 = 300 + 165 + 110 = 605 \text{ V}$$

ja vooluallika pinge $U = 600$ V. Tekkinud väike, 5-voldine vahe on põhjustatud arvutamise ebatäpsusest.

§ 6. KONDENSAATORITE TÜÜPE

Raadiotehniliseks otstarbeks kasutatavad kondensaatorid jagunevad kahte suurde gruppi — muutumatu (püsiva) mahtuvusega ja teatud piirides soovikohaselt muudetava mahtuvusega kondensaatoriteks.



a *b* *c*

Joonis 8. 10. Elektroja raadiotehnikas kasutatavaid kondensaatoreid: *a* — vilgukividielektrikuga plokkkondensaator, *b* — paberdielektrikuga rullkondensaator, *c* — keraamiline torukujuline kondensaator.

Püsiva mahtuvusega kondensaatoreid valmistatakse *plokk-* ja *rullkondensaatoritena.* Nende kondensaatorite plaadid valmistatakse õhukestest metall-lehtedest, dielektriku materjalina kasutatakse vilgukivi, parafineeritud paberit või spetsiaalseid keraamilisi aineid.

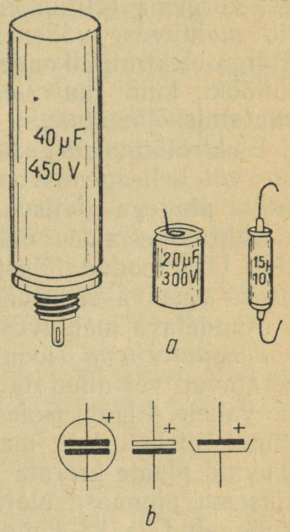
Vilgukivi-dielektrikuga plokk-kondensaatori alumiiniumlehtedest plaadikesed ühendatakse vaheldumisi kokku kaheks grupiks. Niiviisi kasutatakse plaatide pinda maksimaalselt: kõikidel plaatidel, kui mitte arvestada äärmisi, on kummalgi pool naabriks teise gruppi kuuluv plaat (joonis 8. 10-*a*). Kummastki grupist on toodud välja ühendusjuhe ja kogu kondensaator on pressitud isoleerivasse plastmassist kesta.

Parafineeritud paberist dielektrikuga kondensaatorid valmistatakse rullkondensaatori-

tena. Niisuguses kondensaatoris on plaatideks pikad metallribad, mis on omavahel isoleeritud parafineeritud paberi ribadega. Kõik ribad mähitakse rulliks ning mahutatakse kaitsvasse keraamilisse plastmass- või metallkesta (joonis 8. 10-*b*).

Keraamilise dielektrikuga kondensaatorites on dielektrikuks enamasti õhuke toru, mille hõbetatud sise- ja väliskülg moodustavadki kondensaatori plaadid (joonis 8. 10-*c*). Kontakt hõbetatud pindadega luuakse vastavate ühendusliistakutega, millest üks haarab toru sise- ja teine välispinda.

Elektrolüütkondensaatorid on eritüüp suure mahtuvusega püsivkondensaatoreid. Nende ühe plaadi moodustab alumiiniumpleki riba või samast materjalist õõnes silinder (joonis 8. 11-*a*). Teise «plaadina» toimib elektrolüüt — elektrit juhtiv vedelik, mis on kas valatud silindrisse või millega on immutatud paberit. Elektriline ühendus elektrolüüdiga moodustatakse teise elektroodi abil. Eristatakse nn. «märgi» ja «kuivi» elektrolüütkondensaatoreid sõltuvalt nende konstruktsioonist ja elektrolüüdi olekust.



Joonis 8. 11. Elektrolüütkondensaator (*a*) ja selle skeemitähised (*b*).

Elektrolüütkondensaatori pingestamisel alalispingega katab elektrolüüsi tõttu tekkiv elektrit mittejuhtiv alumiiniumiühend õhukese kihina positiivse elektroodi. See isoleeriv kiht toimibki elektrolüütkondensaatoris dielektrikuna positiivse plaadi ja elektrolüüdi kui teise «plaadi» vahel. Dielektrikukiht on väga õhuke, kõigest mõne molekuli paksune; seepärast on kondensaatori «plaadid» teineteisele väga lähedal, mistõttu elektrolüütkondensaatorite mahtuvused on suhteliselt suured.

Elektrolüütkondensaatorite kasutamisel tuleb pidada silmas järgnevat.

1. Pärast pikemat talitluspausi laseb elektrolüütkondensaator pingestamisel lühemat aega läbi võrdlemisi märgatavat alalisvoolu, mis elektrolüüsi teel taastab seismisel halvenenud dielektrikukihti.

2. Ka täiesti töökorras elektrolüütkondensaatorit läbib nõrk alalisvool, sest dielektrikuna toimiv alumiiniumiühend pole absoluutne mittejuht.

3. Vastandina tavalistele kondensaatoritele omab elektrolüütkondensaatori puhul tähtsust ka pingeallika polaarsus (ühendussuund). Elektrolüütkondensaatorile rakendatud alalispinge negatiivne poolus peab olema ühendatud alumiiniumelektroodiga (ena-

masti kondensaatori kerega). Vastassuunalise ühendamise tagajärjel hävib elektrolüütkondensaatori dielektrikukiht ja takistus alalisvoolule väheneb järsult — tekib läbilöök.

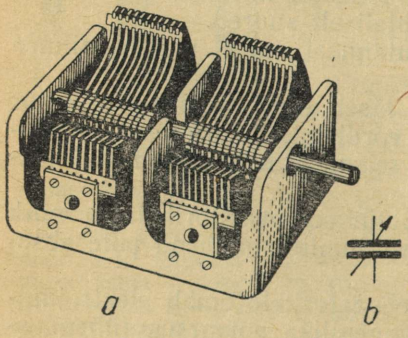
4. Elektrolüütkondensaatorite kasutamisel tuleb rangelt jälgida nendele tegelikult rakendatava pinge vastavust tehase poolt ettenähtud nimipingele. Pulseeriva voolu puhul tuleb arvestada mitte talitluspinge alaliskomponendi suurust, vaid tipp-pinget (alaliskomponent + vahelduvkomponendi amplituud). Nimipingest kõrgema talitluspinge puhul pakseneb dielektriku kiht, mis viib mahtuvuse vähenemisele, samuti võib toimuda läbilöök. «Märg»-elektrolüütkondensaatori dielektrik taastub sageli pärast läbilööki, kuid «kuiv»-elektrolüütkondensaator muutub jäädavalt kasutamiskõlbmatuks.

Elektrolüütkondensaatoreid kasutatakse pulseerivate tehniliste või helisagedusvoolude silumiseks, s. o. nende muutmiseks püsiva pingega alalisvooluks.

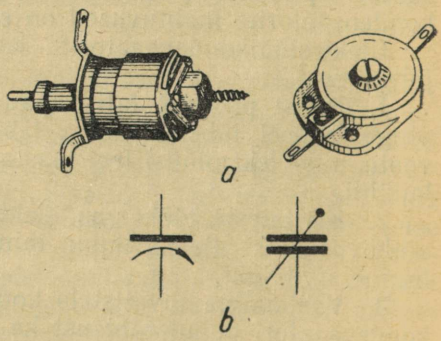
Lülitusskeemides märgitakse elektrolüütkondensaatorit joonisel 8. 11-*b* toodud tähistega. Sageli lisatakse polaarsuse rõhutamiseks vastava elektroodi juurde ka pluss-märk.

Muudetava mahtuvusega kondensaatorid ehitatakse nn. *pöördkondensaatoritena* (joonis 8. 12). Nendes on üks komplekt plaate keeratavad või nihutatavad teise plaadikomplekti kuuluvate plaatide vahele. Plaate isoleerib õhk või mõni tahke (enamasti keraamiline) dielektriline materjal. Pöördetelje või -kruvi abil saab liikuvaid plaate keerata või nihutada seisvate vahele suurema või väiksema pinnaosa ulatuses. Esimesel juhul on plaatide vastastikune pind ja ka kondensaatori mahtuvus suurem, teisel juhul väiksem.

Muudetava mahtuvusega kondensaatoreid, mida raadiolülituses kasutatakse vooluringi mahtuvuse ühekordseks väljareguleerimiseks, nimetatakse *trimmeriteks* ehk *seadekondensaatoriteks*.



Joonis 8. 12. Pöördkondensaator (*a*) ja selle skeemitähis (*b*).



Joonis 8. 13. Trimmerkondensaatorid (*a*) ja nende skeemitähised (*b*).

Trimmeri mahtuvust saab tavaliselt muuta kruvikeeraja abil ühe plaadi või osaliselt hõbedaga kaetud keraamilise isoleerseibi pööramisega (joonis 8. 13).

Olulisim

1. Elektriväli on elektrilaengut ümbritsevas ruumis mõjuv eriline olukord, mis avaldub laetud osakestele mõjuvate mehaaniliste jõudude olemasolus. Elektrivälja jõudude mõjumissuunda iseloomustavad jõujooned.
2. Elektrivälja jõujoonte suunaks loetakse leppeliselt suunda, mida mööda liiguks vaba positiivselt laetud keha.
3. Elektriline induktsioon on nähtus, mille puhul elektriväli tekitab sellesse asetatud elektrit juhtivas kehas elektrilaengud.
4. Elektrivälja salvestub energiat.
5. Kondensaator on kahest teineteisest isoleeritud metallplaadist või plaatide komplektist koosnev seadis, mida kasutatakse elektrilaengute salvestamiseks.
6. Kondensaatorisse salvestub elektrihulk, mille suurus on võrdeline selle kondensaatori mahtuvusega ja plaatide vahel mõjuva pingega.
7. Mahtuvuse ühik on farad. Üks farad on sellise kondensaatori mahtuvus, millesse ühe voldi juures salvestub üks kulon elektrit.

Ülesanded

32. Leida 2-μF mahtuvusega kondensaatorisse 500 V juures salvestatav elektrihulk. (Vastus: $Q = 0{,}001$ C.)
33. Leida kahest paralleelsest plaadist koosneva kondensaatori mahtuvus, kui ühe plaadi pindala on 126 cm^2 ja dielektrikuks on õlitatud paber paksusega 0,315 mm. (Vastus: $C = 1000$ pF.)
34. Leida kolme samatüübilise järjestikku-lülituses 1000-pF kondensaatori kogumahtuvus. (Vastus: 333 pF.)
35. Leida sama kondensaatorite patarei maksimaalne talitluspinge, kui üksiku kondensaatori talitluspinge on 250 V. (Vastus: $U_{tal} = 750$ V.)
36. Leida paralleelsete 5 μF mahtuvusega kondensaatorite arv, et patarei kogumahtuvuseks kujuneks 25 μF. (Vastus: 5 kondensaatorit.)
37. Leida sama kondensaatorite patarei maksimaalne talitluspinge, kui iga üksiku kondensaatori $U_{tal} = 100$ V. (Vastus: $U_{tal} = 100$ V.)

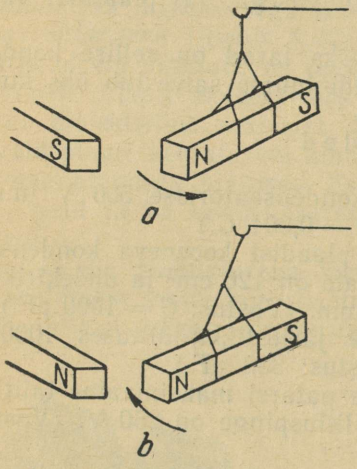
9. PEATÜKK

MAGNETVÄLI

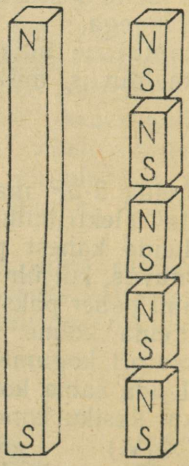
§ 1. MAGNETINÄHTUSED

Juba vanadel rahvastel oli tuntud mõningate kehade eriline püsiv omadus tõmmata ligi teisi samalaadseid aineid, näiteks terast. Niisuguse omadusega ained nimetati magnetiteks. Magneteid esineb ka looduslikult; selliste hulka kuulub näiteks raua ja hapniku ühend — magnetrauamaak ehk magnetiit (Fe_3O_4). Teine osa magneteid on valmistatud rauast, niklist või nende sulamitest kunstlikul teel.

Iga magnetiline keha avaldab ümbruskonnas mehaanilist mõju teistele magnetilisest ainest kehadele. Magnetilise keha ruumilise mõju piirkonda, milles ilmnevad teistele magnetilistele kehadele mõjuvad mehaanilised jõud, nimetame *magnetväljaks*. Peamine magnetiline jõud on igal magnetil koondunud kahte punkti, nn. *poolustesse*.



Joonis 9. 1. Samanimelised magnetipoolused tõukuvad (*a*) ja erinimelised tõmbuvad (*b*).



Joonis 9. 2. Magnetpulga tükeldamisel saadavad osad osutuvad täielikeks kahte poolust omavateks magnetiteks.

Magnetid jaotatakse kahte rühma: *püsiv-* ehk *permanentmagnetid* (kõik kestvate magnetiliste omadustega loomulikud ja kunstlikud magnetid) ning *elektromagnetid*. Viimastes tekitatakse magneti omadused elektrivoolu mõjul.

Ammu oli teada, et vabalt liikuda võiv, näiteks niidi külge riputatud magnet pöördub alati ühe oma poolusega põhja ja teisega lõuna suunda, kusjuures kumbki tema poolustest pöördub

alati vaid kindla ilmakaare poole. See vihjas tõsiasjale, et magneti poolused pole täpselt samade omadustega. Nii hakati eristama kumbagi poolust: magneti see poolus, mis pöördub põhja poole, nimetati *põhjapooluseks* ja lõunasse suunatud poolus — *lõunapooluseks*. Kunstlikel magnetitel, elektromagnetitel ja mujal kasutatakse kokkuleppeliselt põhjapooluse tähisena N (sõnast «Nord»; vene k. С) ja lõunapooluse tähisena S (sõnast «Süd»; vene k. Ю).

Kahe magneti omavahelise mõju uurimisel näeme, et samanimelised poolused mõjustavad teineteist alati tõukejõuga; seevastu erinimelised poolused püüavad alati omavahel tõmbuda (joonis 9. 1).

Magnetipooluste vastastikune mõju on samalaadne elektrilaengute omavahelise mõjuga: samanimelised elektrilaengud tõukuvad ja erinimelised laengud tõmbuvad. Kuid elektrilaengute ja magnetipooluste vahel on suur erinevus. Elektrilaengud võivad olla paigutatud üksikult erinevatele kehadele. Magnetipoolused esinevad igal magnetil alati koos samal kehal: põhjapoolus ühes ja lõunapoolus teises otsas. Kui magneeditud teraspulk keskelt poolitada, siis osutub kumbki pool jälle täielikuks kahe poolega magnetiks — üksikut magnetipoolust ühel kehal pole kunagi võimalik saada (joonis 9. 2).

§ 2. MAGNETVÄLI

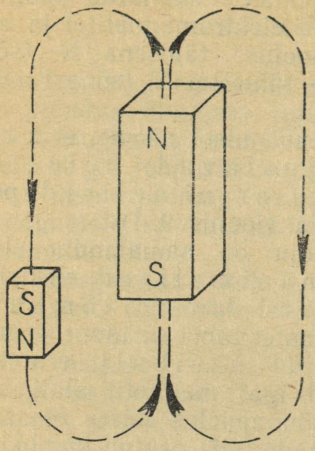
Magnetit ümbritseb magnetväli, mille igas punktis mõjuvad kindlasuunalised magnetilised jõud. Nende jõudude suuna iseloomustamiseks kasutatakse abivahendina nn. *magnetiliste jõujoonte* mõistet. Magneti ümber asuvad mõeldavad jõujooned kujutavad suundi, mida mööda püüaks asetuda sellesse magnetvälja paigutatud kõrvaline magnet (joonis 9. 3).

Jõujoonte sihti saab nähtavaks teha peene rauapuru abil. Magneti lähedale puistatud rauapuru osakesed «kleepuvad» üksteisega ahelikeks, mis asetuvad magnetväljas mõjuvate jõudude, seega ka jõujoonte sihis.

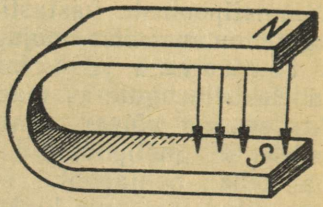
Mitmetel põhjustel tuli magnetväljale omistada kindel suund. Kokkuleppeliselt määrati magnetvälja suunaks väljaspool magnetit suund põhjapooluselt lõunapoolusele. Tuleb märkida, et magnetväljal pole algust ega lõppu. Kui elektriväli lähtub positiivselt laengult ja suubub negatiivsele laengule, siis magnetväli seevastu moodustab alati kinnise joone. Püsivmagneti väli (joonised 9. 3 ja 9. 4) lähtub põhjapooluselt, läbib ümbritseva ruumi, suubub lõunapoolusele ja läbi magneti materjali taas põhjapoolusele — on olemas kinnine *magnetiline ring*.

Kui asetada magnetvälja tükike magneetimata rauda, siis võime kindlaks teha välja tiheduse nõrgenemist tüki külgedel ja

tugevnemist magneti pooluste poole suunatud otstel. Sealjuures avaldab raud ise magnetilisi omadusi — muutub magnetiks. Rauatükk magneetub alati nii, et välja esile kutsunud magneti



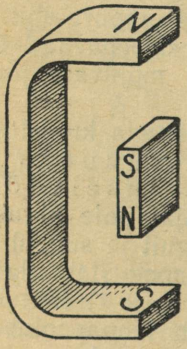
Joonis 9. 3. Magnetvälja suund ruumi mingis punktis on seal kõrvalise magneti põhjapoolusele avalduva jõu suund.



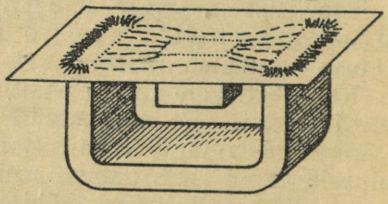
Joonis 9. 4. Magnetvälja jõujooned sulguvad alati.

mingi pooluse poole tekib vastasnimeline poolus. Joonis 9. 5 illustreerib kirjeldatud nähet — *magnetilist induktsiooni.*

Rauapuru abil nähtavaks muudetud jõujoonte-pildi abil on kerge veenduda, et väljatihedus on rauatüki otstes tugevnenud ja külgedel nõrgenenud (joonis 9. 6) — näib, nagu koondaks raud



Joonis 9. 5. Magnetilise induktsiooni nähe.



Joonis 9. 6. Magnetvälja jõujoonte paiknemise nähtavaksmuutmine rauapuru abil magnetilise induktsiooni puhul.

enesesse ümbrusest jõujooni. Raud avaldab magnetväljale palju väiksemat takistust kui näiteks õhk või paljud muud ained ja seepärast koondubki sellesse valdav osa magnetväljast.

Pehmesse rauda indutseeritud magnetism kaob seda tekitanud magnetvälja kõrvaldamisega enam-vähem täielikult. Osa aineid, nagu kõvema struktuuriga teras, säilitavad pärast magneetumist oma magnetilised omadused kauemaks ajaks. Tänu sellele omadusele, mida nimetatakse *jääkmagnetismiks* ehk *magnetiliseks remanentsiks,* võib niisugustest ainetest valmistada kunstlikke püsivmagneteid, mis pärast ühekordset magneetimist säilitavad pikemaks ajaks oma magnetilised omadused. Püsivmagnetid kaotavad oma jääkmagnetismi liigsel kuumutamisel (terase puhul üle 770° C) või ka tugeval põrutamisel.

Magnetvälja iseloomustamiseks kasutatakse väljatugevuse, väljatiheduse ja suhtelise magnetilise läbitavuse mõisteid.

Väljatugevuseks (tähis H) magnetvälja mingis punktis on mehaaniline jõud, millega väli selles punktis mõjub ühikuks võetud suurusega põhjapoolusele. Väljatugevust mõõdetakse örstedides. Väljatugevus oleneb ainult magnetvälja esilekutsuvast põhjusest ning tema ruumilisest asendist, mitte aga keskkonnast, milles väli mõjub.

Eelnenust nägime, et magnetvälja asetatud rauatükk koondab enesesse rohkem jõujooni, kui selles kohas varem oli, kuigi väljatugevus seejuures ei muutu (püsivmagneti «tugevus» ei kasvanud!). Seepärast on magnetvälja iseloomustamiseks kasutusel veel väljatiheduse mõiste.

Väljatihedus ehk *magnetiline induktsioon* (tähis B) iseloomustab aine magneetimisprotsessi (tema magneetimisastet) ning ta erineb suuruselt seda esilekutsuvast väljatugevusest teguri μ (kreeka tähestiku täht «müü») korda:

$$B = \mu H.$$

Suurt mõju magnetvälja tihedusele avaldab niisiis keskkond, milles see väli tekitatakse. Ühes aines kujuneb samadel tingimustel suurem väljatihedus kui teises aines. Ainete magnetiliste omaduste võrdlemiseks kasutatakse *suhtelise magnetilise läbitavuse* mõistet, milleks osutub väljatugevust ja -tihedust siduv tegur μ. Õhu ja vaakuumi suhteline magnetiline läbitavus on 1. Kõikide teiste ainete suhteline magnetiline läbitavus määratakse vaakuumi läbitavusega võrdlemise teel.

Igale ainele vastav arv μ näitab, mitu korda suureneb väljatihedus selle aine viimisel magnetvälja (võrreldes aines ilmnevat tugevnenud välja magnetvälja esialgse tugevusega samas kohas).

Koobaltit, niklit ja alumiiniumi sisaldavate eriliselt valmistatud rauasulamite μ väärtus võib väikeste väljatugevuste puhul olla mitmekümne tuhande piirides. Siiski on enamiku ainete mag-

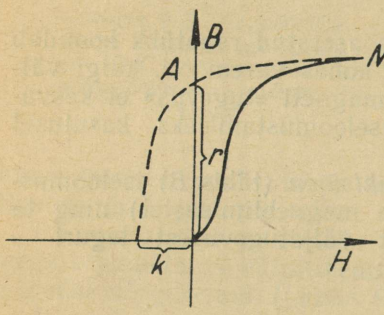
netiline läbitavus arvuliselt lähedane ühele (mittemagnetilised materjalid).

Ained jagunevad magnetilise läbitavuse poolest kolme liiki: *Ferromagnetiliste ainete* magnetiline läbitavus on suur, $\mu = 2000 \ldots 20\,000$ ja isegi üle selle. Neid aineid iseloomustab nõrga magnetvälja toimel tekkiv suur väljatihedus. Sellesse liiki kuulub raud ja selle sulamid, teras, malm, koobalt ning nikkel. Neid aineid kasutatakse kunstlike püsivmagnetite ja elektromagnetite valmistamiseks.

Paramagnetiliste ainete magnetiline läbitavus on praktiliselt võrdne ühega või sellest pisut suurem. Sellesse liiki kuulub valdav enamus aineid, muuhulgas vask, alumiinium, kõik gaasid jt.

Diamagnetilised ained ei soodusta magnetvälja läbimist endast. Nende ainete suhteline magnetiline läbitavus on pisut väiksem ühest. Siia kuulub näiteks vismut ja tsink ($\mu \approx 0{,}99$).

Väga oluline on märkida, et ferromagnetiliste ainete magnetiline läbitavus pole täiesti konstantne suurus, vaid sõltub väljatugevusest. Viimase suurenemisel üle teatava väärtuse — *küllastuspiiri* — langeb ferromagnetilise materjali läbitavus kiiresti. Siit selgub, miks ei tohi praktikas magnetringi «koormata» ülemäärase väljatihedusega — selle tagajärjel väheneks aine «vastuvõtlikkus» magnetväljale ja seadme talitlustingimused halveneksid.

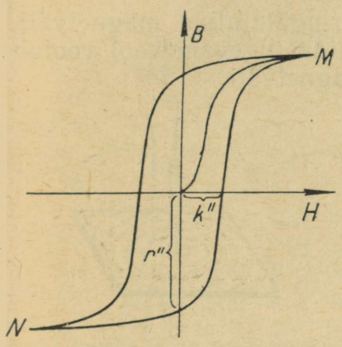


Joonis 9. 7. Ferromagnetilise aine magneetimiskõver.

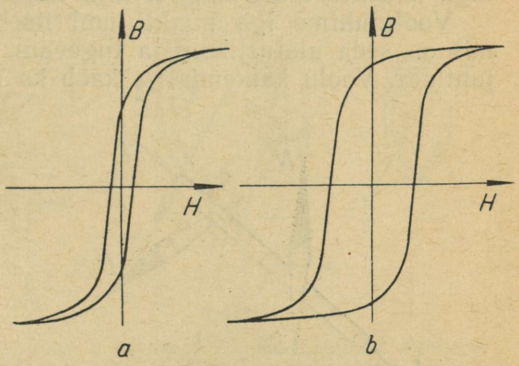
Magnetiliste ainete väljatiheduse B ja väljatugevuse H sõltuvuse kujutamisel graafikuna saadakse aine *magneetimiskõver* (joonisel 9. 7 pidev joon.). Väljatugevuse H kasvul nullist alates suureneb väljatihedus B kehas algul aeglasemalt, siis kiiremini ja lõpuks — suurte väljatugevuste puhul, kui μ on küllastumise tõttu vähenenud — taas aeglasemalt. Küllastuspiiri saavutamisel muutub kõver peaaegu rõhtsaks — väljatugevuse edasisel suurenemisel väljatihedus praktiliselt enam ei kasva.

Kui nüüd hakata väljatugevust vähendama, siis ilmub huvitav nähtus — väljatihedus ei vähene väljatugevuse vähendamisel endist kõverat mööda, vaid mõnevõrra aeglasemalt (punktiirjoon samal joonisel). Väljatugevuse muutumisel nulliks (punktis A) jääb magnetilisse ainesse *jääkväljatihedus* (jääkmagnetism) ehk *remanentsmagnetism* (graafiku püstteljel lõik r) — aine säilitab magnetilised omadused ka välise välja puudumisel. Jääkmagnetismi kõrvaldamiseks tuleb ainet mõjustada teatava vastassuunalise väljatugevusega (graafiku rõhtteljel lõik k) ehk *koertsitiivjõuga*. Kui sellest edasi suurendada väljatugevust esi-

algsele vastupidise väärtuseni, siis omandab väljatihedus taas esialgsega arvuliselt võrdse, kuid vastupidise suuruse (punkt *N* joonisel 9.8), väljatugevuse vähenemisel nullile on toimunud üks magneetimise periood. Muidugi säilib siis jällegi jääkmagnetism (lõik *r″*), mis ületatakse järgmise perioodi alguses koertsitiivjõuga (lõik *k″*). Ferromagnetilise aine mõjutamisel vahelduva magnetväljaga toimub tema ümbermagneetumine sellise graafiku, nn. hüstereesisilmuse kohaselt. Hüstereesisilmuse kuju määrab aine magnetiline läbitavus, remanentsmagnetism ja koertsitiivjõud; silmuse suuruse aga ainele mõjuv väljatugevus ja aine magnetiline küllastus.



Joonis 9.8. Väljatiheduse sõltuvus muutlikust väljatugevusest ferromagnetilises aines.



Joonis 9.9. Magnetiliselt pehme (*a*) ja jäiga (*b*) materjali hüstereesisilmused.

Ferromagnetilised ained jagunevad hüstereesisilmuse kuju järgi kahte liiki. *Magnetiliselt pehmed ained* omavad juba väikeste väljatugevuste juures suurt läbitavust ja väikest koertsitiivjõudu. Sellesse liiki kuuluvate materjalide hüstereesisilmus on kitsas (joonis 9.9-*a*). Neid kasutatakse muutliku magnetväljaga töötavates seadmetes, sest nende ainete jääkmagnetism, mis tuleb välja igal poolperioodil ületada, on väike.

Magnetiliselt pehmed materjalid on tehniliselt puhas raud, hallmalm, süsinik- ja legeeritud terased [1], elektrotehniline lehtteras ehk «dünamoplekk» (sisaldab räni 0,3...5%), mida kasutatakse elektrimasinate ja transformaatorite magnetringides. Väikestel väljatugevustel eriti suure läbitavusega sulam on permalloi (sisaldab suurel määral niklit).

Magnetiliselt jäigad materjalid omavad suurt jääkmagnetismi ja koertsitiivjõudu ning nende hüstereesisilmus on lai ja suure pindalaga (joonis 9.9-*b*). Niisuguste omadustega on mitmed magnetilised sulamid. Magnetilises terases kasutatakse lisandina

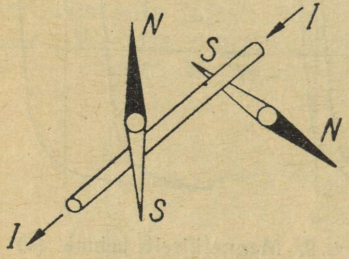
[1] Legeeritud teras sisaldab mitmesuguseid teisi keemilisi elemente (niklit, titaani, vanaadiumi), mis muudavad suurel määral tema füüsikalisi omadusi.

kroomi (1,5...4%), volframit (5%), kroomi ja koobaltit (6% ja 6%), kroomi, koobaltit ja molübdeeni (6%, 10%, 1,5%). Tugevaid püsivmagneteid toodetakse järgmistest sulamitest: «alniko» (12% alumiiniumi, 20% niklit, 5% koobaltit ja 63% rauda), «alni» (14% alumiiniumi, 26% niklit, 60% rauda), «magniko» (14% niklit, 24% koobaltit, 8% alumiiniumi, 3% vaske, 51% rauda).

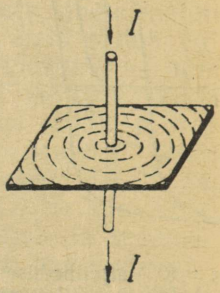
§ 3. ELEKTRIVOOLU MAGNETILINE MÕJU

Iga liikuvat elektrilaengut ümbritseb magnetväli. Elektrivooluga kaasneb alati magnetvälja tekkimine.

Voolujuhtme iga punkti ümbritseb ringikujuline magnetväli, mis on seda ulatuslikum ja tugevam, mida tugevam vool voolab juhtmes. Voolu katkemisega kaob ka magnetväli.



Joonis 9. 10. Juhtme ümber elektrivooluga kaasneva magnetvälja mõju magnetnõelakestele.



Joonis 9. 11. Elektrivoolu ümbritseva magnetvälja nähtavaksmuutmine rauapuru abil.

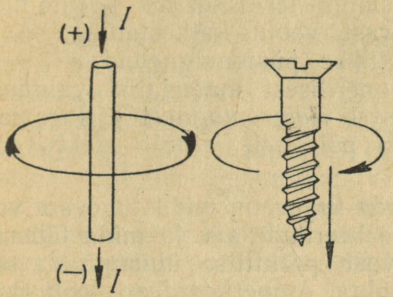
Kompassi magnetnõela abil on kerge kindlaks määrata magnetvälja olemasolu voolujuhtme ümber. Kui asetada voolujuhe paralleelselt kompassi magnetnõelaga viimase lähedusse, kaldub nõel voolu ühendamisel kõrvale (joonis 9. 10). Märkimist väärib, et voolujuhtme kohal olev magnetnõel ja all olev magnetnõel kalduvad kõrvale vastassuundades (see asjaolu tõestabki ringikujulise magnetvälja olemasolu juhtme ümber).

Rauapuru abil võib nähtavaks teha ka elektrivoolu ümbritseva magnetvälja jõujoonte paiknemise. Voolujuhe tuleb selleks asetada vertikaalselt läbi horisontaalse papitüki, mis kaetakse rauapuruga. Voolu sisselülitamisel tekivad rauapuru magneetumisel jõujoonte-sihilised kontsentrilised (ühise keskpunktiga) ringikujulised ahelikud (joonis 9. 11).

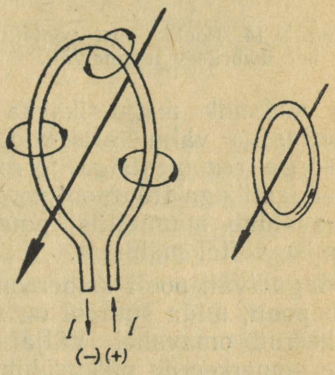
Kuna vabalt pöörelda võiv magnetnõel pöördub oma põhjapoolusega magnetvälja suunas, s. o. magnetilise lõunapooluse

poole, siis võib selle abil määrata elektrivoolu ümbritseva magnetvälja suunda. Sirget voolujuhet ümbritseva magnetvälja suuna määramiseks sobib järgmine reegel: kui vaadata piki juhet voolu suunas (mõeldud on elektrivoolu konventsionaalset suunda välises vooluringis vooluallika positiivselt pooluselt negatiivsele poolusele), siis magnetvälja suund ühtib kellaosuti liikumise suunaga.

Niisiis voolu suund juhtmes määrab juhet ümbritseva magnetvälja suuna. Voolu suuna muutmisel muutub ka magnetvälja suund.



Joonis 9. 12. «Kruvireegel» voolujuhet ümbritseva magnetvälja suuna määramiseks.

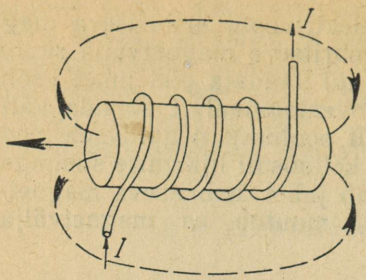


Joonis 9. 13. Ringikujulist voolujuhet ümbritsev magnetväli: jõujooned juhtmega piiratud pinnas on ühesuunalised.

Magnetvälja suuna paremaks meelespidamiseks kasutatakse nn. «*kruvi*»- («*korgitõmbaja*»-) *reeglit*: kruvi pöörlemissuund vastab magnetvälja suunale siis, kui voolu suund juhtmes ühtib kruvi edasiliikumise suunaga (joonis 9. 12).

Ringikujulist voolujuhet ümbritseva magnetvälja kõik jõujooned suubuvad juhtmega ümbritsetud tasapinda ühelt poolt ja väljuvad teiselt poolt (joonis 9. 13).

Elektrijuhtmest valmistatud spiraalikujulist mähist — *pooli* — ümbritseb voolu korral üksikute keerdude magnetväljade liitumisel tekkiv magnetväli. Kõikides keerdudes voolab vool ühes suunas, mistõttu iga keeru magnetväljad omavad pooli sees üht ja sama suunda. Ka väljaspool pooli on keerdude magnetväljad omavahel samasuunalised. Niiviisi kujuneb voolu olemasolu puhul traatmähises viimase ümber magnetväli, mis on täiesti sarnane püsivmagnetit ümbritseva väljaga. Traatmähise ühest otsast väljuv magnetväli suubub teise otsa ning läbides pooli sisemust jõuab esialgsesse lähtepunkti tagasi, moodustades kinnise kõverjoone (joonis 9. 14). Mähist ümbritseb magnetväli vaid voolu olemasolul. Niipea kui vool katkeb, kaob ka magnetväli.



Joonis 9.14. Poolikujulist voolujuhet ümbritsev magnetväli.

Voolust läbitaval poolil on suur sarnasus sirge pulgakujulise magnetiga. Pooli kui «magnetpulga» lõunapoolus on selles otsas, mille poolt vaadates kokkuleppeline voolusuund keerdudes ühtib kellaosuti liikumise suunaga.

Kui paigutada mähisesse raudsüdamik, siis magneetub see voolu tekkimisel. Tugeva jääkmagnetismiga terasesortide kasutamisel jääb südamik magnetiks ka pärast voolu katkestamist. Selle menetlusega valmistatakse kunstlikke püsivmagneteid.

Nõrga remanentsiga ferromagnetilisest materjalist valmistatud südamikuga traatpool moodustab *elektromagneti*. Elektromagnet avaldab magnetilisi omadusi põhiliselt ainult elektrivoolu läbimise vältel mähisest.

Magnetväli pooli ümber on seda tugevam, mida tugevam vool läbib pooli, mida suurem on selle keerdude arv ja mida lähemal on keerud omavahel. Väljatugevuse praktilise ühikuna kasutatakse amperkeerdu pikkusühiku kohta. Amperkeerd on pooli keerdude arvu ja seda läbiva voolu korrutis, kui vool on mõõdetud amprites.

Magnetvälja tihedus poolis suureneb μ (magnetilise läbitavuse) kordselt, kui sellesse asetada ferromagnetiline südamik. Seepärast ongi peaaegu eranditult iga elektrotehnikas kasutatav pool mähitud elektrotehnilisest lehtterasest koostatud südamikule.

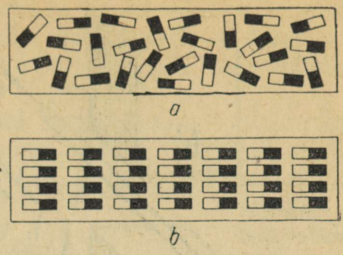
§ 4. ELEMENTAARMAGNETITE TEOORIA

Magnetiliste nähtuste füüsikaline sisu oli elektroniteooria püstitamiseni tundmatu.

Hiljem püstitati elementaarmagnetite teooria, mille põhjal iga magnetilise aine molekulid kujutavad endast üliväikesi kaht poolust omavaid magneteid. Magneetimata rauas või terases on elementaarsed magnetid asetatud korrapäratult, kusjuures nende väline kogumõju kujuneb nulliks (joonis 9. 15-*a*). Välise magnetilise mõjutuse tagajärjel (näiteks magnetilise induktsiooni puhul) pöörduvad elementaarsed magnetid paralleelseteks, kusjuures ilmneb ka nende magnetväljade väline kogumõju (joonis 9. 15-*b*).

Iga liikuvat elektrilaengut ümbritseb magnetväli. Molekulides liiguvad elektronid kindla korra järgi. Sellest aatomisisesest «elektrivoolust» ongi tingitud molekulaarmagnetismi nähtus ferromagnetilistel ainetel.

Mitteferromagnetilised ained ei magneetu ega avalda ka mingeid väliselt märgatavaid magnetilisi omadusi. Taoliste ainete molekulides on elektronid nii paigutatud, et nende liikumisest põhjustatud üksikud magnetväljad neutraliseeruvad aatomi ulatuses ja nii ei teki ka molekulaarmagneteid.



Joonis 9. 15. Elementaarmagnetite paiknemine magneetimata (*a*) ja magneeditud (*b*) ferromagnetilises materjalis.

Eespool nägime, et ferromagnetilisi aineid on võimalik magneetida kuni teatava piirini — *magnetilise küllastuseni.* Edasine magneetiva välja tugevuse suurendamine ei kutsu enam esile selles aines märgatavat väljatiheduse kasvu. Elementaarmagnetite teooria seisukohalt tekib magnetilise küllastuse nähtus siis, kui magneetiv väli on aines k õ i k elementaarsed magnetid paralleelseks muutnud. Loomulikult ei saa sellest piirist veelgi tugevama välja kasutamine enam suurendada aine magnetilisi omadusi. Nõrgal magneetimisel muudetakse ilmselt vaid osa molekulaarmagneteid paralleelseteks, ülejäänud jäävad aga korrapäratusse asendisse.

Kuumutamise või tugevate löökide mõjul kaotab permanentmagnet oma jääkmagnetismi, sest sellega rikneb molekulaarmagnetite korrapärane paigutus.

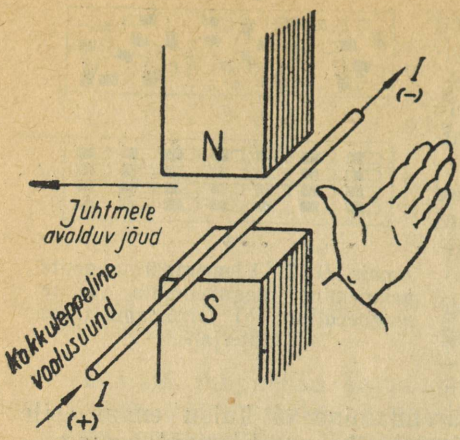
§ 5. VOOLUJUHE MAGNETVÄLJAS

Kui mingis magnetväljas asub juhe, mida läbib elektrivool, siis selle voolu ja esialgse välja koosmõjul avaldub juhtmele kindlasuunaline mehaaniline jõud. Selle jõu suurus oleneb välja ja juhet läbiva voolu tugevusest.

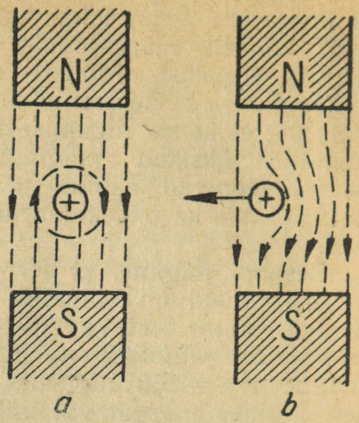
Magnetväljas asuvale voolujuhtmele avalduva jõu suuna võib määrata nn. «*vasaku käe reegli*» abil (joonis 9. 16): K u i h o i d a v a s a k k ä s i n i i, e t m a g n e t v ä l i o l e k s s u u n a t u d p e o p e s s a (p e o p e s a o n p ö ö r a t u d p õ h j a p o o l u s e p o o l e) j a s õ r m e d o s u t a k s i d j u h t m e s v o o l a v a v o o l u l e p p e l i s t s u u n d a, s i i s n ä i t a b p e o p e s a t a s a p i n n a l v ä l j a s i r u t a t u d p õ i a l j u h t m e l e a v a l d u v a m e h a a n i l i s e j õ u s u u n d a. Tekkiv jõud on alati suunatud risti magnetvälja suunaga ja risti juhtmega.

Kirjeldatud nähtusel põhineb elektrienergia muundamine mehaaniliseks energiaks elektrimootorites.

Voolujuhtme ja kõrvalise magnetvälja vahelise mehaanilise mõju tekkimise selgitamiseks kasutame joonist 9. 17. Siin on püsivmagneti pooluste *N* ja *S* vahele paigutatud voolujuhe (risti



Joonis 9. 16. Magnetväljas asuvale voolujuhtmele avalduva jõu suuna määramine «vasaku käe reegli» abil.



Joonis 9. 17. Voolujuhtme ja püsivmagneti välja jõujoonte paiknemine.

joonise pinnaga). Märk ⊕ juhtme ristlõikes näitab seda, et vool juhtmes voolab meie poolt joonise poole kokkuleppelise voolusuuna kohaselt. Vastupidisel juhul, kui juhet läbib vool joonise poolt meie poole, märgitakse juhtme ristlõikesse punkt (⊙).

Voolujuhtme ümber tekib iseseisev magnetväli, mis ühel pool juhet on püsivmagneti väljaga samasuunaline (näites toodud juhul paremal pool juhet) ja teisel pool vastupidise suunaga. Seetõttu on magnetväljade koosmõjul ühel pool juhet väli tugevam (jõujooned paiknevad tihedamalt) kui teisel pool ning juhe püüab n. ö. magnetvälja ühtlustamiseks liikuda nõrgema magnetvälja suunas (joonis 9. 17-*b*).

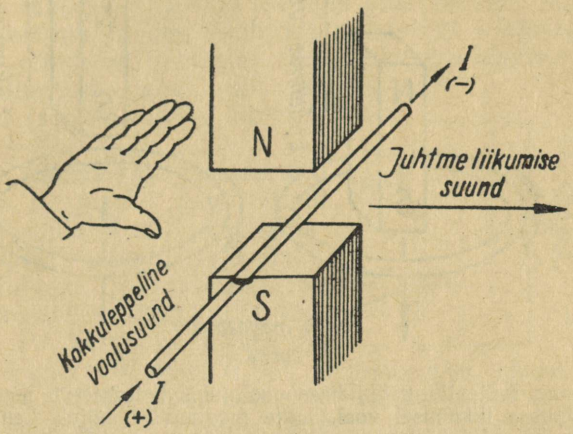
Tuleb märkida, et magnetväli ei mõju otseselt juhtmele, vaid elektrivoolu moodustavatele elektronidele, sundides neid oma liikumissuunda muutma. Elektronidelt kandub see mõju edasi juhtmele. Kui näiteks tekitada õhutühjas ruumis elektrivool ilma juhtmeta — kiirelt liikuvate vabade elektronide juga — siis sunnib magnetväli ka seda juga painduma uude suunda.

§ 6. ELEKTROMAGNETILINE INDUKTSIOON

Eelmises paragrahvis nägime, et magnetväljas asuvale voolujuhtmele mõjub mehaaniline jõud. On olemas ka sellele vastupidine nähtus: juhtme liikumisel magnetväljas tekib juhtmes elektromotoorne jõud, kui juhe lõikab magnetvälja jõujooni (ja ka vool, kui juhe moodustab kinnise vooluringi). Nii tekkinud elektromotoorset jõudu nimetatakse *indutseeritud elektromotoor-*

seks jõuks, voolu — *induktsioonivooluks* ja tervet nähtust — *elektromagnetiliseks induktsiooniks*. Nii on elektrilised ja magnetilised nähtused vastastikused: elektrivool kutsub esile magnetvälja, kuid ka muutuv magnetväli tekitab elektrivoolu.

Juhtme liikumise suuna muutmisel magnetvälja suhtes muutub ka indutseeritud elektromotoorse jõu suund. Viimase määramiseks võib kasutada nn. «*parema käe reeglit*» (joonis 9. 18):



Joonis 9. 18. Magnetväljas liikuvas juhtmes indutseeritava elektromotoorse jõu suuna määramine «parema käe reegli» abil.

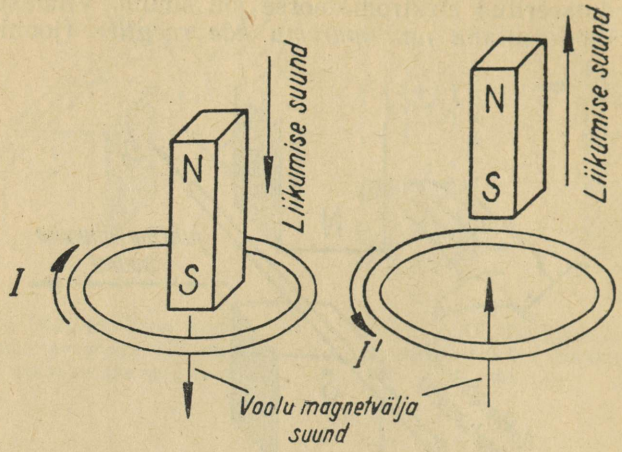
kui asetada parema käe peopesa magnetvälja põhjapooluse suunas ning peopesa tasapinnal väljasirutatud pöial juhtme liikumise suunas, siis näitavad väljasirutatud sõrmed juhtmesse indutseeritud elektromotoorse jõu suunda.

Elektrivool juhtmes tekib elektromagnetilise induktsiooni puhul juhtme liikumisenergia (mehaanilise töö) arvel. Niipea kui juhe enam ei lõika magnetvälja, katkeb ka elektromotoorse jõu indutseerumine juhtmes.

Indutseeritud voolu suunda saab hõlpsalt määrata silmapaistva vene teadlase *Lenzi* poolt antud reegli järgi: indutseeritud voolu suund on alati niisugune, et ta töötab voolu tekitavale nähtele vastu.

Lenzi reegli selgitamiseks kasutame joonist 9. 19-*a*. Seal on kujutatud kinnise rõnga kujulise juhtme suhtes liikuda võiv magnet. Püsivmagneti lõunapoolus siseneb mingi välise mehaanilise jõu mõjul rõngasse. Seejuures indutseerub rõngas vool, mille suund on selline, et magneti pooluse (antud juhtumil lõunapooluse)

poole kujuneb voolu ümber oleva magnetvälja samanimeline (lõuna-) poolus. Samanimeliste magnetpooluste vahel esinev tõukejõud ongi jõud, mis töötab vastu voolu tekitanud nähtele — magneti liikumisele.



Joonis 9. 19. Rõngakujulises voolujuhis indutseerub magnetpulga liikumisel vool, mille magnetväli mõjub Lenzi reegli põhjal vastu magnetit ümberpaigutavale jõule.

Teisel juhul (joonis 9. 19-*b*) indutseeritakse traatrõngasse vool püsivmagneti lõunapooluse eemaldamisega. Sel juhul on tekkiva voolu magnetväli suunatud nii, et rõnga magnetipoolsel küljel tekib vastasnimeline (põhja-) poolus. Erinimeliste magnetipooluste vahel valitsev tõmbejõud töötab vastu magneti eemaldamisele, s. o. voolu tekkimise põhjusele. Magneti liikumapanekuks kulutatav töö muundub rõngas elektrivooluks, mis omakorda tekitab teatava hulga soojusenergiat.

Lahtises juhtmes v o o l u tekkida ei saa (kuigi e l e k t r o m o t o o r n e j õ u d on olemas), seega puudub niisuguse juhtme ümber ka magnetväli ja magneti liikumiseks mehaanilist energiat ei tarvitata.

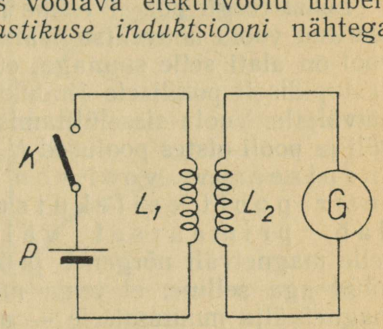
Elektromagnetilise induktsiooni nähtuse füüsikaline sisu muutub mõistetavaks järgmise arutelu kaudu. Voolujuhtme liikumine magnetväljas sunnib liikuma ka juhtmes olevaid vabu elektrone nii-öelda «koos juhtmega». Eelneva paragrahvi materjalist teame, et magnetväljas liikuvatele elektrilaengutele mõjub välja suunaga ja liikumissuunaga risti olev mehaaniline jõud. See jõud põhjustabki vabade elektronide suunatud liikumise piki juhet ühes suunas, s. o. elektrivoolu. Konventsionaalne voolusuund, mille alusel on määratud kõik elektrivoolu ja magnetvälja ühendavad reeglid, on muidugi elektronide liikumise suunale vastupidine.

Elektromagnetilisel induktsioonil põhineb elektrigeneraatorite ehitus. Generaatorid on tööstuslikud seadmed, mis muundavad mehaanilise energia vahetult elektrienergiaks.

§ 7. VASTASTIKUNE INDUKTSIOON

Igasse elektrijuhti indutseerub pinge, kui teda lõikab magnetväli. Seda magnetvälja võib tekitada püsivmagnet, kuid samahästi võib ta tekkida mõnes vooluringis voolava elektrivoolu ümber. Viimasel juhul on tegemist *vastastikuse induktsiooni* nähtega kahe vooluringi vahel, mis on aheldatud (seotud) ühise magnetvooga.

Kaks teineteisest isoleeritud traatpooli L_1 ja L_2, paigutatuna kõrvuti (joonis 9.20), võimaldavad tutvuda vastastikuse induktsiooni nähtega. Ühe mähisega on lüliti K kaudu ühendatud alalisvooluallikas P. Teise mähisega on ühendatud galvanomeeter G [1].



Joonis 9.20. Lülitusskeem vastastikuse induktsiooni tekitamiseks.

Juhtides lüliti abil esimesse pooli alalisvoolu, tekib selle ümber kiiresti tugevnev magnetväli. Kuna muutuv magnetväli indutseerib juhtmes elektromotoorse jõu, siis ka esimese pooli, nn. *primaarmähise* muutuv magnetväli, aheldudes teise, nn. *sekundaarmähisega*, tekitab selles *induktsiooni elektromotoorse jõu*. Primaarmähise voolu katkestamine või nõrgendamine kutsub esile magnetvälja kadumise või vastava nõrgenemise. See tekitab omakorda sekundaarmähises induktsiooni elektromotoorse jõu. Primaarvoolu sisselülitamisel või tugevdamisel sekundaarpoolis indutseeruv elektromotoorne jõud (ja suletud sekundaarringi korral ka vool) on võrreldes primaarvoolu katkestamisel või nõrgendamisel indutseeruva elektromotoorse jõuga vastupidise suunaga. Kui primaarvool ei muutu, on ka primaarmähist ümbritsev magnetväli püsiv. Sekundaarmähises niisugusel juhul muidugi elektromotoorne jõud ei indutseeru (püsivas magnetväljas paigaloleva pooli keerdudega ahelduv magnetvoog on samuti püsiv, mistõttu induktsiooninähet ei esine).

Vastastikuse induktsiooni puhul indutseerub sekundaarses vooluringis elektromotoorne jõud ainult primaarse vooluringi voolu muutumise, selle tekkimise ja katkemise het-

[1] Galvanomeeter on elektriline mõõteriist, mis määrab kindlaks voolu olemasolu ja suuna. Tema skeemitähis on toodud joonisel.

kedel. Püsiva primaarvoolu poolt sekundaarmähisesse elektromotoorset jõudu ei indutseeru.

Püsiva vooluga primaarmähisest indutseerub sekundaarmähisesse elektromotoorne jõud ainult siis, kui üht mähist teise suhtes liigutada. Siis primaarmähist ümbritsev püsiv magnetväli lõikab sekundaarmähist ja elektromotoorne jõud indutseerub vaid liikumise kestel. See olukord meenutab rohkem elektromagnetilist induktsiooni (alalisvoolust läbitav primaarmähis mõjub siin tavalise püsivmagnetina) kui vastastikust induktsiooni.

Lenzi reegli põhjal võime määrata sekundaarmähisesse indutseeritud voolu konventsionaalset suunda järgmiselt: indutseeritud vool on alati selle suunaga, et teda ümbritsev magnetväli mõjub vastupidiselt põhilisele (induktsiooninähtust esilekutsuvale) magnetväljale. Voolu sisselülitamisel primaarmähisesse tekib magnetväli ja pooli otstes poolused *N* ja *S*. Sekundaarmähisesse indutseeruv vool on niisuguse suunaga, et tema poolt esilekutsutav magnetväli nõrgendab primaarset välja. Primaarvoolu katkestamisel selle magnetväli nõrgeneb ja kaob. Indutseeritud voolu suund on nüüd aga selline, et tema magnetväli püüab jällegi primaarse magnetvälja muutumisele — antud juhul nõrgenemisele — vastu töötada.

Vastastikuse induktsiooni nähtuse kasutamisele on rajatud elektro- ja raadiotehnikas väga laialdaselt kasutatava seadme — transformaatori tööpõhimõte.

§ 8. ENDAINDUKTSIOON

Muutuva voolu puhul ilmneb endainduktsiooni nähe. Voolu muutumine mingis juhtmes kutsub esile seda juhet ümbritseva magnetvälja muutumise. Muutuv magnetväli lõikab sealjuures ka juhet ennast. Nii indutseerub juhtmesse temas endas voolava voolu tugevuse igal muutusel *endainduktsiooni elektromotoorne jõud.*

Lenzi reegli põhjal on primaarse voolu kasvamisel samasse juhtmesse indutseeruv elektromotoorne jõud algvoolu tekitavale elektromotoorsele jõule vastassuunaline, takistades seega voolu tugevnemist. Primaarse voolu nõrgenemisel tekkiv endainduktsiooni elektromotoorne jõud on aga algvooluga samasuunaline ja püüab jällegi takistada tema muutumist, antud juhul kahanemist.

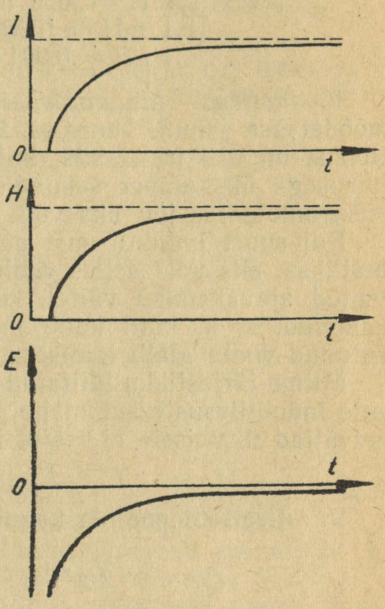
Voolujuhtme endainduktsioon on võrreldav keha inertsiga. Inertsi tõttu on paigalseisva keha liikumapanemine või ühtlaselt liikuva keha liikumiskiiruse muutmine takistatud, olles seotud teatava energiakuluga.

Liikumapandav hooratas saavutab nõutava püsiva pöörlemiskiiruse alles teatava ajavahemiku möödumisel. Selle aja vältel

kulub valdav osa hooratast pööravast mehaanilisest energiast tema inertsi ületamiseks (see energiahulk salvestub pöörlevasse hoorattasse liikumisenergiana) ja ainult väike osa läheb hõõrdumiskadude ületamiseks.

Ringiajava jõu lakkamisel pöörleb hooratas inertsi tõttu veel mingi aja vältel, kusjuures vabanev energia ongi pöörlevasse hoorattasse selle käivitamisel salvestunud liikumisenergia.

Kinnises vooluringis põhjustab analoogilisi elektrilisi nähtusi juhtmete endainduktsioon. Endainduktsiooni nähe ilmneb suuremal või vähemal määral igasuguses juhtmes; eriti tugev on ta poolides, sest nendes aheldub iga üksikut keerdu ümbritsev magnetväli peale sama keeru veel naabruses asuvate keerdudega. Raudsüdamik poolis suurendab veelgi selle endainduktsiooni oma suure magnetilise läbitavuse tõttu.



Joonis 9.21. Voolu *I*, magnetvälja *H* ja juhtmes indutseeritava endainduktsiooni elektromotoorse jõu *E* ajaline muutumine voolu tekkimisel.

Alalisvoolu sisselülitamise hetkel tekib kogu juhtme ümber magnetväli. Teatud aja vältel kulutatakse valdav osa vooluallikast saadavast energiast magnetvälja tekitamiseks ja ainult väike osa vooluringi takistuse ületamiseks (voolu tekitamiseks). Vool muutub püsivaks alles pärast magnetvälja kujunemist. Magnetvälja on aga sealjuures salvestunud teatav hulk energiat. Voolu sisselülitamisel tekkiva olukorra selgitamiseks kasutame graafikut joonisel 9.21. Rõhttelg väljendab aega. Ülemisel graafikul on kujutatud voolu aeglustuv kasv kuni suurima väärtuseni. Magnetvälja tugevus kasvab koos vooluga (keskmine graafik). Kui vool enam ei muutu, jääb ka väli püsivaks. Sisselülitamise hetkel indutseerub vooluringi läbivale voolule vastassuunaline endainduktsiooni elektromotoorne jõud (sageli nimetatakse seda *vastuelektromotoorseks jõuks*), mille suuruse pidev vähenemine võimaldab voolu tugevnemist.

Mingi juhtme või mähise endainduktsiooni suurust nimetatakse induktiivsuseks. *Induktiivsust* tähistatakse valemites tähega *L* ja ta avaldub voolu muutumisel tekkiva endainduktsiooni elektromotoorse jõu ja voolu muutumise kiiruse suhtena. Induktiivsuse mõõtmise

tehniline ühik on *henri* (lühend H, vene keeles *гн*). Juhtme või pooli induktiivsus on üks henri siis, kui voolu ühtlasel muutmisel kiirusega üks amper sekundis indutseerub poolis endainduktsiooni elektromotoorne jõud üks volt.

Väikeste induktiivsuste mõõtmisel kasutatakse ühikutena millihenrit (lühend mH; vene keeles *мгн*) ja mikrohenrit (μH; vene keeles *мкгн*). Sealjuures

$$1\ \text{H} = 1000\ \text{mH} = 1\,000\,000\ \mu\text{H},$$
$$1\ \text{mH} = 1000\ \mu\text{H} = 0{,}001\ \text{H},$$
$$1\ \mu\text{H} = 0{,}001\ \text{mH} = 0{,}000\,001\ \text{H}.$$

Vastastikust induktiivsust ehk *ühisinduktiivsust* (tähis *M*) mõõdetakse samuti henrides. Kahe vooluringi vastastikune induktiivsus on üks henri siis, kui voolu muutmine ühes vooluringis kiirusega üks amper sekundis tekitab teises ringis induktsiooni elektromotoorse jõu üks volt.

Kui suurt induktiivsust omavast vooluringist eemaldada vooluallikas, siis vool selles vooluringis ei katke silmapilkselt, vaid teatud ajavahemiku vältel, kuni juhet ümbritsev magnetväli on kadunud, s. o. kuni kogu magnetvälja salvestatud energia on kulunud voolu alalhoidmiseks.

Mitme järjestikku lülitatud pooli koguinduktiivsus võrdub üksikute induktiivsuste summaga, kuid ainult juhul, kui poolide magnetväljad üksteisele ei mõju, niisiis

$$L_j = L_1 + L_2 + L_3 + \ldots$$

Paralleelsete poolide koguinduktiivsus samal tingimusel

$$L_p = \frac{1}{\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \ldots}.$$

Kui kokkuühendatud induktsioonipoolide magnetväljad üksteist mõjutavad, siis kujuneb nende koguinduktiivsus vastastikuse induktsiooni nähte tõttu erinevaks eespool toodud valemitega määratavast suurusest.

Raadiotehnikas kasutatakse laiades piirides muudetava induktiivsusega lülituselemente — *variomeetreid*. Variomeetrid võivad olla ehitatud mitmeti, kuid alati koosnevad nad kahest või enamast järjestikusest poolist, millest üks on ülejäänute suhtes pööratav telje ümber, mis on risti poolide telgedega määratud tasapinnaga (joonis 14. 13). Vastavalt poolide omavahelisele asendile kujuneb nende ühine induktiivsus suuremaks või väiksemaks. Kui poolide keerdude suunad ühtivad, siis nende magnetväljad toetavad teineteist ja variomeetri induktiivsus kujuneb märksa suuremaks poolide induktiivsuste summast. Teisel juhul — kui keerdude suunad on vastupidised — mõjuvad poolide magnetväljad teineteisele vastu ja variomeetri induktiivsus kujuneb minimaalseks. Variomeetreid kasutatakse peamiselt raadiosaat-

jates ja mõõteseadmetes; tänapäeva raadiovastuvõtjates neid enam peaaegu ei kasutata.

Kui on tarvis valmistada induktiivsuseta mähist, siis keritakse traat bifilaarselt (joonis 9.22): kahekordselt nii, et kummaski traadis oleksid voolude suunad vastupidised. Vastupidiste ja võrdsete voolude tõttu tekkivad magnetväljad hävivad ja mähise induktiivsus kujuneb ligikaudu nulliks. Traattakistid keritakse sageli bifilaarmähisena.



Joonis 9.22. Bifilaarne induktiivsusvaene mähis.

Näide. Leida kahe paralleelselt ühendatud induktsioonipooli koguinduktiivsus (eeldusel, et poolid üksteisele magnetilist mõju ei avalda), kui poolide induktiivsused on $L_1 = 5$ H ja $L_2 = 5000$ mH.

Kasutades vastavat valemit, saame:

$$L_p = \frac{1}{\frac{1}{5} + \frac{1}{5}} = 2{,}5 \text{ henrit},$$

sest 5000 mH = 5 H. Seega on otsitav induktiivsus $L_p = 2{,}5$ henrit.

Olulisim

1. Magnetväli ümbritseb magnetilist keha ja avaldub teistele magnetilistele kehadele mõjuvate mehaaniliste jõududena.
2. Samanimelised magnetipoolused tõukavad teineteist, erinimelised magnetipoolused aga tõmbuvad teineteise poole.
3. Magnetvälja leppeline suund on väljaspool magnetit põhjapooluselt lõunapoolusele.
4. Magnetvälja asetatud mittemagneeditud ferromagnetiline aine muutub magnetilise induktsiooni tagajärjel magnetiliseks.
5. Pärast magneetimist jääb magnetilistesse ainetesse remanentsmagnetism (jääkmagnetism).
6. Juhet ümbritseb voolu olemasolul magnetväli, mille jõujooned asetuvad kontsentriliste ringidena juhtme ümber. Voolu suund juhtmes määrab magnetvälja suuna.
7. Magnetvälja asetatud juhtmele mõjub mehaaniline jõud, mis tekib voolu ümbritseva magnetvälja ja esialgse välja koosmõjul.
8. Kui juhe liigub magnetväljas selle suunda lõigates, siis tekib juhtmes elektromagnetilise induktsiooni tagajärjel elektromotoorne jõud ja kinnise vooluringi puhul ka vool. Vool kestab ainult elektromotoorse jõu olemasolul, s. o. juhtme liikumise vältel.
9. Kui elektrijuhti lõikab mõnda teist vooluringi läbiva muutuva voolu poolt esilekutsutud muutuv magnetväli, siis indutsee-

ritakse selles elektrijuhis elektromotoorne jõud ja kinnise vooluringi puhul ka vool. Seda nähtust nimetatakse vastastikuseks induktsiooniks.

10. Juhet läbivat muutuvat voolu ümbritsev magnetväli lõikab juhet ennast ja indutseerib selles endainduktsiooni elektromotoorse jõu, mis on alati vastassuunaline voolu muutustele juhtmes.

11. Induktiivsus L on juhtme endainduktsiooni suurus. Induktiivsuse mõõtühik on henri. Juhtme induktiivsus on üks henri siis, kui seda läbiva voolu tugevuse muutumine kiirusega üks amper sekundis kutsub esile endainduktsiooni elektromotoorse jõu üks volt.

Ülesanded

38. Leida kolme järjestikuse pooli koguinduktiivsus, kui nende induktiivsused on $L_1 = 5$ H, $L_2 = 1$ H ja $L_3 = 500$ mH ning nende magnetväljad omavahelist mõju ei avalda. (Vastus: $L_1 = 6{,}5$ H.)

39. Leida kolmest poolist koosneva lülituse koguinduktiivsus, kus kahe järjestikuse pooliga (induktiivsustega $L_1 = 1$ H ja $L_2 = 3$ H) on lülitatud paralleelselt kolmas pool (induktiivsusega $L_3 = 4$ H). (Vastus: $L = 2$ H.)

10. PEATÜKK

MAHTUVUS- JA INDUKTIIVTAKISTUS

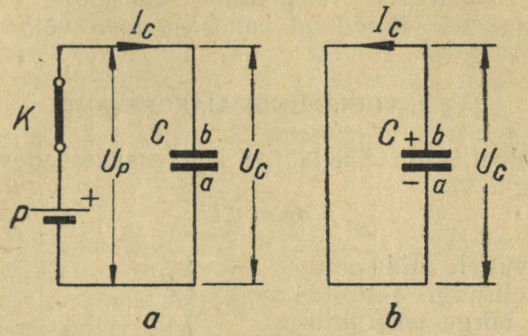
§ 1. MAHTUVUS ALALISVOOLURINGIS

Kui alalisvooluringi on järjestikku ühendatud kondensaator (joonis 10. 1-*a*), siis püsivat voolu selles ringis tekkida ei saa. Vooluringi sulgemisel lüliti K abil tekib hetkeline voolutõuge, millega teatud hulk elektrone [1] $Q = CU$ paikneb vooluallika P negatiivselt pooluselt sellega ühendatud plaadile a ja sama hulk elektrone liigub plaadilt b vooluallika positiivsele poolusele. Vool kestab seni, kuni pinge kondensaatori plaatide vahel U_c on saanud võrdseks vooluallika pingega U_p (kondensaator on siis laetud pingeni U_p). Laetud kondensaatorisse on salvestunud teatud hulk elektrienergiat; laadiva vooluallika kõrvaldamisel jääb plaatide vaheline pinge püsima. Kondensaatori plaatide omavahelisel kokkuühendamisel — lühistamisel — tekib ühendusjuhtmes vool: sama hulk elektrone Q, mis laadimisel ühelt plaadilt teisele paiknes, liigub nüüd esialgsele vastupidises suunas (joonis 10. 1-*b*) — negatiivselt plaadilt positiivsele. Koos sellega

[1] Ümberpaiknevate elektronide hulk Q väljendub selles valemis kulonites, kui kondensaatori mahtuvus C on antud faradites ja sellele mõjuv pinge U — voltides.

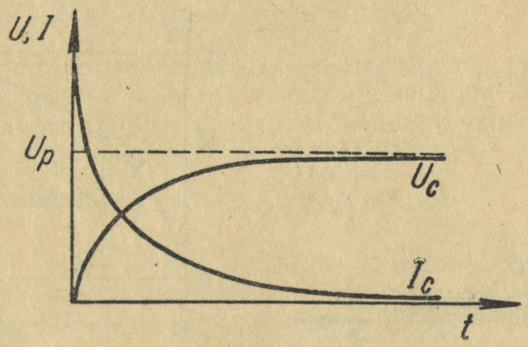
väheneb ka pinge U_C ja vool ühendusjuhtmes lakkab, kui see pinge muutub nulliks.

Joonisel 10.2 kujutatakse graafiliselt kondensaatori laadimisel tekkiva voolu ja kondensaatori plaatide vahelise pinge ajalist muutumist alates sisselülitamise hetkest. Ruumi kokkuhoidmiseks



Joonis 10.1. Kondensaatori laadimine (*a*) ja tühjendamine (*b*). Nooled tähistavad konventsionaalset voolusuunda.

on nii pinge U_C kui ka vool I_C kujutatud erinevate kõverate abil ühel ja samal teljestikul. Püstteljele tuleb siis muidugi märkida kahed ühikud — omaette nii pingele kui ka voolule.



Joonis 10.2 Kondensaatori laadimisvoolu I_C ja plaatide vahel ilmuva pinge U_C ajalise muutumise graafikud.

Graafikult näeme, et niipea kui kondensaatori ja vooluallika pinged on võrdsustunud, muutub laadimisvool nulliks. Alalisvoolule on kondensaator lõpmata suureks takistuseks. Alalisvooluringis, kuhu on paigutatud konden-

saator, võib tekkida vool vaid tõukeliselt igakordsel kondensaatori laadimisel ja tühjendamisel (lühistamisel). Püsivat alalisvoolu läbi kondensaatori tekkida ei saa. See on ka loomulik, sest kondensaator on vooluringis nagu katkestuskohaks — plaatide vahel on isoleeriv kiht ja mingit elektrit juhtivat ühendust kondensaatoris plaatide vahel pole. Ainult riknenud isolatsiooniga, nn. läbilöönud kondensaatorit võib läbida alalisvool.

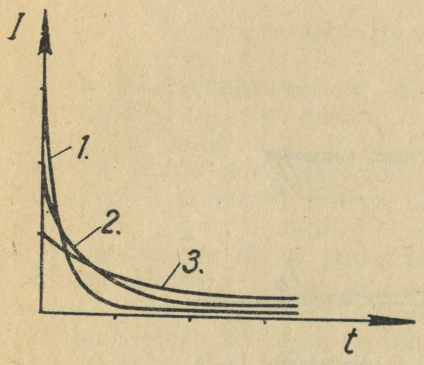
§ 2. VOOLURINGI AJAKONSTANT

Alalisvooluallikaga ühendatud kondensaator omandab maksimaalse laengu

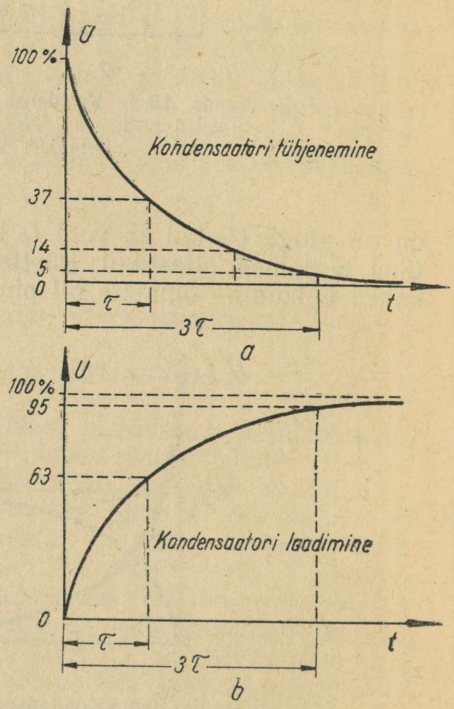
$$Q = CU$$

teatud aja vältel. Mida suurem on vooluringi aktiivtakistus, seda nõrgemaks kujuneb laadimisvool ja seda pikema ajavahemiku ta kestab (joonis 10. 3).

Samuti ei tühjene laetud kondensaator hetkeliselt. Mida suurem on kondensaatori tühjendamisringi aktiivtakistus, seda pikem ajavahemik on tarvilik laengute tasakaalustamiseks kondensaatori plaatidel.



Joonis 10. 3. Kondensaatori laadimisvoolu sõltuvus vooluringi takistusest. Kõver *1* vastab väikesele, *2* — keskmisele ja *3* — suurele takistusele.



Joonis 10. 4. Vooluringi ajakonstant kondensaatori tühjenemise ja laadimise graafikutel.

Raadiotehnikas kasutatakse *vooluringi ajakonstandi* mõistet.

Ajakonstant, mida valemites tähistatakse kreeka tähestiku märgiga τ («tau»), iseloomustab kondensaatori laadimis- ja tühjendamisaega sõltuvalt vooluringi aktiivtakistusest. Ajakonstant on sekundites mõõdetud aeg, mis on tarvilik selleks, et pinge või voolu hetkväärtus langeks mingilt algväärtuselt 37 protsendini (joonis 10. 4-*a*) [1]. Järgmise ajakonstandi pikkuse ajavahemiku lõpuks on pinge kahanenud jällegi 37 protsendini suurusest selle ajavahemiku alguses, seega umbes 14%-le algväärtusest jne. Kolme ajakonstandi pikkuse aja vältel kahaneb pinge tühjendataval kondensaatoril umbes 5 protsendini esialgsest suurusest.

Kondensaatorist ja takistist koosnevas vooluringis on ajakonstant sekundites

$$\tau = RC,$$

kus R on vooluringi kogutakistus oomides ja C — kondensaatori mahtuvus faradites; see seos on õige ka siis, kui R on antud megaoomides ja C — mikrofaradites.

Eeltoodud valemi teisendid:

$$C = \frac{\tau}{R} \text{ ja } R = \frac{\tau}{C}.$$

Kondensaatori laadimisprotsess kulgeb samalaadselt eelpoolkirjeldatud tühjenemisprotsessiga (joonis 10. 4-*b*).

Näide. Leida vooluringi ajakonstant, kui kondensaatorit mahtuvusega 1 μF laetakse 0,5 megaoomi suuruse takisti kaudu.

Ülaltoodud valemi põhjal

$$\tau = RC = 0{,}5 \cdot 1 = 0{,}5 \text{ sekundit.}$$

Näide. Leida sellise kondensaatori mahtuvus, mis järjestikku 1,5-megaoomise takistiga annab ajakonstandi 0,3 sek.

Kondensaatori mahtuvus avaldub sõltuvalt ajakonstandist ja vooluringi kogutakistusest järgmiselt:

$$C = \frac{\tau}{R} = \frac{0{,}3}{1{,}5} = \frac{3}{15} = 0{,}2 \ \mu\text{F}.$$

Samalaadselt mahtuvust ja takistust sisaldava vooluringiga kasutatakse ajakonstandi mõistet ka üleminekunähtuste iseloomustamiseks vooluringides, mis sisaldavad induktiivsust ja takistust. Kui mahtuvuse puhul ajakonstant iseloomustab p i n g e kasvu või kahanemist kondensaatoril, siis induktiivsuse puhul

---

[1] Suurus, milleni pinge või vool ühe ajakonstandi vältel langeb (37%), pole võetud juhuslikult, vaid omab füüsikalis-matemaatilise sisu. Matemaatikas kasutatakse naturaalsete logaritmide alust arvu e, mille arvuline väärtus $e \approx 2{,}7183$. Selle pöördväärtus on umbes 0,37 ehk 37%. Kondensaatori laadimis- ja tühjenemisvoolu ajaline muutumine on tihedas matemaatilises seoses arvuga e; siit selgubki suuruse 37% tähtsus ajakonstandi mõiste kindlaksmääramisel.

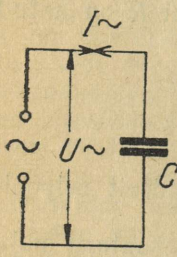
iseloomustab ajakonstant voolu kasvu või kahanemist poolis. Ajakonstant induktiivsust ja takistust sisaldavas vooluringis

$$\tau = \frac{L}{R},$$

kus τ avaldub sekundites, kui L on vooluringi induktiivsus henrides ja R — takistus oomides.

§ 3. MAHTUVUS VAHELDUVVOOLURINGIS; MAHTUVUSLIK REAKTIIVTAKISTUS

Eelnenust teame, et alalisvool kondensaatorit ei läbi. Põhiliselt erinev on olukord kondensaatori lülitamisel vahelduvvooluringi (joonis 10.5). Siin ei ilmne üksnes kondensaatori ühekordne laadimine voolu sisselülitamisel, vaid perioodiline laadimine, tühjenemine, vastassuunaline laadimine vahelduvvooluallika maksimaalse pingeamplituudini U_m ja tühjenemine, kui vooluringis pole teisi takistusi peale kondensaatori. Vooluallika pinge muutumise sageduse taktis võngub vooluringis elektrihulk



Joonis 10.5. Kondensaator vahelduvvooluringis.

$$Q = CU_m$$

edasi-tagasi. Kuigi selle juures sõna tõsises mõttes kondensaatorit vool ei läbi (elektronid ei pääse läbi plaatide vahelise dielektrikukihi!), esineb siiski vooluringis kondensaatori perioodilise laadimise ja tühjenemise tagajärjel tekkiv vahelduvvool.

Mahtuvust (kondensaatorit) sisaldavas vahelduvvooluringis oleneb vool kindla pinge puhul mahtuvuse suurusest ja vahelduvvoolu sagedusest. Seega võib öelda, et kondensaator avaldab vahelduvvoolule näiliselt takistust, mille suurus oleneb kondensaatori mahtuvusest ja vahelduvvoolu sagedusest. Seda takistust nimetatakse *mahtuvuslikuks reaktiivtakistuseks* (lühemalt: *mahtuvustakistuseks*).

Edaspidi kõneleme kondensaatorit läbivast vahelduvvoolust. Niisugust väljendust tuleb mõista tingimisi. Vahelduvvool esineb küll kondensaatoriga vooluringis, seega näib, et vool läbib ka kondensaatori plaatide vahelist dielektrikut.

Vaatleme kondensaatori mahtuvustakistuse sõltuvust mahtuvusest. Elektronide hulk Q, mis on vajalik kondensaatori laadimiseks kindla potentsiaalide vaheni U, on võrdeline kondensaatori mahtuvusega C. Mida suurem on kondensaatori mahtuvus, seda enam kuloneid elektrit mahutab see mingi kindla voltide arvu juures. Kui ühendame ühe ja sama vahelduvpingeallikaga mitmesuguse mahtuvusega kondensaatoreid, siis neid läbivad

vahelduvvoolud suhtuvad omavahel nagu vastavate mahtuvuste suurused. Suuremale voolule vastab võrdse pinge juures väiksem takistus; seega kondensaatori mahtuvustakistus ja mahtuvus on pöördvõrdelised suurused.

Kondensaatori mahtuvustakistus oleneb ka temale mõjuva vahelduvpinge sagedusest. Ühendame kindla mahtuvusega kondensaatori püsiva amplituudiga, kuid muudetava sagedusega vahelduvpinge allikaga. Sõltumata sagedusest pannakse kondensaatori laadimisel ja tühjendamisel igal poolperioodil liikuma kindel elektrihulk Q, mis vastab pinge maksimaalväärtusele (amplituudile) U_m ja mahtuvusele C. Nimelt laeb kondensaator ennast vahelduvpinge iga poolperioodi alguses pinge maksimaalväärtuseni, mis ka alati tähendab ühe ja sama elektrihulga salvestumist. Siinjuures jääb igaks üksikuks laadimiseks ja tühjendamiseks seda vähem aega, mida suurem on vahelduvpinge sagedus. Kahekordse sageduse juures liigub seesama maksimaalpingest ja mahtuvusest sõltuv elektrihulk Q vooluringis kahekordse kiirusega jne. See on aga samaväärne voolu kahekordistumisega. Niisiis ka kondensaatori mahtuvustakistus ja vahelduvvoolu sagedus on pöördvõrdelised suurused.

Toodud arutelu kohaselt kujuneb kondensaatori mahtuvustakistuse X_1 määramise valem järgmiseks:

$$X_{C(\Omega)} = \frac{1}{2\pi f_{(\mathrm{Hz})} C_{(\mathrm{F})}} = \frac{1}{6{,}28 f_{(\mathrm{Hz})} C_{(\mathrm{F})}} = \frac{0{,}159}{f_{(\mathrm{Hz})} C_{(\mathrm{F})}}.$$

Muutumatu tegur $2\pi \approx 6{,}28$ on vajalik mõõtühikute sobitamiseks.

Valemis esinevat suurust $2\pi f$ nimetatakse sageli *ringsageduseks* ja tähistatakse kreeka tähestiku märgiga ω (väike «omega»):

$$\omega = 2\pi f.$$

Praktiliseks kasutamiseks sobib paremini kondensaatori mahtuvustakistuse valemi teisend:

$$X_C = \frac{159\,000}{fC},$$

kus X_C on oomides, f — hertsides ja C — mikrofaradites.

Näide. Leida 36-mikrofaradise kondensaatori mahtuvustakistus sagedusel 50 Hz ja vool tema lülitamisel 220-V valgustusvõrku.

Ülalesitatud valemi kohaselt on kondensaatori mahtuvustakistus antud juhul

$$X_C = \frac{159\,000}{50 \cdot 36} = 88 \text{ oomi}.$$

Vool kondensaatori vooluringis 220-voldise pinge ja 50-hertsise

sageduse puhul avaldub (eeldusel, et teisi takistusi voolu-ringis pole) pinge ja reaktiivtakistuse jagatisena:

$$I = \frac{U}{X_C} = \frac{220}{88} = 2{,}5 \text{ amprit.}$$

Otstarbekas on meeles pidada, et ühemikrofaradise mahtuvusega kondensaatori mahtuvustakistus 50-hertsise voolusageduse juures on umbes 3200 oomi. Loomulikult on kahemikrofaradise kondensaatori mahtuvustakistus sama sagedusega voolule kaks korda väiksem, seega 1600 oomi (üleliidulise standardi kohaselt on vahelduvvoolu-valgustusvõrkudes sagedus alati 50 hertsi).

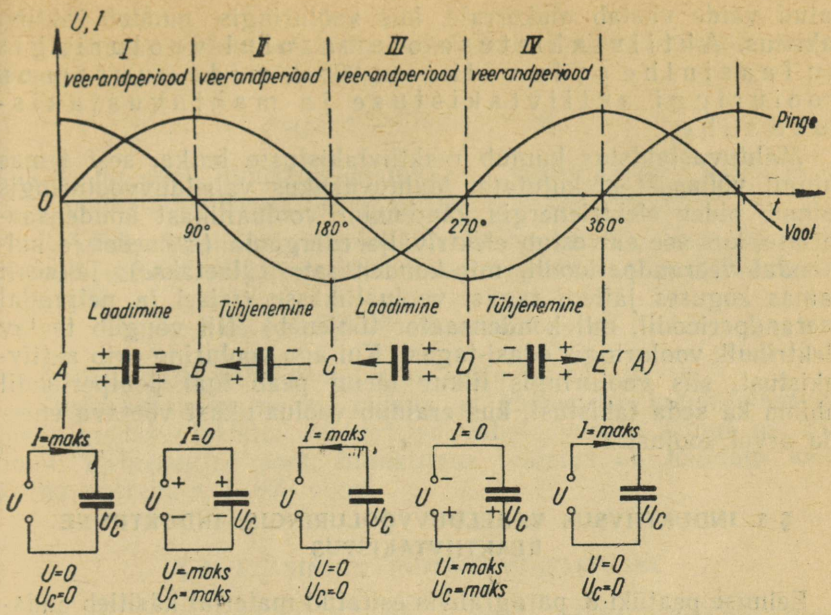
§ 4. FAASINIHE MAHTUVUSTAKISTUSEL

Vaatleme vahelduvvooluringi lülitatud kondensaatori plaatide vahelise pinge U_C ja kondensaatorit läbiva voolu I muutumise omavahelist seost. Voolu tugevus mingil hetkel sõltub kondensaatorile rakendatud pinge muutumise kiirusest. Mida kiiremini pinge muutub, seda suurem elektrihulk peab selle aja jooksul ümber paiknema ja seega seda tugevam on vool.

Esimesel veerandperioodil suureneb kondensaatorile mõjuv vahelduvpinge ja kondensaator laadub. Vooluringis voolab laadimisvool, mille tugevus on veerandperioodi alguses suurem kui lõpul, sest alguses on pinge kasvamise kiirus suurem. Veerandperioodi lõpul saab kondensaator täiesti laetuks, plaatide vahelise pinge muutumise kiirus läheneb nullile ja laadimisvool lakkab. See moment saabub siis, kui pinge enam ei tõuse (vt. joonisel 10.6 tähis *B*), s. t. esimese veerandperioodi lõpul.

Seejärel hakkab vahelduvpinge kahanema, kuni ta teise veerandperioodi lõpuks muutub nulliks. Kuna vooluallika pinge hetkväärtusest oleneb kondensaatori laengu suurus mingil hetkel, siis koos vahelduvpinge vähenemisega laengu suurus väheneb ja vooluringis ilmub kondensaatori tühjenemise tagajärjel vool. Teise veerandperioodi alguses langeb pinge aeglaselt, lõpul aga palju kiiremini; nii ka tühjenemisvool üha tugevneb. Kui pinge selle veerandperioodi lõpuks on nulliks muutunud, siis vool on maksimaalne (joonisel tähis *C*).

Kolmanda veerandperioodi alguses pinge muudab suunda ja alustab taas kasvamist. Selle tagajärjel laetakse kondensaatorit uuesti, kuid eelmisele vastupidises suunas. Selle veerandperioodi alguses on laadimisvool jällegi suur, sest siis puudub taas kondensaatoril laeng ja pinge muutumise kiirus on suur. Analoogiliselt olukorraga esimesel veerandperioodil kahaneb laadimisvool pidevalt seoses pinge tõusmise kiiruse vähenemisega. Kolmanda veerandperioodi lõpul (joonisel tähis *D*) on pinge saavutanud maksimaalse kõrguse negatiivses suunas ja vool puudub.



Joonis 10. 6. Voolu ja pinge ajaline muutumine vahelduvvooluringi lülitatud kondensaatori puhul.

Neljandal veerandperioodil hakkab pinge kahanema, sellega koos väheneb kondensaatori laeng — tekib tühjenemisvool, mis veerandperioodi lõpuks (joonisel tähis *E*) omandab maksimaalse väärtuse.

Viiendal veerandperioodil on voolu ja pinge muutumise käik täielikult analoogiline esimese veerandperioodi olukorraga. Nii kordub see nelja veerandperioodi (ühe perioodi) pikkune tsükkel perioodiliselt vahelduvpinge sagedusega määratud arv kordi sekundis.

Graafikult näeme, et kondensaatorile rakendatud pinge on positiivse suunaga esimesel ja teisel ning negatiivse suunaga kolmandal ja neljandal veerandperioodil. Kondensaatori laadimis- ja tühjenemisvool on positiivse suunaga neljandal ja viiendal (s. t. esimesel) ning negatiivse suunaga teisel ja kolmandal veerandperioodil.

Vahelduvpingeallikaga ühendatud kondensaatorit läbiv vool püsib oma muutumise käigus pingest veerandperioodi võrra ees; faasinihe voolu ja pinge vahel on mahtuvustakistusel faasinurga kaudu väljendatult 90°.[1] Esi-

[1] Täisperiood jagatakse 360 faasikraadiks. 90° vastab siis veerandperioodile, 180° — poolperioodile jne. Faasinihke suurust kraadides tähistame kreeka tähestiku märgiga φ (väike «fii»).

tatud väide vastab olukorrale, kus vooluringis puudub aktiivtakistus. Aktiivtakistuse olemasolul vooluringis on faasinihe seda väiksem 90°-st, mida suurem on vooluringi aktiivtakistuse ja mahtuvustakistuse suhe.

Mahtuvustakistus kuulub reaktiivtakistuste hulka, sest temas mingit võimsust ei kulutata. Mahtuvuslikus vahelduvvooluringis toimub pidev elektrienergia kandumine vooluallikast kondensaatorisse, kus see salvestub elektrivälja energiana (esimesel ja kolmandal veerandperioodil, mil kondensaatorit laetakse), ja sealt samas koguses jällegi tagasi vooluallikasse (teisel ja neljandal veerandperioodil, mil kondensaator tühjeneb). Nii võngub teatav elektrihulk vooluringis edasi-tagasi. Kui aga vooluring evib aktiivtakistust, siis vooluringis liikuv laeng peab igal poolperioodil läbima ka seda takistust, kus eraldub vooluallikast võetava energia arvel soojust.

§ 5. INDUKTIIVSUS VAHELDUVVOOLURINGIS; INDUKTIIVNE REAKTIIVTAKISTUS

Eelmise peatüki 8. paragrahvis esitatud materjal käsitleb endainduktsioonipoolis indutseeruva elektromotoorse jõu takistavat mõju pooli läbiva voolu igasugusele muutmisele. Endainduktsiooninähtusest tingituna avaldab igasugune induktiivsust omav mähis (ja vähemal määral ka iga voolujuhe) teda läbivale muutuva tugevusega voolule, eeskätt muidugi vahelduvvoolule, *induktiivset reaktiivtakistust* ehk *induktiivtakistust.*

Oletame, et ühendame vahelduvvooluallika klemmide vahele endainduktsioonipooli, mille mähisel puudub aktiivtakistus. Pooli läbiva vahelduvvoolu tugevusest ja suunast sõltub pooli magnetvälja tugevuse hetkeline suurus ja suund. Magnetvälja muutused indutseerivad mähisesse pidevalt vahelduva suunaga vastuelektromotoorse jõu, mis on alati vastupidine vooluallika elektromotoorsele jõule. Mida ulatuslikumalt saab magnetväli mõjuda poolile, s. o. mida suurem on mähise induktiivsus, seda nõrgemaks kujuneb muude samade tingimuste juures vahelduvvool poolis. Pooli induktiivtakistus ja induktiivsus on võrdelised suurused.

Pooli induktiivsus määrab sellele rakendatud kindla suurusega vahelduvpinge puhul voolu kasvamis- ja kahanemiskiiruse. Mida suurem on pooli läbiva vahelduvvoolu sagedus kindla pinge juures, seda lühemate ajavahemike jooksul saab vool igakordselt kasvada ja kahaneda ning seda väiksemaks jääb voolu amplituud. Voolu vähenemine püsiva pinge juures näitab takistuse suurenemist. Induktiivtakistus on võrdeline vahelduvvoolu sagedusega.

Niisiis on induktiivtakistus võrdeline nii vahelduvvoolu sagedusega kui ka induktiivsusega:

$$X_{L(\Omega)} = 2\pi f_{(Hz)} L_{(H)} = \omega L,$$

kus X_L on pooli induktiivtakistus, f — vahelduvvoolu sagedus ja L — pooli induktiivsus. Ringsagedus $\omega = 2\pi f = 6{,}28f$.

Näide. Pooli induktiivsus on 30 henrit. Kui suur on selle pooli induktiivtakistus 50-hertsise sagedusega vahelduvvoolu puhul?

$$X_L = 6{,}28 \cdot 50 \cdot 30 = 9400 \text{ oomi.}$$

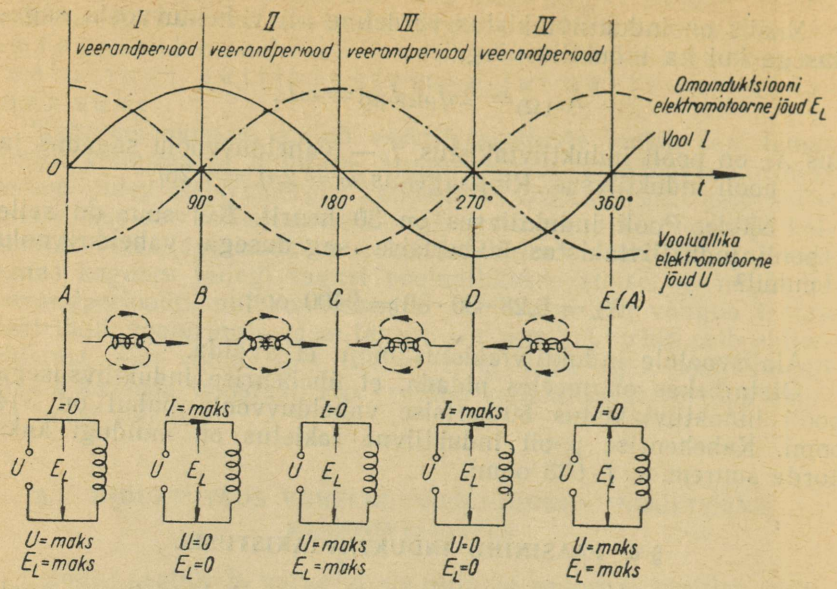
Alalisvoolule induktiivtakistus mõju ei avalda.

Otstarbekas on meeles pidada, et ühehenrise induktiivsusega pooli induktiivtakistus 50-hertsise vahelduvvoolu puhul on 314 oomi. Kahehenrise pooli induktiivne takistus on muidugi kaks korda suurem, s. t. 628 oomi.

§ 6. FAASINIHE INDUKTIIVTAKISTUSEL

Vaatleme induktsioonipoolile mõjuva vahelduvpinge, pooli läbiva voolu ja teda ümbritseva magnetvälja tugevuse ajalist kulgu. Kui lülitada pool vahelduvvooluallika poolustega selle pinge maksimaalamplituudi hetkel (joonisel 10. 7 tähis *A*), siis kasvab vool ja magnetväli esimesel veerandperioodil kiiresti. Kuid vool ei saavuta silmapilkselt oma maksimaalset amplituudi, sest tugevneva voolu tõttu indutseerub mähises vastuelektromotoorne jõud, mis takistab voolu tugevnemist. Kooskõlas pinge vähenemisega aeglustub voolu ja magnetvälja kasv ning väheneb endainduktsiooni elektromotoorne jõud, sest viimane oleneb ainult voolu muutumise k i i r u s e s t. Hetkel, mil pinge on muutunud nulliks (joonisel tähis *B*), on vool ja magnetväli maksimaalsed ning vastuelektromotoorne jõud puudub. Magnetvälja on seejuures salvestunud teatud hulk energiat. Nüüd hakkab mõjuma teise veerandperioodi ulatuses kasvav vastassuunaline pinge, mis sunnib poolis veel esialgses suunas voolavat voolu nõrgenema. Kuid seegi voolu muutus tekitab endainduktsiooni elektromotoorse jõu, mis nüüd püüab hoida voolu püsivana. Teise veerandperioodi ulatuses vabaneb esimese veerandperioodi jooksul magnetvälja salvestatud energia taas elektrivoolu energiana. Vool kahaneb nullini siis, kui pinge on tõusnud maksimaalväärtuseni (joonisel tähis *C*). Teise veerandperioodi lõpul on voolu muutumise kiirus maksimaalne, mistõttu indutseerub maksimaalse suurusega vastuelektromotoorne jõud.

Kolmandal veerandperioodil korduvad esimese ja neljandal — teise veerandperioodi olukorrad samas järjestuses, kuid vastassuunalistena (voolu, magnetvälja ja pingete suunad teisel



Joonis 10.7. Voolu ja pinge muutumine vahelduvvooluringi lülitatud induktsioonipooli puhul.

poolperioodil on vastupidised, võrreldes vastavate suurustega esimesest poolperioodist).

Kerge on märgata, et induktiivtakistusele mõjuva vahelduvpinge ja teda läbiva vahelduvvoolu vahel on veerandperioodine faasinihe (voolu- ja pingefaaside vaheline nihkenurk $\varphi = 90°$).

Induktiivsel reaktiivtakistusel on pinge muutumise kulg voolust 90° ees (eeldusel, et vooluringis pole aktiivtakistusi).

Niisiis mõjub induktiivsus faasinihke põhjustajana vastupidiselt mahtuvusele. Mahtuvusel on vahelduvvooluringis vool pingest 90° ees; induktiivsusel aga vastupidi — vool pingest 90° järel.

§ 7. AKTIIV- JA REAKTIIVTAKISTUS

Vahelduvvoolu voolamisel läbi aktiivtakistust omava takisti muutub vooluallikast saadud teatav energiahulk takistusel soojuseks. Kuna aktiivtakistusega vahelduvvooluringis voolu- ja pingefaaside vahel nihet pole, võime sellel vabaneva võimsuse avaldada alalisvoolu teooriast tuntud valemite abil:

$$P = UI,\ P = I^2R \text{ või } P = \frac{U^2}{R}.$$

Siin on pinge ja vool mõõdetud efektiivväärtustes ja põhiühikutes (volt, amper) ning takistus oomides. Seoses vahelduvvoolu ja -pinge hetkväärtuste pideva muutumisega pole ka vahelduvvoolu võimsus ajaliselt püsiv suurus. Valem annab vahelduvvoolu tegeliku võimsuse keskmise väärtuse vattides.

Mahtuvust või induktiivsust sisaldavas vooluringis salvestub kondensaatori elektrivälja või pooli magnetvälja tugevnemisel sellesse teatav hulk elektrienergiat, mis saadakse vooluallikast. Täpselt sama energiahulk vabaneb kondensaatoris või poolis väljatugevuse nõrgenemisel ja antakse vooluallikasse tagasi taas elektrienergiana. Niiviisi ei vabane vahelduvvooluringis mahtuvus- ja induktiivtakistusel võimsust ei soojusena ega mingi muu energialiigina. Vooluringis kulgeb küll vahelduvvool, kuid see kannab mingit energiahulka perioodiliselt vooluallikast elektri- või magnetvälja ja sellest jälle tagasi vooluallikasse. Selle vahelduvvoolu ja pinge efektiivväärtuste korrutis annab nn. *reaktiivvõimsuse* antud mahtuvus- või induktiivtakistusega vooluringis. Reaktiivvõimsust mõõdetakse reaktiivsetes voltamprites (VAr), erinevalt vattides mõõdetavast tegelikust võimsusest — *aktiivvõimsusest* (võimsusest, mis sooritab tööd).

Kokkuvõttes: kõik takistused, millel kulub vahelduvvoolu võimsust soojuse, valguse või keemilise energia eraldamiseks, kuuluvad *aktiiv-* (*tegev-*) *takistuste* liiki — nad kasutavad vooluallikast saadavat energiat aktiivselt (elektrienergia muundub nendes soojusenergiaks või ka valguseks). Aktiivtakistusele on vastandiks *reaktiiv-* (*eba-*) *takistus*. Reaktiivtakistust omavasse seadmesse juhitud vahelduvvoolu energia väljub sealt taas elektrienergiana, mis suundub vooluallikasse tagasi.

Aktiivtakistust avaldavad kõik takistid, kus pinge- ja voolufaaside vaheline nihe puudub ($\varphi = 0°$). Induktsioonipoolid ja kondensaatorid, millede lülitamisel vahelduvvooluringi ilmub veerandperioodine faasinihe pinge ja voolu vahel ($\varphi = 90°$), avaldavad reaktiivtakistust.

§ 8. AKTIIV- JA REAKTIIVTAKISTUS VAHELDUVVOOLURINGIS

Pingelang aktiivtakistil R avaldub valemist:

$$U_{R(V)} = I_{(A)} R_{(\Omega)},$$

kusjuures vahelduvvoolu korral ei tohi vooluringis olla ühtki reaktiivtakistust, mis tekitaks faasinihke[1]. Esitatud valem on kasutatav pinge (või voolu) efektiiv- kui ka amplituudväärtuste arvutamisel.

Ainult mahtuvustakistust omavas vooluringis avaldub pingelang voolu ja mahtuvustakistuse korrutisena:

[1] Viimane väide ei pea alati paika resonantsinähete puhul. Elektrilist resonantsi käsitletakse õpiku II osas.

$$U_C = IX_C = I\frac{1}{\omega C} = \frac{I}{\omega C} = \frac{I}{2\pi fC}$$

ja puht-induktiivses vooluringis:

$$U_L = IX_L = I \cdot \omega L = I \cdot 2\pi fL.$$

Needki valemid võimaldavad leida pinge (või voolu) efektiiv- kui ka amplituudväärtusi, kuid nad pole kasutatavad pinge või voolu hetkväärtuste arvutamisel, sest nii mahtuvuslikus kui ka induktiivses vooluringis on voolu ja pinge faasid teineteise suhtes nihutatud.

Vahelduvvooluringi järjestikku lülitatud aktiiv- ja reaktiivtakistuse kogutakistus — *näivtakistus* ehk *impedants* — ei avaldu nende lihtsa summana. Eelnenu põhjal on teada, et ainult reaktiivtakistusi omavas vahelduvvooluringis on voolu- ja pingefaaside vahel nihe 90° ja ainult aktiivseid takistusi omavas — 0°. Järjestikku ühendatud aktiiv- ja reaktiivtakistusega vooluringi näivtakistus pole täiuslik aktiivtakistus ega ka reaktiivtakistus. Terve vooluringi ulatuses pole siis voolu- ja pingefaaside nihe 0° ega 90°, vaid mingi vahepealne suurus. Kui vooluringis on ülekaalus reaktiivtakistus, siis on faasinihe suurem (arvuliselt lähemal 90°-le); on aga aktiivtakistus võrreldes reaktiivtakistusega suur, siis on faasinihe väiksem (lähemal 0°-le). Matemaatiline arutelu, mida siin ei esitata, näitab, et faasinihke olemasolu tõttu kujuneb vooluringi näivtakistuse suurus aktiiv- ja reaktiivtakistuse geomeetriliseks summaks [1].

Kui induktiivtakistus suurusega X_L on lülitatud vahelduvvooluringis järjestikku aktiivtakistusega, mille suurus on R, siis nende näivtakistus Z avaldub valemist:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2},$$

milles kõik takistused (kaasa arvatud näivtakistus) on oomides.

Järjestikku lülitatud mahtuvus- ja aktiivtakistuse kogutakistuse leidmine on võimalik samasuguse valemi abil:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{2\pi fC}\right)^2}.$$

Praktiliseks tarviduseks küllaldase täpsusega saab järjestikuse aktiiv- ja reaktiivtakistuse impedantsi leida joonestuslikul (graafilisel) meetodil. Siin kasutatakse geomeetriast tuntud tõsiasja,

[1] Kahe arvu a ja b geomeetriline summa c on ruutjuur nende ruutude summast: $c = \sqrt{a^2 + b^2}$. Nii on arvude 3 ja 4 geomeetriline summa

$$c = \sqrt{3^2 + 4^2} = \sqrt{9 + 16} = \sqrt{25} = 5.$$

Samas aga nende aritmeetiline summa on $3 + 4 = 7$. Kahe täisarvu geomeetriline summa on alati väiksem nende arvude aritmeetilisest summast.

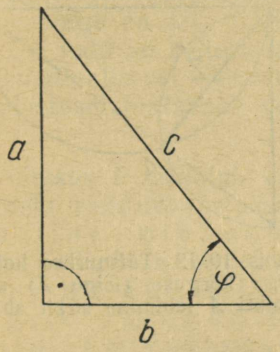
et täisnurkse kolmnurga (joonis 10. 8) hüpotenuusi pikkuse (c) ruut on võrdne kaatetite pikkuste (a ja b) ruutude summaga:

$$c^2 = a^2 + b^2,$$

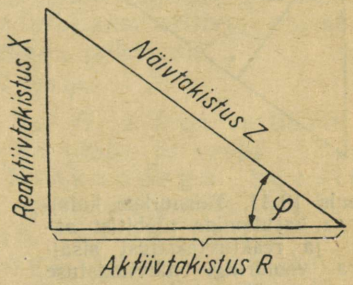
ehk

$$c = \sqrt{a^2 + b^2}.$$

Kui joonestada täisnurkne kolmnurk, mille ühele kaatetile anda mingis mõõtkavas reaktiivtakistuse suurusele vastav pikkus (näiteks ühele sentimeetrile vastab üks kilo-oom) ja teisele kaatetile kanda aktiivtakistuse suurusele samas mõõtkavas vastav pikkus, siis hüpotenuusi pikkus selles kolmnurgas annab samas mõõtkavas nende näivtakistuse suuruse järjestikku-lülituse kor-



Joonis 10. 8. Täisnurkse kolmnurga hüpotenuusi c ruut võrdub kaatetite a ja b ruutude summaga.



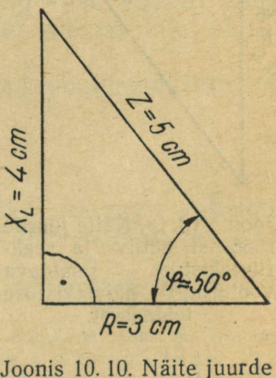
Joonis 10. 9. Täisnurkse kolmnurga kasutamine järjestikust aktiiv- ja reaktiivtakistust sisaldava vooluringi näivtakistuse määramiseks.

ral. Veelgi enam: nurk φ aktiivtakistust väljendava kaateti ja hüpotenuusi vahel on võrdne vooluringis voolava voolu ja sellele mõjuva pinge faaside vahelise nihkenurgaga (joonis 10. 9).

Näide. Leida arvutuse teel ja graafiliselt järjestikuse vooluringi näivtakistus Z, kui aktiivtakistus $R = 1500\ \Omega$ ja reaktiivtakistus $X_L = 2000\ \Omega$. Arvutades valemi $Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$ abil saame, et

$$Z = \sqrt{1500^2 + 2000^2} = 2500\ \Omega.$$

Sama ülesanne lahendub graafiliselt (joonis 10. 10): Võtame mõõtkava 1 kΩ = 2 cm. Siis saame täisnurkse

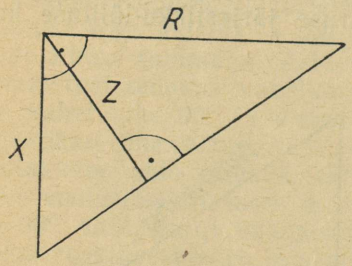


Joonis 10. 10. Näite juurde vooluringi näivtakistuse määramisest.

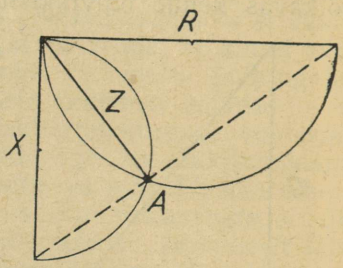
kolmnurga kaatetitega $R = 3$ cm ja $X_L = 4$ cm. Mõõtmisel saame hüpotenuusi pikkuseks 5 cm, mis valitud mõõtkava põhjal vastab 2500 oomile. Seega saime ka graafilise meetodiga otsitavaks suuruseks $Z = 2500$ Ω. Faasinihke nurk on joonise järgi pisut suurem kui 50°.

Paralleellülituses aktiiv- ja reaktiivtakistuse kogutakistust saab määrata valemiga:

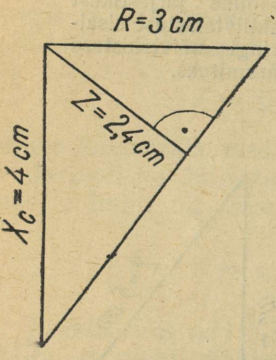
$$Z = \frac{RX}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$



Joonis 10. 11. Täisnurkse kolmnurga kasutamine rööbitist aktiiv- ja reaktiivtakistust sisaldava vooluringi näivtakistuse määramiseks.



Joonis 10. 12. Täisnurkse kolmnurga kõrguse (lõigu Z) otspunkti A leidmine sirkli abil.



Joonis 10. 13. Näite juurde rööbitist aktiiv- ja reaktiivtakistust sisaldava vooluringi näivtakistuse leidmisest.

või graafiliselt täisnurkse kolmnurga abil. Viimasel juhul tuleb ehitada täisnurkne kolmnurk, mille kaatetid väljendavad võrdses mõõtkavas aktiivtakistuse ja reaktiivtakistuse suurusi. Kolmnurga kõrgus (hüpotenuusile tõmmatud ristlõik, mis läbib tippu) väljendab samas mõõtkavas paralleelselt lülitatud aktiiv- ja reaktiivtakistuse impedantsi (joonis 10. 11). Joonestamise hõlbustamiseks võib kasutada lihtsat meetodit: kui kaatetitele joonestada poolringid nii, et kummagi kaateti keskpunkt osutuks vastava ringjoone keskpunktiks ja kaatet sealjuures oleks ringi läbimõõduks, siis kummagi ringjoone lõikepunkt (A) on näivtakistust väljendava lõigu üheks otspunktiks (joonis 10. 12).

Näide. Määrata arvutuse teel ja graafiliselt vooluringi näivtakistus, kui see koosneb 1500-oomisest aktiiv- ja 2000-oomisest reaktiivtakistusest paralleellülituses.

Arvutades valemi

$$Z = \frac{RX}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$

abil saame, et

$$Z = \frac{1{,}5 \cdot 2{,}0}{\sqrt{2{,}25 + 4}} = \frac{3}{\sqrt{6{,}25}} = \frac{3}{2{,}5} = 1{,}2 \text{ k}\Omega.$$

Graafiliselt laheneb sama ülesanne vastavalt joonisele 10. 13. Võtame mõõtkava 1 kΩ = 2 cm. Siis saame täisnurkse kolmnurga kaatetitega $R = 3$ cm ja $X = 4$ cm. Selle kolmnurga kõrguseks osutub $Z = 2{,}4$ cm, mis antud mõõtkava juures vastab 1,2 kilooomile.

Aktiiv- ja reaktiivtakistust omavas vooluringis vooluallikast (mille pinge on U) võetava tegeliku võimsuse suurus pole $P = UI$, vaid on sellest väiksem. Tegelik võimsus, mis niisugusel juhul vooluallikast võetakse ja mis tarbitakse aktiivtakistusel (reaktiivtakistusel teatavasti võimsusekadu pole!) on

$$P = UI \cos \varphi.$$

Võimsus P avaldub vattides, kui U ja I on vastavalt pinge ja voolu efektiivväärtused ja φ on pinge ja voolu faaside vaheline nihkenurk[1]. Nihkenurga koosinust nimetatakse *vahelduvvoolu võimsusteguriks*. Võimsustegur on arv, mis näitab, kui suure osa vooluringile rakendatud pinge ja selles kulgeva voolu korrutisest moodustab vooluallikast võetav ja aktiivtakistustel tarbitav võimsus.

Kui vooluringis on ainult aktiivtakistus, siis faasinihet pole, $\varphi = 0$ ja $\cos \varphi = \cos 0° = 1$. Võimsuse valem omandab siis tuntud kuju

$$P = UI.$$

Kui vooluringis oleks ainult reaktiivtakistus, siis faasinihe on muidugi 90° ja võimsustegur $\cos \varphi = \cos 90° = 0$. Valemi põhjal on võimsus siis vaatamata pinge ja voolu olemasolule alati 0 (vooluallikast mingit võimsust ei võeta).

Võimsusteguri arvutamiseks tuleb antud vooluringi aktiivtakistuse suurus jagada näivtakistusega:

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

Näide. Elektrimootor, mis töötab 220-V pingega vahelduvvooluvõrgus, tarbib 5 A tugevust voolu. Leida mootori poolt tar-

[1] Igale nurgale φ vastab oma kindel koosinuse väärtus, cos φ. Õpiku lõpus on toodud väike koosinuste tabel.

Täisnurkse kolmnurga mingi teravnurga φ koosinus cos φ on selle nurga lähiskaateti pikkuse b ja hüpotenuusi pikkuse c suhe (vt. joonis 10. 8):

$$\cos \varphi = \frac{b}{c}.$$

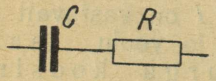
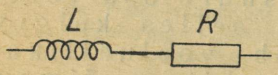
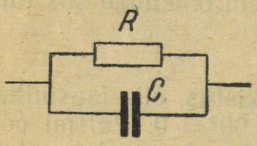
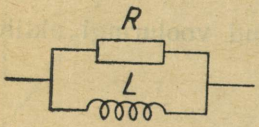
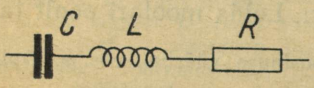
bitav võimsus, kui pinge- ja voolufaaside nihkenurga koosinus, s. o. võimsustegur $\cos\varphi = 0{,}8$ (mootor kujutab elektrilises mõttes järjestikku lülitatud aktiiv- ja induktiivset reaktiivtakistust).

$$P = UI\cos\varphi = 220 \cdot 5 \cdot 0{,}8 = 880 \text{ W}.$$

Aktiiv- ja reaktiivtakistuste mitmesuguste lülituste näivtakistuse Z leidmiseks kasutatavad valemid on koondatud tabelisse 6. Kõikides esitatavates valemites tuleb kasutada põhiühikuid: kõik mahtuvuslikud, induktiivsed ja oomilised takistused on mõõdetud oomides ja sagedused hertsides. Ühtlasi tuleb silmas pidada, et $X_L = \omega L$, $X_C = \frac{1}{\omega C}$ ja $\omega = 2\pi f = 6{,}28f$.

Tabel 6

Reaktiivsete vooluringide näivtakistusi

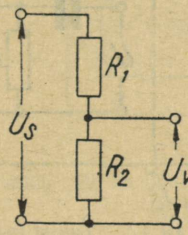
Lülitus	Näivtakistus
	$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$
	$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$
	$Z = \frac{RX_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}}$
	$Z = \frac{RX_L}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$
	$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$

Lõpuks tuleb rõhutada induktiivse ja mahtuvusliku reaktiivtakistuse täiesti vastandlikku iseloomu, mis ilmneb nende koos-

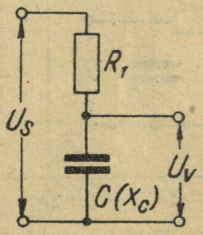
mõjul ühises vooluringis. Kummalgi neist tekib faasinihe pinge ja voolu vahel, kuid kondensaatoril on pinge voolust järel ja induktsioonipoolil voolust ees. See põhjustab nn. resonantsinähte ilmumise, mida vaadeldakse hiljem. Samal põhjusel tuleb eelnenud tabelis toodud viimase lülituse näivtakistuse määramisel ruutjuure-aluses avaldises kasutada induktiivse ja mahtuvusliku reaktiivtakistuse v a h e t, mitte nende s u m m a t.

§ 9. FILTERLÜLITUSED

Lihtsamad filterlülitused kujutavad pingejagajaid, mis sisaldavad aktiivtakistuse kõrval ka induktiiv- või mahtuvustakistust. Üldiselt iseloomustab niisuguseid lülitusi tarbijale antava pinge (filterlülituse *väljandpinge*) ja vooluallika pinge (filterlülituse *sisendpinge*) suhte sõltuvus sagedusest.



Joonis 10. 14. Aktiivtakistustest koostatud pingejagaja-lülituse väljandpinge U_v ei sõltu vahelduvvoolu sagedusest.



Joonis 10. 15. Takistist ja kondensaatorist koostatud pingejagajalülituse väljandpinge sõltub vahelduvvoolu sagedusest.

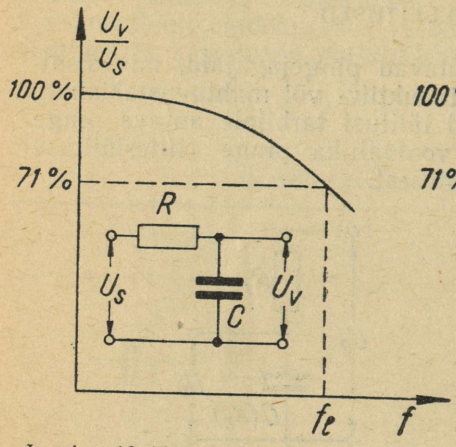
Tavalise, aktiivtakisteid sisaldava pingejagaja (joonis 10. 14) väljandpinge U_v on vooluga mittekoormamisel sisendpingest U_s väiksem takistuste suhte $R_1 : (R_1 + R_2)$ võrra. See suhe jääb kehtima ka vahelduvvoolu puhul ning ei olene sagedusest.

Kui aga moodustada pingejagaja aktiiv- ja reaktiivtakistusest, siis sõltub väljandpinge ka sagedusest. Niisuguseid lülitusi nimetatakse *filterlülitusteks,* sest nende abil on võimalik liitvooludest eraldada soovitud komponente (pulseerivvoolust alalis- ja vahelduvkomponenti, üksikuid voole mitmest erineva sagedusega vahelduvvoolust koosnevast liitvoolust).

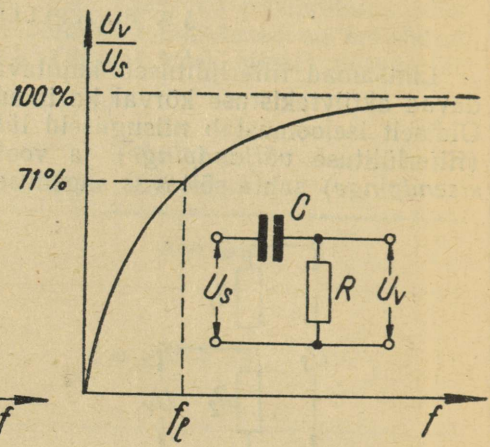
Takistist R ja kondensaatorist C (reaktiivtakistusest X_C) moodustatud mittekoormatud pingejagaja (joonis 10. 15) väljandpinge on seda madalam, mida kõrgem on sagedus, sest kondensaatori mahtuvustakistus väheneb sageduse tõusmisel viimasega pöörd-

võrdeliselt. Koos mahtuvustakistuse muutumisega muutub muidugi ka pingete jagunemine ja osapinge kondensaatoril, mis on selle filterlülituse väljandpingeks.

Kui taolisele filterlülitusele mõjub liitpinge, mis koosneb mitmest erineva sagedusega vahelduvpingest (näiteks helisagedus-pinge või pulseeriv alalispinge), siis pole väljandpinge üksikute komponentide amplituudide vahekorrad enam samad, vaid kõrgemate sagedustega pingekomponendid on nõrgenenud.



Joonis 10. 16. Takistus-mahtuvusliku filterlülituse (madalläbivusfiltri) skeem ja läbilaskekõver — väljandpinge ja sisendpinge suhte sõltuvus vahelduvvoolu sagedusest.



Joonis 10. 17. Takistus-mahtuvusliku filterlülituse (kõrgläbivusfiltri) skeem ja läbilaskekõver.

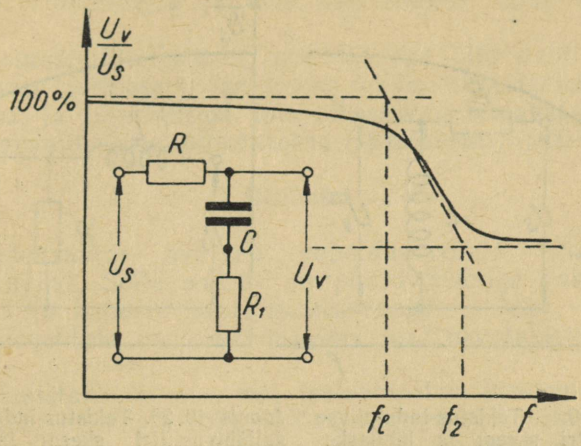
Filtrite *sageduskarakteristikud* ehk *läbilaskekõverad* on graafikud, mis näitavad väljandpinge ja sisendpinge suhte sõltuvust sagedusest. Praegukirjeldatud filterlülituse läbilaskekõverat kujutab joonis 10. 16. Sagedust, mille juures väljandpinge moodustab 71% sisendpingest, nimetatakse *lõikesageduseks* (mõnikord ka *piirsageduseks*) ja tähistatakse f_l.

Lõikesageduse juures võrdub kirjeldatava filtri kondensaatori reaktiivtakistus arvuliselt aktiivtakisti takistusega. Lõikesagedust saab arvutada valemist:

$$f_{l(\mathrm{Hz})} = \frac{10^{12}}{2\pi R_{(\Omega)} \cdot C_{(\mathrm{pF})}} = \frac{10^{6}}{2\pi R_{(\Omega)} \cdot C_{(\mu\mathrm{F})}}.$$

Filtri lülituses võib vahetada kondensaatori ja takisti «asukohad» (joonis 10. 17). Siis ilmneb eelkirjeldatule vastupidine nähtus — madalate sageduste nõrgenemine filtrit läbivas pinges. Graafik samal joonisel on niisuguse filtri läbilaskekõver.

Kondensaatorit ja aktiivtakistust sisaldava filtri läbilaskekõvera kuju saab muuta lisatakisti lülitamisega järjestikku kondensaatoriga (joonis 10. 18). Niisuguse lülituse sageduskarakteristiku langev osa muutub kõrgematel sagedustel jälle rõhtsaks. Lisatakistit R_1 võib niisuguses filterlülituses nimetada piiramistakistiks, kuna ta kõrgematel sagedustel piirab kondensaatori mõju.



Joonis 10. 18. Piiramistakistusega madalläbivusfiltri skeem ja läbilaskekõver.

Selle lülituse lõikesagedus avaldub valemist:

$$f_l = \frac{10^{12}}{2\pi C_{(pF)}\,(R_{(\Omega)} + R_{1(\Omega)})}.$$

Sagedust f_2, mille juures ilmneb piiramistakistuse mõju (millest kõrgemad sagedused enam ei nõrgene), saab määrata valemist:

$$f_2 = f_l \frac{R + R_1}{R_1}.$$

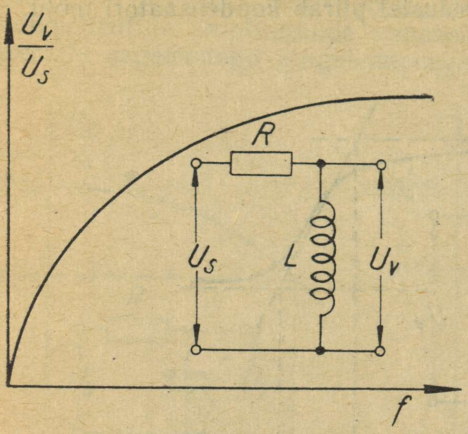
Piiramistakistuse määramiseks vastavalt sagedusele f_l ja f_2 sobib sama valemi teisend:

$$R_1 = R \frac{f_l}{f_2 - f_l}.$$

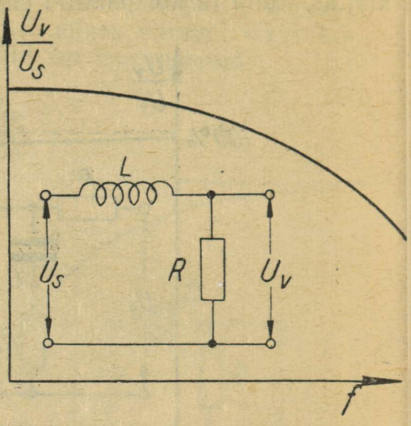
Filterlülitusi, mis sisaldavad üht või rohkemat aktiivtakistit ja kondensaatorit, nimetatakse lühidalt *R-C-filtriteks*. Filterlülitusi, mis koosnevad aktiivtakistusest ja induktsioonipoolist, nimetatakse *R-L-filtriteks*. Nende lülitusi ja vastavaid läbilaskekõveraid kujutavad joonised 10. 19 ja 10.20. Lõikesagedust väljendab siin valem:

$$f_{1(\mathrm{Hz})} \frac{R_{(\Omega)}}{2\pi L_{(\mathrm{H})}}.$$

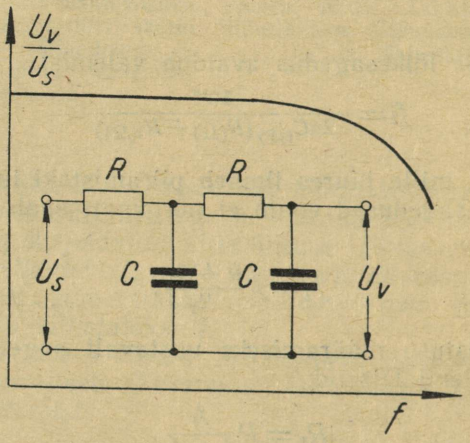
Järsema läbilaskekõvera saamiseks võib lülitada järjestikku mitu samalaadset filtrit (näide joonisel 10. 21).



Joonis 10. 19. Takistus-induktiivse kõrgläbivusfiltri skeem ja läbilaskekõver.



Joonis 10. 20. Takistus-induktiivse madalläbivusfiltri skeem ja läbilaskekõver.



Joonis 10. 21. Kahelülilise takistus-mahtuvusliku madalläbivusfiltri skeem ja läbilaskekõver.

Madalaid sagedusi piiravaid lülitusi (skeemid joonistel 10. 17 ja 10. 19) nimetatakse *kõrgläbivusfiltriteks* ning kõrgeid sagedusi piiravaid lülitusi (skeemid joonistel 10. 16, 10. 18 ja 10. 20) *madalläbivusfiltriteks*.

R-C- ja *L-C*-filtreid kasutatakse väga laialdaselt helivõimendus- ja -ülekandeseadmetes. Üldiselt nõutakse taolistelt seadmetelt kõikide helisageduste loomutruud ülekannet, kuid selle saavutamiseks tuleb sageli kasutada üsnagi keerukaid filterlülitusi.

Filterlülitused, mis üheaegselt sisaldavad induktiivsust ning mahtuvust (*L-C*-filtrid), moodustavad eriliste omadustega vooluringid, nn. *võnkeringid* ja neid käsitletakse edaspidi vastavas peatükis.

Keerukamaid filterlülitusi, mis lasevad läbi vaid teatavasse sagedusalasse (-ribasse) langevaid voole, nimetatakse *ribaläbivusfiltriteks*, ja filterlülitusi, mis tõkestavad teatavasse sagedusalasse langevaid voole, nimetatakse *ribatõkestusfiltriteks*.

Olulisim

1. Kondensaator avaldab vahelduvvoolule mahtuvuslikku reaktiivtakistust. Selle suurus on pöördvõrdeline vahelduvvoolu sagedusega ja kondensaatori mahtuvusega.
2. Alalisvoolule on kondensaatori mahtuvustakistus lõpmata suur.
3. Ajakonstant on arv, mis iseloomustab kondensaatori laadimis- ja tühjenemisaja sõltuvust vooluringi aktiivtakistusest.
4. Mahtuvustakistuse puhul on vahelduvvooluringis voolu ja pinge vahel 90° faasinihe (vool kondensaatoris püsib temale mõjuvast pingest $^1/_4$ perioodi võrra ees).
5. Iga juhe avaldab endainduktsiooni tõttu teda läbivale vahelduvvoolule induktiivset reaktiivtakistust, mille suurus on võrdeline vahelduvvoolu sagedusega ja induktiivsusega.
6. Induktiivtakistuse puhul on vahelduvvooluringis voolu ja pinge vahel 90° faasinihe (vool induktiivses takistuses püsib temale mõjuvast pingest $^1/_4$ perioodi võrra järel).

Reaktiivtakistil ei muutu energiat soojuseks.

7. Kui vahelduvvooluringis on aktiivtakistusi ja reaktiivtakistusi, siis ilmneb vooluringi pinge ja voolu vahel faasinihe, mis asub kraadides väljendatult 0° ja 90° vahel.
8. Vahelduvvooluringi lülitatud aktiivtakistuste ja reaktiivtakistuste kogutakistus ei avaldu alalisvoolu teooriast tuntud valemite kaudu (vt. tabel nr. 5).

Ülesanded

40. Leida ajakonstant lülitusel, mis koosneb järjestikusest kondensaatorist mahtuvusega 1,2 μF ja takistist suurusega 1,2 MΩ. (Vastus: $\tau = 1{,}44$ sek.)
41. Leida 150-kHz sagedusega vahelduvvoolu ringsagedus. (Vastus: $\omega = 2\pi f = 6{,}28 \cdot 150\,000 = 942\,000$.)
42. Leida 1-μF mahtuvusega kondensaatori mahtuvustakistus sagedusel 150 kHz. (Vastus: $X_C \approx 1$ Ω.)

43. Leida 1-H induktiivsusega pooli induktiivtakistus keskmistel helisagedustel. (Vastus: $X_L \approx 6280\ \Omega$, kui $f = 1000$ Hz.)

44. Leida vooluringi näivtakistus, kui aktiivtakistus $R = 6$ kΩ ja reaktiivtakistus $X_C = 8$ kΩ on lülitatud järjestikku. (Vastus: $Z = 10$ kΩ.)

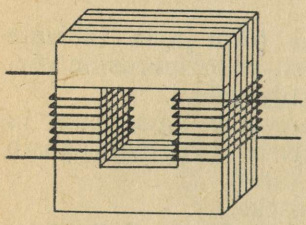
45. Leida samas vooluringis võimsustegur $\cos\varphi$. (Vastus: $\cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{6}{10} = 0{,}6$).

11. PEATÜKK

TRANSFORMAATOR

§ 1. TRANSFORMAATORI TALITLUSPRINTSIIP JA EHITUS

Transformaatori kasutamise võimalused on väga laialdased. Eriti suur on transformaatorite osatähtsus meie maa elektrifitseerimisel, sest elektrienergia ülekandmine vooluallikast suurtel kaugustel asuvatesse tarbijatesse pole mõeldav transformaatorite kasutamiseta. Raadiotehnikas kasutatakse transformaatoreid toiteseadmetes, võimendajates ja mujal.



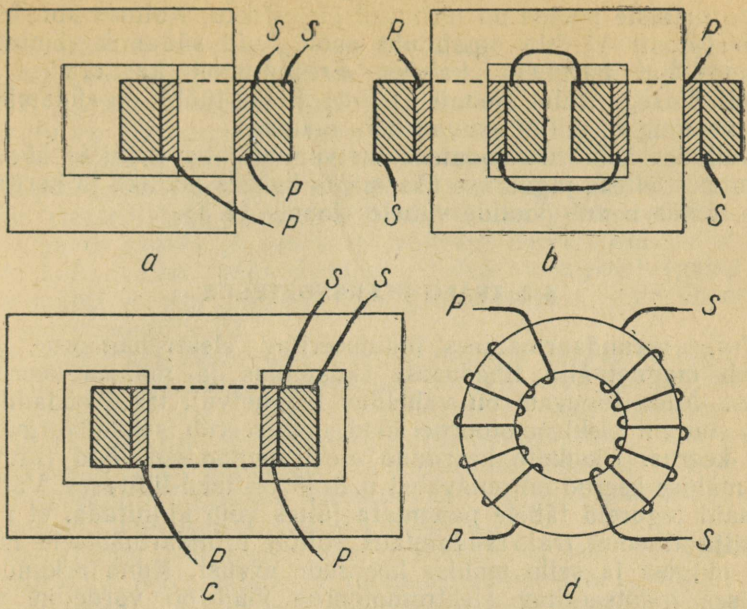
Joonis 11. 1. Raudsüdamikuga trafo põhimõtteline ehitus.

Transformaator ehk *trafo* on vastastikuse induktsiooni nähtuse kasutamisel põhinev elektromagnetiline seadis, mille abil saab ühest vooluringist kanda vahelduvvoolu energiat teise, sellega v a h e t u l t ühendamata vooluringi. Sealjuures on võimalik soovi kohaselt muuta pinge kõrgust või voolu tugevust.

Transformaatori moodustab kaks või enam teineteisest isoleeritud traatmähist, mis on keritud ühisele terassüdamikule (joonis 11. 1). Ühte mähisesse, *primaarmähisesse*, juhitakse mingist vooluallikast vahelduvvool. Ülejäänud mähis, *sekundaarmähis*, annab voolu teisele vooluringile. Ühel transformaatoril võib olla ka mitu sekundaarmähist.

Vahelduvvoolu juhtimisel trafo primaarmähisesse tekib mähise ümber ja peamiselt raudsüdamikus magnetväli, mille tugevus ja suund muutub kooskõlas primaarvoolu hetkväärtuse muutumisega. Muutliku magnetvälja jõujooned, lõigates sekundaarmähiste keerde, indutseerivad nendes vastavalt muutliku suuna ja tugevusega elektromotoorse jõu ning kinnise sekundaarvooluringi olemasolu korral ka vahelduvvoolu.

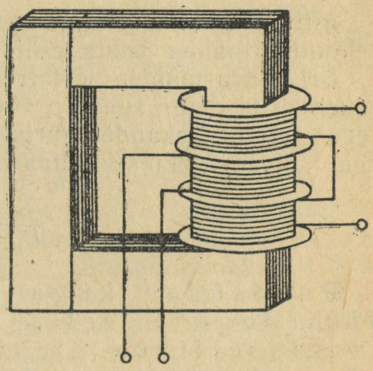
Sekundaarmähises indutseeritava voolu energia võetakse mähi-



Joonis 11. 2. Trafode konstruktsioone: ülestikku keritud mähistega ühe pooliga (*a*) ja kahe pooliga trafo (*b*), hargneva magnetväljaga ühe pooliga trafo (*c*), toroidtrafo (*d*).

seid sidestava vahelduva suunaga magnetvälja vahendusel primaarmähise vooluringist, s. t. seda toitvast vooluallikast.

Madalatel sagedustel (kuni 20 000 hertsini ulatuvate tehniliste vahelduvvoolude ja helisagedusvoolude puhul) kasutatavate trafode südamikud on peaaegu eranditult valmistatud suure magnetilise läbitavusega terasesulamist plekkidest. Kõrgsagedustrafod keritakse erilistele magnetdielektrikust südamikele. Kõrgsagedustrafosid käsitletakse tagapool.



Joonis 11. 3. Poolitatud primaarmähise vahele asetatud sekundaarmähisega trafo.

Trafosid valmistatakse mitmesuguse väliskujuga. Joonisel 11. 2-*a* on kujutatud trafo, millel ainsale poolile on mähitud ülestikku kõik mähised. Primaarmähis on selle konstruktsiooni puhul enamasti alumine. Kahe pooliga trafol (joonis 11. 2-*b*) on kummalegi poolile mähitud pool primaar- ja sekundaarmähisest. Vas-

tavate mähiste pooled on lülitatud järjestikku. Kolmas konstruktsioon (joonis 11.2-*c*) omab üht pooli, kuid südamik võimaldab magnetväljal hargneda kaheks. Erijuhtumeil kasutatakse nn. toroidmähisega trafot (joonis 11.2-*d*). Sellel tüübil on südamikuks kinnine rõngas, millel asuvad kõik mähised.

Kõikides konstruktsioonides on võimalik ka mähiste kõrvutipaigutus. Selleks jagatakse üks mähis kaheks pooliks ja keritakse teine mähis nende poolide vahele (joonis 11.3).

§ 2. TRAFO ÜLEKANDETEGUR

Trafo sekundaarmähises indutseeritav elektromotoorne jõud oleneb magnetvälja tihedusest südamikus ja mähise keerdude arvust. Mida tugevam on vahelduv magnetväli trafo südamikus, seda suurem elektromotoorne jõud indutseerub sekundaarmähise igas keerus. Üksikute keerdude elektromotoorsed jõud liituvad, sest mähise keerud on omavahel n. ö. järjestikku-lülituses. Vähemtähtsaid tegureid tähele panemata jättes võib kinnitada, et magnetvälja tihedus trafo südamikus sõltub primaarmähisele mõjuvast pingest ja selle mähise keerdude arvust. Kuna sekundaarmähises indutseeritav elektromotoorne jõud on võrdeline selle mähise keerdude arvuga, siis järeldub, et sekundaarmähises tekkiv elektromotoorne jõud E_s sõltub primaarmähisele rakendatavast pingest U_p ja sekundaar- ning primaarmähise keerdude arvude w_s ja w_p suhtest ehk trafo ülekandetegurist $k = \frac{w_s}{w_p}$.

Mitme sekundaarmähisega trafol võib ülekandetegur olla iga sekundaarmähise kohta erineva väärtusega.

Sekundaarmähise elektromotoorse jõu ja primaarmähisele rakendatud pinge suhe on võrdne vastavate keerdude arvude suhtega (trafo ülekandeteguriga), kui kõik primaarmähise jõujooned läbivad kõiki sekundaarmähise keerde:

$$\frac{E_s}{U_p} = \frac{w_s}{w_p} = k.$$

Raudsüdamikuga madalsagedustrafo puhul võib lugeda selle trafo sekundaarmähises indutseeritava elektromotoorse jõu suuruse võrdseks ülekandeteguri ja primaarmähisele rakendatud pinge korrutisega:

$$E_s = kU_p.$$

§ 3. KOORMUSETA TRAFO

Kui trafo sekundaarmähise vooluring (lühemalt: sekundaarring) on katkestatud, siis temas voolu pole ja primaarmähise vooluringist (primaarringist) energiat sekundaarmähisesse ei kandu — trafo on koormuseta. Loomulikult indutseerib primaarvool ka lahtises sekundaarmähises elektromotoorse jõu, kuid sekundaarvoolu puudumisel selleks energiat ei tarvitata. Lahtine sekundaarmähis elektrilistele ja magnetilistele olukordadele seadmes mingit mõju ei avalda ja seepärast võimegi koormuseta trafot vaadelda kui tavalist raudsüdamikuga induktsioonipooli (paispooli), mille mähis — siin muidugi trafo primaarmähis — on ühendatud vahelduvvooluallikaga.

Primaarringi läbib vahelduvvool, millega kaasub muutlik magnetväli. Mähises kulgeb tunduvalt nõrgem vool kui see vastaks pingele ja mähisetraadi a k t i i v takistusele, sest endainduktsiooninähtuse tõttu ilmneb mähises elektromotoorne jõud, mis on Lenzi reegli põhjal alati suunatud voolu muutumistele vastu. Seepärast kujuneb endainduktsiooni elektromotoorne jõud pidevalt vastassuunaliseks vahelduvvooluallika pingele.

Ideaaljuhul, kui trafos energiakadusid ei teki, on vahelduva magnetvälja poolt tekitatud vastuelektromotoorne jõud primaarmähises võrdne sellele mähisele rakendatud pingega, vooluringis on «pingete tasakaal» ja vaatamata teatava tugevusega voolu olemasolule mähises vooluallikast voolu- ja pingefaaside täpselt 90°-se nihke tõttu mingit energiat ei võeta: koormuseta trafo käitub primaarringi suhtes induktiivse takistusena.

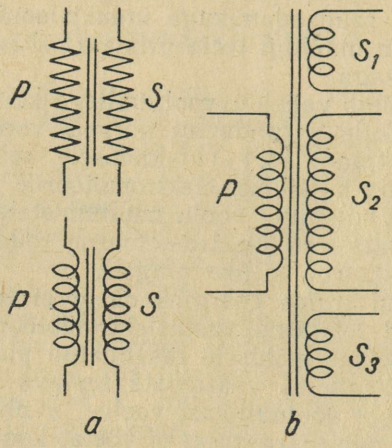
Tegelikkuses pole mähise traat vaba aktiivtakistusest ja osa voolu energiast muundub soovimatult sellel takistusel soojuseks. See energia saadakse muidugi vooluallikast. Praktiliselt kasutatavates trafodes tekib energiakadu mitte üksnes mähise traadis, vaid ka terassüdamikus. Muutlik magnetvoog peab trafo südamikku pidevalt vahelduvvoolu suuna muutumise taktis ümber magneetima. Selle protsessiga kaasub teatava soojushulga eraldumine südamikus vooluallika energia arvel, sest igal poolperioodil tuleb ületada südamiku jääkmagnetism. Energiakadu, mis tekib mähises, on *vaseskadu* (nimetus tuleb sellest, et trafo mähised valmistatakse vasktraadist), terassüdamikus tekkivat energiakadu aga nimetatakse *rauaskaoks*.

Trafo sekundaarringi mittekoormamisel võetakse *tühijooksuvooluna* vooluallikast niisugune võimsus, mis katab rauaskao ja primaarmähises esineva vaseskao.

Vaseskao vähendamiseks ja mähise liigse kuumenemise vältimiseks tuleb raadiopraktikas kasutatavate trafode mähiste traat valida sellise ristlõikepinnaga, et voolutihedus traadis poleks koormamisel suurem kui 2,5 amprit ristlõike igale ruutmillimeetrile.

Trafo südamikus tekib peale ümbermagneetimiskao (hüs-

tereesikao) veel pöörisvoolukadu, sest muutlik magnetväli indutseerib ka terassüdamikus kahjuliku elektrivoolu — nn. pöörisvoolu. Võimalikult nõrga jääkmagnetismiga raudsüdamiku kasutamine aitab vähendada hüstereesikadu. Pöörisvoolukao vähendamiseks ei valmistata südamikku kunagi massiivrauast, vaid õhukestest plekkidest, mis on üksteisest lakikihiga või õhukese paberiga elektriliselt isoleeritud. Pöörisvoolud saavad siis tekkida ainult väga väikeses ulatuses iga üksiku pleki paksuse piirides.



Joonis 11. 4. Trafo skeemitähis ühe (*a*) või mitme (*b*) sekundaarmähise puhul.

Transformaatori ehitamise hõlbustamiseks valmistatakse plekid tähtede E, L ja U kujulised. Selle juures on enamasti oluline, et plekid oleksid lõikekohtades surutud üksteise vastu õhuvaheta. Kui nendes kohtades on õhupilud, siis suureneb südamiku «magnetiline takistus» ja trafo omadused halvenevad. Üksikutel juhtumitel kasutatakse siiski õhupiluga südamikke trafodele eriliste elektriliste omaduste andmiseks (küllastumise vähendamiseks, kui primaarmähist läbib tugeva alaliskomponendiga pulseeriv vool).

Konstruktsioonile vaatamata kujutatakse iga trafot skeemitähisega, mis on toodud joonisel 11. 4. Vasakul kujutatud trafod omavad üht, paremal asuv aga kolme sekundaarmähist.

§ 4. KOORMATUD TRAFO

Trafo sekundaarringi lülitatakse alati mingi tarbija, mida läbib vool

$$I_s = \frac{E_s}{Z_s},$$

kus E_s on sekundaarmähises indutseeritava elektromotoorse jõu suurus ja Z_s — sekundaarringi kogutakistus (tarbija, juhtmete ja mähise üldimpedants).

Trafo südamikus mõjub sekundaarmähise koormamisel üheskoos kaks magnetvälja: esiteks primaarmähise voolust põhjustatud väli ja teiseks selle välja poolt sekundaarmähises indutseeritud voolust tingitud väli. Nende kummaski mähises esinevatest vooludest põhjustatud magnetväljade koosmõjul põhinebki trafo sekundaarringi tagasimõju primaarringile, mis avaldub primaarvoolu muutuses vastavalt sekundaarkoormuse muutumisele.

Lenzi reegli põhjal on sekundaarmähises indutseerunud voolu suund alati selline, et tema poolt tekitatud magnetvoog mõjub südamikus primaarvoolu magnetvälja nõrgendavalt. Tugevnenud sekundaarvoolu mõjul väheneb primaarmähises indutseeritav vastuelektromotoorne jõud. Kuid vastuelektromotoorse jõu vähenemisel häiritakse primaarringis valitsevate pingete tasakaal, primaarvool tugevneb ning viimasega kaasuv magnetväli tugevneb kuni uue elektrilis-magnetilise tasakaalu taastamiseni.

Sekundaarvoolu tugevuse tõstmine suurendab seega vooluallikast primaarmähisesse juhitavat võimsust. Primaarvõimsus P_p peab katma sekundaarvõimsuse P_s ja trafo mähises ning südamikus tekkiva võimsuskao P_k:

$$P_p = P_s + P_k.$$

Tavalistes raadiotehnilistes toiteseadmetes kasutatavates trafodes on võimsuskadu väike: 5 kuni 10% primaarvõimsusest. Seega võime lugeda P_p ja P_s ligikaudu võrdseteks:

$$P_p \approx P_s.$$

Koormatud trafo *kasutegur* η_T[1] on seadmetest saadava kasuliku sekundaarvõimsuse (s. t. tarbijasse juhitava võimsuse) ja primaarmähisesse juhitava (s. t. vooluallikast saadava) võimsuse suhe:

$$\eta_T = \frac{P_s}{P_p}.$$

Kasutegur on alati ühest väiksem, sest primaarmähisesse juhitav võimsus on kaovõimsuse võrra sekundaarvõimsusest suurem. Tihti väljendatakse kasutegurit protsentides. Võimsate tugevvoolutrafode $\eta_T = 99\%$, väikestel raadiotehnikas kasutatavatel trafodel ulatub see 70—95%-ni. Primaarvõimsust võime avaldada

[1] η — kreeka tähestiku märk «eeta».

primaarmähisele rakendatud pinge ja mähist läbiva voolu efektiivväärtuste kaudu:

$$P_p = U_p I_p \cos \varphi$$

ja samalaadselt ka sekundaarvõimsust:

$$P_s = U_s I_s \cos \varphi.$$

Kuna trafode kasutegur on enamasti lähedane ühele, siis võime lugeda primaar- ja sekundaarvõimsused võrdseks; sel juhul

$$U_p I_p \cos \varphi = U_s I_s \cos \varphi.$$

Matemaatiliselt on võimalik seda valemit väljendada pingete ja voolude jagatisena, kusjuures tekkivad murrud on võrdsed trafo ülekandeteguriga k (primaar- ja sekundaarmähise keerdude arvude suhtega):

$$\frac{U_s}{U_p} = \frac{I_p}{I_s} = k = \frac{w_s}{w_p}.$$

See võrdus iseloomustab hästi trafos toimuvat energia ülekandeprotsessi. Sobivalt valitud ülekandeteguriga k (keerdude arvude suhtega) võime trafo teatava primaarpinge transformeerida mistahes teise suurusega vahelduvpingeks. Kuid alati niipalju, kui võidame sekundaarpinge osas, kaotame sekundaarvoolus ja ka vastupidi. Ühelgi juhul pole sekundaarmähisest võimalik kätte saada suuremat võimsust kui juhiti primaarmähisesse.

Kui näiteks trafo ülekandetegur k on 2, siis saame primaarpingest kaks korda suurema sekundaarpinge, kuid vool sekundaarmähises osutub kaks korda nõrgemaks primaarvoolust. Seega jääb ülekantav võimsus (pinge ja voolu korrutis) endiseks. Oleks aga trafo ülekandetegur näiteks 200, siis sekundaar- ja primaarpinge suhe on ligikaudu 200, kuid sekundaar- ja primaarvoolu suhe on $\frac{1}{200}$. Niipalju, kui transformeerimisel võidetakse pinge osas, kaotatakse voolus.

Trafo, mille ülekandetegur on suurem ühest, töötab pinget tõstvalt ja vastaval määral voolu nõrgendavalt. Niisugust trafot nimetatakse *pingettõstvaks*. Pinget madaldavat ja vastavalt voolu tugevdavat trafot nimetatakse *pingetmadaldavaks*. Sellise trafo ülekandeteguri väärtus on alla ühe.

Sageli on mitme sekundaarmähisega trafod ehitatud nii, et vastavalt üksikute sekundaarmähiste keerdude arvudele osa mähiseid töötab pinget tõstvalt, osa aga madaldavalt. Niisuguse trafo primaarvõimsus võrdub muidugi kõikide sekundaarmähiste

poolt tarbijatele antavate võimsuste P_{s_1}, P_{s_2} jne. ning kaovõimsuse P_k summaga:

$$P_p = P_k + P_{s_1} + P_{s_2} + P_{s_3} + \ldots,$$
$$P_p = P_k + U_{s_1} I_{s_1} + U_{s_2} I_{s_2} + U_{s_3} I_{s_3} + \ldots .$$

§ 5. AUTOTRAFO

Autotrafoks (säästtrafoks) nimetame eritüüpi üheainsa mähisega ja mähisest väljatoodud lisaühendusega (väljavõttega) trafot. Skemaatiliselt on autotrafo kujutatud joonisel 11. 5.

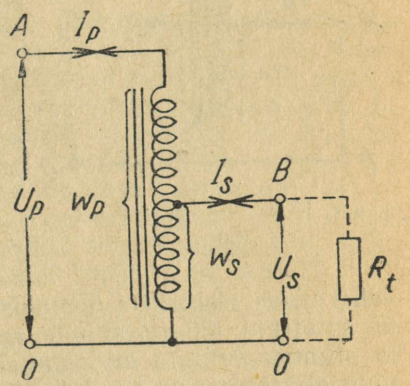
Autotrafo ainus mähis keerdude arvuga w_p on tervikuna otsmiste klemmide O ja A kaudu lülitatud primaarvoolu allikaga. Primaarpinge U_p tekitab mähises vahelduvvoolu I_p, millega kaasub vahelduv magnetväli mähise ümber ja vastav väljatihedus terassüdamikus.

Primaarpinge jaguneb mähise keerdudel ühtlaselt. Kui mähise keerdude arv on w_p, siis ühele keerule jääb

$$U_1 = \frac{U_p}{w_p} \text{ volti}$$

ja ühe voldi kohta tuleb mähisel

$$w_1 = \frac{w_p}{U_p} \text{ keerdu.}$$



Joonis 11. 5. Pingetmadaldav autotrafo.

Autotrafos on tehtud väljavõte teatud arvu keerdude w_s kaugusel mähise ühest otsast. See osa mähisest moodustabki autotrafo sekundaarmähise. Sekundaarpinge on tühijooksul (sekundaarse vooluringi mittekoormamisel), ühe keeru kohta tuleva pinge U_1 ja mähise sekundaarse osa keerdude arvu w_s korrutis (tühijooksul puudub pingelang mähise aktiivtakistusel):

$$U_s = U_1 w_s = \frac{U_p}{w_p} w_s.$$

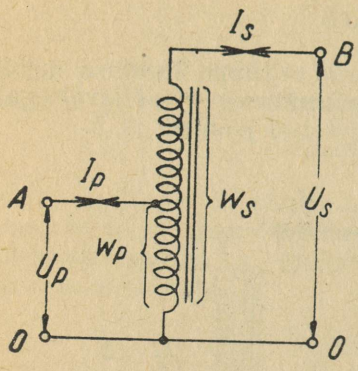
Matemaatilisel teisendusel omandab see valem transformaatorite teooriast tuntud kuju:

$$\frac{U_s}{U_p} = \frac{w_s}{w_p}.$$

Saadud murrud on võrdsed autotrafo ülekandeteguriga k:

$$\frac{U_s}{U_p} = \frac{w_s}{w_p} = k.$$

Praegukirjeldatud autotrafo ülekandeteguri väärtus on alla ühe, sest sekundaarosa keerdude arv on väiksem primaarosa, s. o. antud juhul kogu mähise keerdude arvust, mille tõttu sekundaarpinge on primaarpingest madalam. Seepärast nimetatakse taolisi autotrafosid pingetmadaldavateks autotrafodeks ehk *induktiivseteks pingejagajateks.*



Joonis 11.6. Pingettõstev autotrafo.

Autotrafosid võib ehitada ka pinget tõstvatena (ülekandeteguri väärtusega üle ühe). Selleks antakse primaarpinge mähise ühe otsa ja väljavõtte vahele, s. o. mähise ühele o s a l e ning sekundaarpinge saadakse t e r v e l t mähiselt (skeem joonisel 11.6).

Osa vooluallikast saadavast võimsusest kandub autotrafo sekundaarsesse vooluringi transformatoorselt, s. t. vooluringide vaheliše magnetilise sidestuse (pooli keerdude vastastikuse induktiivsuse) kaudu induktiivsel teel; teine osa kantakse üle mittetransformatoorselt, s. t. elektrilisel teel primaar- ja sekundaarringi vahel oleva elektrilise ühenduse kaudu. Selles ongi hariliku trafo ja autotrafo tööprintsiipide erinevus — hariliku trafo primaar- ja sekundaarringid on omavahel sidestatud ainult magnetiliselt ning elektrienergia kandub üle ainult transformatoorselt.

Autotrafo raudsüdamik on väiksem kui sama võimsusega trafol; samuti võimaldab autotrafo kasutamine mõningat kokkuhoidu vase osas (s. o. mähisetraadi pikkuses ja läbimõõdus). Peale selle on autotrafo kaal väiksem ja kasutegur suurem kui sama võimsuse ülekandmiseks vajalikul trafol (sellest ka autotrafo teine nimetus: «säästtrafo»). Nende eeliste kõrval võib olulise puudusena mõjuda vahetu elektrilise ühenduse olemasolu autotrafo primaar- ja sekundaarringi vahel, mis sageli piirab autotrafo kasutamist. Olukordades, kus on nõutav kummagi vooluringi isoleerimine teineteisest, tuleb muidugi kasutada harilikke mitmemähiselisi trafosid.

Kõikide autotrafode kohta kehtib transformaatorite teooriast tuntud põhireegel pingete ja voolude vahekordade kohta primaar- ja sekundaarringis (voolud kummaski vooluringis on pöördvõrdelised vastavate pingetega). Pingetmadaldava autotrafo sekundaarpinge on primaarsega võrreldes madalam; seega sekundaarvool on primaarvoolust tugevam. Pingettõstva autotrafo sekundaarpinge on primaarpingest kõrgem; seetõttu on sekundaarvool primaarsega võrreldes nõrgem.

Kui lülitada pingetmadaldava autotrafo mähise sekundaarosale koormuseks mingi tarbija R_t (joonis 11.5), siis seda läbiv sekun-

daarvool I_s kulgeb ainult klemmide O ja B vahelises mähiseosas (w_s), mida samaaegselt läbib ka kogu mähise (w_p) ulatuses voolav primaarvool I_p. Lenzi reegli põhjal on sekundaarvool mähise selles osas alati primaarvoolule vastupidise suunaga. Tegelik vool I_{OB} mähise ühises osas OB kujuneb seega võrdseks sekundaar- ja primaarvoolu vahega:

$$I_{OB} = I_s - I_p.$$

Pingettõstval autotrafol on primaarpinge sekundaarpingest madalam ja primaarvool sekundaarvoolust tugevam (joonis 11.6). Antud juhul mähise ühises osas OA kujunev vool I_{OA} võrdub primaar- ja sekundaarvoolu vahega:

$$I_{OA} = I_p - I_s.$$

Mähiste ühist osa OA võib valmistada väiksema ristlõikepinnaga traadist, võrreldes samale võimsusele arvestatud tavalise kahemähiselise trafoga, kus traadi ristlõikepind primaar- ja sekundaarmähistes peab olema arvestatud vooludele vastavalt I_p ja I_s.

Meeldetuletuseks tuleb veelkordselt rõhutada, et trafo ja autotrafo sobivad vaid vahelduvvoolu või pulseeriva voolu vahelduvkomponendi ülekandmiseks ja pinge ning voolu väärtuste muundamiseks. Alalisvoolu puhul transformeerimise põhimõttel töötavaid seadmeid ühelgi juhul kasutada ei saa.

Olulisim

1. Transformaator ehk trafo on seade, mille talitlus põhineb vastastikuse induktsiooni nähtusel.
2. Trafo primaarmähisest kandub vahelduvvoolu energia sekundaarmähisesse neid haarava ühise magnetvälja vahendusel, ilma otsese elektrilise ühenduseta. Trafo mähised ja nendega ühendatud vooluringid on seega teineteisest isoleeritud.
3. Sekundaarmähises indutseeritav pinge on võrdne ülekandeteguri ja primaarmähisele rakendatud pinge korrutisega.
4. Ülekandetegur on sekundaarmähise ja primaarmähise keerdude arvude suhe.
5. Primaarmähisesse juhitav võimsus on (kui mitte arvestada kadusid) võrdne sekundaarmähisest saadava võimsusega.
6. Trafo võimaldab vahelduvpinge suurust soovikohaselt muuta ülekandeteguri vastava valiku teel.
7. Nii mitu korda kaotame transformeerimisel sekundaarvoolus, kui mitu korda võidame sekundaarpinges, samuti ka vastupidi.
8. Autotrafo on üheainsa mähisega, kuid ühe või mitme haruühendusega (väljavõttega) varustatud trafo.
9. Trafo on kasutatav ainult vahelduvvoolu energia või pulseeriva voolu vahelduvkomponendi energia ülekandmiseks sekundaarvooluringi.

12. PEATÜKK

ELEKTROTEHNILISED MÕÕTMISED

§ 1. ELEKTRI MÕÕTMINE JA MÕÕTERIISTAD

Elektri- ja raadioseadmete normaalse töö tagamiseks, nende ehitamise ja korrastamise hõlbustamiseks ning paljudel muudel juhtumitel tuleb määrata generaatorite, vooluringide või tarbijate töörežiime. Selleks mõõdetakse voolu, pinget, võimsust, takistust ja vahelduvvooluringides nendele lisaks veel sagedust ning muid suurusi.

Vastavalt kasutamise otstarbele (s. o. millise elektrilise suuruse mõõtmiseks on üks või teine mõõteriist konstrueeritud) kannavad mõõteriistad nimetusi:

voolu mõõtja — ampermeeter;
pinge mõõtja — voltmeeter;
võimsuse mõõtja — vattmeeter;
energia mõõtja — energiaarvesti;
takistuse mõõtja — oommeeter;
sageduse mõõtja — sagedusmõõtja (hertsmeeter).

Iga elektrimõõteriistaga võib otseselt mõõta vaid seda elektrilist suurust, milleks ta on konstrueeritud. Nii pole näiteks ampermeetriga võimalik vahetult mõõta pinget vooluringis või oommeetriga mõnesse tarbijasse juhitavat võimsust.

Enamikku elektrimõõteriistu saab kasutada mõõtmisteks kas ainult alalisvoolu- või ainult vahelduvvooluringides. Kuid on olemas ka nn. universaalsed mõõteriistad, milledega saab mõõta nii alalis- kui ka vahelduvvoolu või -pinget.

Kõik elektrimõõteriistad peavad vastama reale tehnilistele ja konstruktiivsetele nõuetele, mis on sageli omavahel vastuolus. Kompromisslahendusena tuleb niisugusel juhul leida sobivatüübiline mõõtemehhanism.

Ühtluse ning parema arusaadavuse mõttes on käesolevas raamatus nimetusega «mõõtemehhanism» tähistatud elektrilise mõõteseadme tegelikult mõõtvat osa ilma selle juurde kuuluvate lisaseadmeteta, nagu šunt- või eeltakistid, alaldajakomplektid, termomuundajad ning lülitid. Nimetus «*mõõteriist*» on omistatud mõõtmist teostavale tervikseadmele: mõõtemehhanismile ühes kõigi tema juurde kuuluvate lisaseadmetega (eel- ja šunttakistitega jne.).

Elektrotehnilised mõõteriistad peavad kõigepealt vastama põhinõudele: mõõteriista lülitamine mõõdetavasse vooluringi ei tohi selles talitlusrežiimi märgatavalt muuta (vastasel korral saaksime mõõteriistadelt ainult ebaõigeid lugemeid). Selle nõude rahuldamiseks peavad kasutatavad mõõteriistad tarbima minimaalset võimsust ja nende

ühendamine vooluringiga ei tohi eriti muuta viimase kogutakistust. Ampermeeter, mis ühendatakse järjestikku mõõdetavasse vooluringi, peab seega omama võimalikult väikest sisetakistust; seevastu aga vooluallikaga või tarbijaga paralleelselt ühendataval voltmeetril peab sisetakistus olema võimalikult suur.

Elektrimõõtemehhanismid jagunevad oma ehituselt ja talitluspõhimõttelt mitmesse liiki. Elektrivoolu ja püsiva magnetvälja vastastikust mehaanilist mõju kasutatakse *magnetelektrilistes mõõtemehhanismides*. Kahe lähestikku asetatud erinimeliselt laetud plaadi vahel ilmneva tõmbejõu suuruse määramisega saab mõõta pinget *elektrostaatilistes mõõtemehhanismides* jne.

Mõõtmisviise on kaks: otsene ja kaudne mõõtmine. *Otsesel mõõtmisel* saadakse mõõdetava suuruse arvuline väärtus (näiteks vool amprites) vahetult mõõteriista skaalalt, *kaudsel mõõtmisel* tuleb otsitav suurus määrata ühest või mitmest otseselt mõõdetavast suurusest arvutuse teel või siis eritabelite või nomogrammide abil. Mõõtnud otseselt vastavate mõõteriistade abil näiteks voolu tarbijas (ampermeetriga) ja klemmipinge sellel (voltmeetriga), saame kaudselt määrata arvutamise teel või sobivast nomogrammist tarbija takistuse ning tarbitava elektrilise võimsuse. Vastavate mõõteriistadega (oom- ja vattmeetriga) oleks saanud mõõta käesoleval juhul kaudselt määratud suurusi ka otseselt.

§ 2. MAGNETELEKTRILISED MÕÕTEMEHHANISMID

Kõikidest elektrilistest mõõtemehhanismidest on eriti raadiotehnikas leidnud ulatuslikku rakendamist magnetelektrilised mõõteriistad. Neid seadmeid iseloomustab suure mõõtetäpsuse ja rahuldava mehaanilise vastupidavuse kõrval veel suhteliselt väike energiatarvitus.

Magnetelektriliste mõõtemehhanismide talitlusprintsiibiks on püsivmagneti välja ja mähisekujulise voolujuhtme ümber tekkiva magnetvälja koosmõju rakendamine osuti kallutamiseks voolust sõltuval määral.

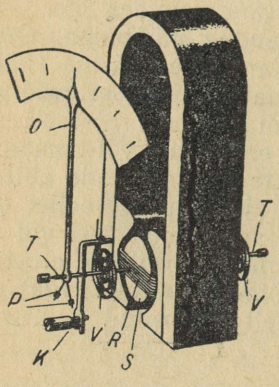
Olenevalt sellest, kas liikuvalt on kinnitatud (ja osutiga varustatud) voolumähis või magnetnõel, on vastav magnetelektriline mõõtemehhanism *pöördpool-* või *pöördmagnetsüsteemiline*. Laboratoorseteks mõõtmisteks ja samuti raadiopraktikas kasutatakse peamiselt pöördpool-mõõtemehhanisme.

Pöördpool-mõõtemehhanismid on enamasti ehitatud järgmiselt (joonis 12. 1): peenest isoleeritud traadist mähis on keritud ristküliku-kujulisele õhukesest alumiiniumplekist raamikesele *R*, mis toetub kahe lühikese poolteljega *T* kõvast kivist — korundist või ahhaadist — laagritele [1].

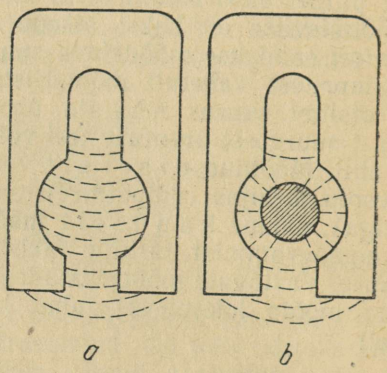
[1] Mõõtemehhanismide liikuvate osade tugilaagrid on sama ehitusega kui väikeste kellade rataste nn. «kivilaagrid».

Ühele teljekesele on kinnitatud osuti *O* ja viimast tasakaalustavad raskused *P*. Raami pöördumisel pöördub ka skaala kohale paigutatud osuti ning teeb raami pöördenurga hõlpsalt ja täpselt määratavaks.

Mõõdetav vool või teatud kindel murdosa sellest (näiteks üks kümnendik või sajandik) juhitakse pöördpooli kahe fosforpronksist spiraalse jõhvvedrukese *V* kaudu, mille sisemised otsad on kinnitatud teljekeste külge ja välised otsad isoleeritult instrumendi mitteliikuvate osade külge.



Joonis 12. 1. Pöördpool-mõõtemehhanismi ehitus.



Joonis 12. 2. Pöördpool-mõõtemehhanismi magnetvälja ühtlustamine õhupilusse asetatava raudsilindrikesega.

Pöördpool-mõõtemehhanismi mähis asub erisulamist («alniko», «alni») valmistatud tugeva püsivmagneti poolsilindri-kujuliste süvenditega pooluste vahel ühtlases magnetväljas. Kuna pöördpool-mõõtemehhanismi tundlikkus on võrdeline väljatihedusega pooluste vahelises ruumis, siis selle suurendamiseks asetatakse mähise (pöördpooli) sisse paigalpüsiv raudsilindrike *S*. Kuna rauda läbib magnetväli tuhandeid kordi hõlpsamalt kui õhku, siis tugevneb väli õhupiludes (pooluste ja silindrikese vahel) tunduvalt ja mõõteriista tundlikkus suureneb. Ka mõjub raudsilindrike ühtlustavalt magnetvälja jõujoonte paiknemise tihedusele õhupilus (magnetvälja jõujoonte kulg magneti pooluste vahel ilma raudsilindrikeseta ja silindrikesega on võrdluseks kujutatud vastavalt joonisel 12. 2-*a* ja -*b*). Pool võib umbes veerandpöörde ulatuses vabalt pöörelda magnetipooluste ja raudsilindrikese vahele jäävas kitsas õhupilus.

Kui pooli läbib vool, siis tekib tema ümber magnetväli, mille tugevus on võrdeline vooluga. Pooli magnetvälja ning püsivmagneti välja koosmõjul pöördub pool ja ka osuti jõhvvedrukesi pin-

gutades teatava nurga võrra, kuni jõud, mis pöörab raamikest, tasakaalustub jõhvvedrude elastsusjõududega. Tugevam vool põhjustab osuti suuremat pöördumist ehk *hälvet*, nõrgem vool — väiksemat. Voolu katkestamisel pööravad vedrud pooli tagasi esialgsesse, nn. nullasendisse. Enamikul pöördpool-mõõtemehhanismidel on osuti hälve võrdeline pooli läbiva vooluga. Seepärast on nende mõõteriistade skaalad ühtlaste jaotustega: voolu võrdsetele juurdekasvudele vastavad võrdsed osuti pöördenurga — hälbe — suurenemised.

Pöördpool-mõõtemehhanisme saab ehitada väga suure tundlikkusega, kui vähendada magnetipooluste ja silindrikese vahelise õhuvahemiku laiust, kasutada tugevamat püsivmagnetit ja suurema keerdude arvuga poolikest. On konstrueeritud pöördpool-ampermeetreid tundlikkusega kuni 1 mikroamper täishälbele. Heade hõõrdelaagrite kasutamisega, mähise traadi temperatuuri muutumisel ilmneva takistuse muutuse kompenseerimisega ning teiste vahenditega saab viia võimalikku mõõteviga isegi alla 0,1 protsendi täishälbe arvulisest väärtusest. Sel puhul aga suureneb tunduvalt energiatarvitus (mõõdetava vooluringi koormamine).

Kuna pöördpool-mõõtemehhanismi osuti hälbe suund oleneb voolu suunast mähises, siis pole sellega otseselt võimalik läbi viia mõõtmisi vahelduvvoolu ringis. Vahelduvvoolu mõõtvais pöördpool-mõõtemehhanismiga mõõteriistades muudetakse mõõdetav vahelduvvool enne mõõtemehhanismi juhtimist alalisvooluks.

Mõõteriista osuti täpseks viimiseks skaala nullpunkti enne mõõtmist (nullpunkti korrigeerimiseks) on nende esiküljel nupuke või kruvi — *nullpunkti korrektor*, mille abil saab ühe spiraalvedrukese pingust väikestes piirides muuta (joonisel 12. 1 tähistatud *K*).

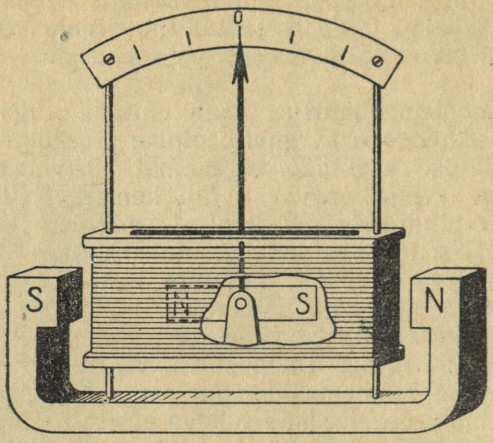
Pöördpool-mõõtemehhanismi täishälbeks vajalik vool on reguleeritav mehhanismi magnetpoolusi ühendava raudpleki tükikese — nn. *magnetšundi* — nihutamisega. Kui magnetšunt katab magnetpooluste otsi rohkem, siis on pooluste vahelises õhupilus väljatihedus väiksem, sest osa väljast läbib plekki ja täishälbe saamiseks on vajalik tugevam vool pöördpoolis. Samuti ka vastupidi: poolusi vähem katva magnetšundi juures on mõõtemehhanism tundlikum — täishälve kujuneb väiksema voolu puhul.

Alumiiniumplekist raamikesega pöördpool-mõõtemehhanismide osuti liigub mõõdetava voolu ühendamisel või selle tugevuse kõikumisel uuele väärtusele sujuvalt, ilma kestva võnkumiseta mõõteväärtuse ümber. See on tingitud asjaolust, et alumiiniumraamikese (kui kinnise vooluringi!) liikumisel pooluste vahelises tugevas magnetväljas indutseerub selles elektrivool, mille suund on Lenzi reegli kohaselt selline, et tema poolt esilekutsutud magnetväli mõjub liikumist pidurdavalt. See summutab pooli ja osuti tarbetuid võnkeid.

Vähem on kasutamist leidnud *pöördmagnet-mõõtemehhanismid* (joonis 12. 3). Nende suhteliselt suuremõõtmeline mähis püsib pai-

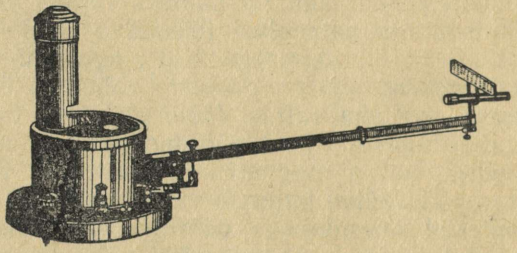
gal. Mähise sees võib pöörelda kompassinõela meenutav magnetnõel, mille nullasend on paralleelne mähise keerdude tasapinnaga. Mõnikord kasutatakse nõelakese nullasendisse viimiseks väikest paigalpüsivat lisamagnetit.

Voolu läbimisel poolist magnetnõelake pöördub. Hälvet võib



Joonis 12. 3. Pöördmagnet-mõõtemehhanismi ehitus.

lugeda mõnel mõõtemehhanismil osuti abil, sageli otse magnetnõela alla paigutatud skaalalt või nn. peegelmõõteriistadel eemalasuvalt ekraan-skaalalt.



Joonis 12. 4. Peegelgalvanomeeter.

Pöördmagnetiga peegelmõõteriistadel on magnetnõelakese külge kinnitatud väike peegel, millele juhitav valguskiir projitseeritakse läbi optiliste läätsede süsteemi mõõtejaotustega varustatud ekraanile. Valguskiir moodustab siin nagu väga pika osuti, mis muudab hästi nähtavaks ka vähimad mõõtemehhanismi peeglikese (ja magnetnõela) asendi muutused.

Tundlikkuse ja täpsuse suurendamiseks ei asetata niisuguste mõõteriistade magnetnõela kõvast kivist hõõrdelaagritele, vaid riputatakse pika niidi otsa. Nii saadakse *peegelgalvanomeeter* (joonis 12. 4).

Väliste magnetiliste mõjutuste ärahoidmiseks valmistatakse pöördmagnetiga peegelgalvanomeetri liikuv süsteem kahest vastassuunalisest magnetnõelast, millest üks pöörleb pooli sees ja teine pooli peal (*astaatiline peegelgalvanomeeter*). Nende mõõtemehhanismide nullasendit saab korrigeerida niidikese kinnituskruvi pööramisega.

Magnetelektriliste mõõtemehhanismide eelised:

1) suur tundlikkus, 2) suur täpsus, 3) väike energiatarvidus, 4) ühtlaste jaotustega skaala.

Magnetelektriliste mõõtemehhanismide puudused:

1) kõrge hind, 2) väike mehaaniline vastupidavus, 3) otseselt mõõdetav on ainult alalisvool.

§ 3. ELEKTROMAGNETILISED MÕÕTEMEHHANISMID

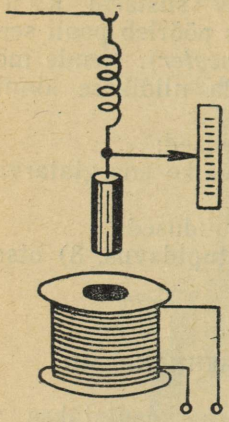
Elektromagnetilistes mõõtemehhanismides kasutatakse voolumähise omadust tõmmata endasse pehmest rauast valmistatud südamikku.

Selletüübiliste mõõteriistade talitlusprintsiibi selgitamiseks vaatleme esmalt üht vananenud konstruktsiooni (joonis 12. 5). Voolu läbimisel mähisest magneedib pooli magnetväli raudpulga. Kummagi välja koosmõjul tõmbub südamik mähisesse. Magnetilistele jõududele mõjub vastu väike kruvivedru. Sõltuvalt pooli läbiva mõõdetava voolu tugevusest pingutub vedru rohkem või vähem ja raudpulk asetub pooli erinevalt. Pulgaga on ühendatud skaala kohal liikuv osuti.

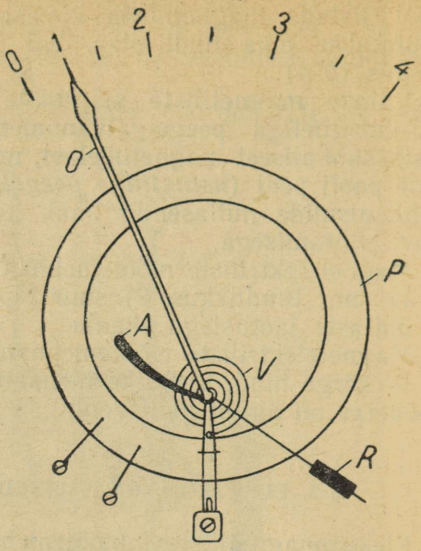
Praktiliselt kujundatakse elektromagnetilised ehk pöördraud-mõõtemehhanismid enamikus vastavalt joonisele 12. 6. Kivi- või metall-hõõrdelaagritele asetatud liikuv süsteem asub poolis ning koosneb õhukesest raudpleki ribast *A*, telje külge kinnitatud osutist *O* ning tasakaalustavatest raskustest *R* ja ühest spiraalsest jõhvvedrust *V* ühes nullpunkti korrektoriga.

Pöördraud-mõõtemehhanismi osuti hälve sõltub magnetvälja tugevusest (seega pooli läbivast voolust ja magnetilisest induktsioonist) raudribas. Riba magneetub ning asetub lähemale pooli keskpunktile. Pöördraud-mõõtemehhanismi osuti hälve ei ole võrdeline mähist läbiva vooluga — jaotused skaalal pole ühtlased, vaid on nullpunkti lähedal ja mõnikord ka lõpus tihedamad.

Voolu suuna muutumisel mähises (joonis 12. 5) muutub seda ümbritsev magnetväli suunalt vastupidiseks ja raudpulk magneetub vastassuunaliselt ümber. Järelikult tõmbub pulk ka voolu suuna muutumisel mähisesse ja osuti hälbe suund ei muutu. Elektromagnetilised mõõteriistad on kasutatavad seega nii ala-



Joonis 12. 5. Elektromagnetilise mõõtemehhanismi talitluspõhimõte.



Joonis 12. 6. Pöördraud-mõõtemehhanismi ehitus.

lis- kui madalsageduslikus vahelduvvooluringis. Kõrgemasageduslikesse vahelduvvooluringidesse need siiski ei sobi, sest pöörisvoolude ja jääkmagnetismi ületamise energiakaod (rauaskaod) halvendavad mõõtetäpsust kõrgematel sagedustel.

Elektromagnetilised mõõtemehhanismid varustatakse õhksummutiga, mis vähendab osuti võnkumist mõõtmisel ja kiirendab selle asetumist mõõdetava väärtuse kohale skaalal.

Õhksummuti koosneb metallkambrist ja selles hõõrdumisvabalt liikuvast labidakujulisest kolvikesest. Kolvike on kinnitatud mõõteriista liikuvate detailide külge. Kolvikese võnkumist takistab kambris leiduv õhk, mis tagab kogu liikuva süsteemi liikumise sujuvuse.

Elektromagnetiliste mõõtemehhanismide eelised:

1) vastupidavus lühiajalistele ülekoormustele, 2) konstruktsiooni lihtsus ja odavus, 3) mehaaniline tugevus, 4) sobivus ala- lis- ja vahelduvvoolu mõõtmiseks.

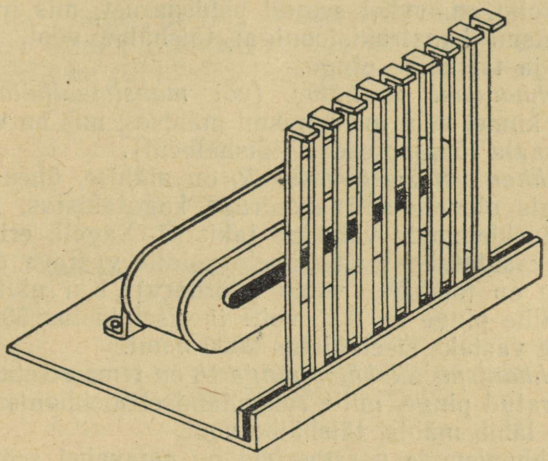
Elektromagnetiliste mõõtemehhanismide puudused:

1) skaala ebaühtlus, 2) väiksem mõõtetäpsus (võrreldes magnetelektriliste mõõtemehhanismidega), 3) mõõtetäpsust võivad mõjutada kõrvalised magnetväljad, 4) suur võimsusetarvitus.

§ 4. VIBREERIVAT TÜÜPI MÕÕTEMEHHANISMID

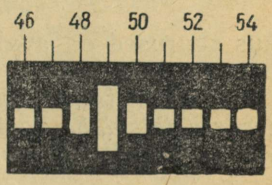
Vibreerivat tüüpi ehk lühemalt vibratsioonmõõteriistad on leidnud praktikas ulatuslikku kasutamist tehnilise vahelduvvoolu sageduse mõõtjatena.

Vibratsioon-sagedusmõõtja ehitust kujutab joonis 12. 7. Selles on väikese elektromagneti mähis lülitatud vahelduvvooluringi, milles tuleb määrata sagedust.



Joonis 12. 7. Vibratsioon-sagedusmõõtja ehitus.

Elektromagneti raudsüdamiku lähedusse on paigutatud kammikujuline moodustis erinevate pikkustega terasest lehtvedrudest. Iga vedru evib pikkusele vastavat mehaaniliste (elastsete) võnkumiste omasagedust. Kui elektromagnetit läbib mingi sagedusega vahelduvvool, siis tekib elektromagnetis vahelduv magnetväli ja see terasleheke, mille omavõnkumise sagedus vastab ergutava voolu sagedusele, hakkab võnkuma suurema amplituudiga.



Joonis 12. 8. Vaade töötava vibratsioon-sagedusmõõtja skaalale.

Mõõteriista skaala pilus on lehtvedrukeste heledaksvärvitud otsad kohakuti vastavate võnkesageduste arvudega. Vedrukesed on mõõdetavas sageduspiirkonnas reastatud 0,5 või isegi 0,25 hertsi võrra erinevate omasagedustega.

Joonisel 12. 8 on kujutatud vaade ühe vibratsioon-sagedusmõõtja skaalale hetkel, mil mõõdetava voolu sagedus on 49 hertsi.

Sagedusmõõtja elektromagneti mähis lülitatakse mõõdetavasse vooluringi paralleelselt teiste tarbijatega. Sagedusmõõtja

mähis on arvestatud kindlale talitluspingele (nimipingele), mis peab olema märgitud mõõteriistale. Ettenähtud nimipingest erineva talitluspinge kohandamiseks tuleb kasutada sobivat eeltakistit või trafot.

§ 5. MÕÕTEMEHHANISMIDE PARAMEETRID

Magnetelektrilisi ja elektromagnetilisi mõõtemehhanisme iseloomustab kolm omavahel seotud põhisuurust, mis on määratud iga mehhanismi konstruktsiooniga: täishälbe vool, mehhanismi sisetakistus ja täishälbe pinge.

Mõõtemehhanismi täishälbe (või *maksimaalhälbe*) *vooluks* I_i on teatud kindel vool mehhanismi mähises, mis on vajalik osuti viimiseks skaala lõppjaotuseni (täishälbeni).

Mõõtemehhanismi sisetakistus R_i on mähise, ühendusjuhtmete ja vooluringis olevate spiraalvedrude kogutakistus, s. t. mehhanismi ühendusklemmide vaheline takistus. Sageli, eriti voltmeetrite juures, kasutatakse hälbe ühele voldile vastava sisetakistuse mõistet (see on täishälbe voolu pöördarv). Kui näiteks mehhanismi täishälbe pinge on 0,25 volti ja sisetakistus 500 oomi, siis ühele voldile vastaks sisetakistus 2000 oomi.

Mõõtemehhanismi täishälbe pinge U_i on tema sisetakistuse suurusega määratud pinge, mille rakendamisel mehhanismi ühenduskontaktidele läbib mähist täishälbe vool.

Mõõtemehhanismide parameetrid on omavahel seotud järgmiselt:

$$I_i = \frac{U_i}{R_i},$$

millest

$$U_i = I_i R_i \text{ ja } R_i = \frac{U_i}{I_i},$$

kus suurused on avaldatud põhiühikutes — voltides, amprites ja oomides.

Mõõteriistade puhul kasutatakse analoogilisi suurusi: *mõõteriista täishälbe voolu* I_m, *mõõteriista sisetakistust* R_m ja *mõõteriista täishälbe pinget* U_m. Needki suurused on omavahel seotud:

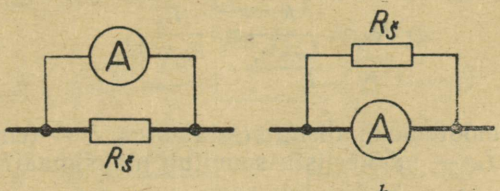
$$I_m = \frac{U_m}{R_m}.$$

§ 6. ALALISVOOLU AMPERMEETER; MÕÕTEPIIRKONNA LAIENDAMINE

Alalisvoolu mõõtmiseks vooluringis või tema hargnevas osas lülitatakse sellesse ampermeeter nii, et kogu mõõdetav vool läbiks mõõteriista.

Alalisvoolu mõõtmiseks kasutatakse enamasti magnetelektrilisi (pöördpool-) mõõtemehhanisme. Nendega saab vahetult mõõta vaid võrdlemisi nõrku voole, sest pöördpool-mõõtemehhanismide täishälbe vool on üldiselt olenevalt tüübist vaid 0,1 kuni 20 milliampri piires. Kui on tarvis mõõta suuremaid voole, tuleb ühendada mehhanismiga sildav *šunttakisti* ehk *šunt*.

Ampermeetri mõõtepiirkonna laiendamiseks kasutatav šunttakisti $R_š$ lülitatakse alati paralleelselt ampermeetri mõõtemehhanismiga (joonis 12.9-*a*). Mõõteriista juhitud vool hargneb — osa sellest läbib šunttakisti ja osa läbib mehhanismi mähise. Kumbki osavool on pöördvõrdeline vooluringi vastava haru takistusega.



a *b*

Joonis 12.9. Ampermeetri šunttakisti õige (*a*) ja ebaõige (*b*) lülitusviis.

Šundi takistus $R_š$ valitakse mõõtepiirkonna laiendamisel alati väiksem mehhanismi sisetakistusest R_i, mistõttu šunti läbib tugevam haruvool. Joonisel 12.9-*a* on kujutatud šundi õige lülitamine vooluringi ja joonisel 12.9-*b* — vale. Šunttakisti tuleb otseselt ühendada mõõdetavasse vooluringi ja mõõtemehhanism lisajuhtme kaudu šundiga. See ühendusviis võimaldab täpsemat mõõtmist, kuna ühendusjuhtmete eneste järjestikune lisatakistus kuulub siin suhteliselt suuremat takistust omavasse mõõtemehhanismi vooluharusse. Vastasel korral (nagu joonisel 12.9-*b*) liitub ühendusjuhtmete takistus šundi tühiselt väikese takistusega (suurematel mõõtepiirkondadel sajandikud oomid!), millega šundi vooluringi üldtakistus kasvab väga tunduvalt ja mõõtmise täpsus kannatab. Veelgi olulisem on, et šundi vooluringi võimaliku katkemisega kaasneb igal juhul mõõtemehhanismi hävimine.

Šunttakistusega suurendatakse ampermeetri mõõtepiirkonda tavaliselt mõne ümmarguse täisarvu kordselt. Arvu *n*, mille kordselt šunttakisti laiendab ampermeetri mõõtepiirkonda, nimetatakse ampermeetri *mõõtepiirkonna laiendusteguriks*:

$$n_a = \frac{I_m}{I_i},$$

kus I_m on mõõteriista (s. o. šundiga varustatud mõõtemehhanismi)

täishälbe vool ja I_i — selle mehhanismi enese täishälbe vool, mõlemad mõõdetud samades ühikutes — kas amprites või milliampri-tes.

Kui kasutatava mõõtemehhanismi täishälbe vool on näiteks $I_i = 10$ milliamprit ja mõõtepiirkonda soovitakse laiendada kuni 500 milliampri tugevuste voolude mõõtmiseks, siis sel juhul osutub ampermeetri mõõtepiirkonna laiendusteguriks

$$n_a = \frac{I_m}{I_i} = \frac{500}{10} = 50.$$

Ampermeetri šundi takistust saab arvutada, kui on teada kasutatava mehhanismi kolmest iseloomustussuurusest (I_i, U_i, R_i) kaks ja on valitud mõõtepiirkonna laiendustegur. Šundi takis-

$$R_š = \frac{R_i}{\frac{I_m}{I_i} - 1} = \frac{R_i}{n_a - 1},$$

tus kus R_i on mõõtemehhanismi sisetakistus, I_i — tema maksimaalhälbe vool ja I_m — mõõteriista soovitud maksimaalhälbe vool.

Näide. Leida šundi takistus, mis laiendaks 0,15-voldise maksimaalhälbega ja 30-oomise sisetakistusega mehhanismi mõõtepiirkonna 20-milliamprise maksimaalhälbeni.

Esmalt leiame antud mõõtemehhanismi täishälbe voolu:

$$I_i = \frac{U_i}{R_i} = \frac{0{,}15}{30} = 0{,}002\ \text{A} = 2\ \text{mA}.$$

Mõõtepiirkonna laiendustegur

$$n_a = \frac{I_m}{I_i} = \frac{20}{2} = 10.$$

Šundi takistus

$$R_š = \frac{R_i}{n_a - 1} = \frac{30}{10 - 1} = \frac{30}{9} = 3\,{}^1/_3 \text{ oomi}.$$

Ampermeeter peab omama võimalikult väikest sisetakistust ja maksimaalhälbe pinget. Selgitame seda nõuet arvulise näitega.

Näide. Oletame, et enne ampermeetri lülitamist joonisel 12. 10-*a* kujutatud vooluringi mõjub 8-oomise takistusega voolutarbijale R pinge $U = 10$ volti. Voolu saame Ohmi valemist:

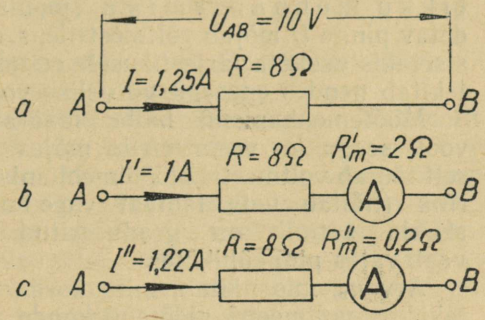
$$I = \frac{U}{R_t} = \frac{10}{8} = 1{,}25 \text{ amprit}.$$

Kui lülitada selle voolu mõõtmiseks tarbijaga järjestikku ampermeeter, mille sisetakistus $R_m' = 2$ oomi, siis osutub see takistus lülitatuks järjestikku tarbijaga (nagu mingi soovi-

matu «eeltakistusena»). Vooluringi kogutakistus on suurenenud ampermeetri sisetakistuse võrra ja uueks ebaõigeks vooluks, mis ei vasta tegelikele talitlustingimustele selles vooluringis, kujuneks

$$I' = \frac{U}{R_t + R'_m} = \frac{10}{8+2} = \frac{10}{10} = 1{,}0 \text{ amprit},$$

seega õigest väärtusest tunduvalt v ä i k s e m suurus (joonis 12. 10-*b*).



Joonis 12. 10. Näite juurde mõõteveast.

Olgu meil kasutada teine sama mõõtepiirkonnaga ampermeeter, mille sisetakistus on ainult 0,2 oomi. Vooluringi ühendamisel näitab see mõõteriist voolu

$$I'' = \frac{U}{R_t + R_m''} = \frac{10}{8+0{,}2} = \frac{10}{8{,}2} = 1{,}22 \text{ amprit},$$

mis erineb õigest väärtusest ($I = 1{,}25$ A) juba tunduvalt vähem (joonis 12. 10-*c*).

Toodud arvulise näite põhjal võime öelda, et mida väiksem on kasutatava ampermeetri sisetakistus R_m (ja vastavalt ka maksimaalhälbe pinge U_i), seda õigem on mõõtetulemus.

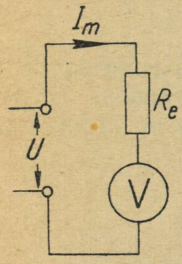
Siinkohal tuleb silmas pidada, et töökorras ampermeeter näitab vaatamata sisetakistuse suurusele alati t ä p s e l t teda läbiva voolu tugevust, kuid vooluringi kogutakistuse kasv ampermeetri sisetakistuse juurdeilmumise arvel vähendab mõõdetavat voolu, s. t. muudab teataval määral kogu vooluringi töörežiimi.

§ 7. ALALISVOOLU VOLTMEETER; MÕÕTEPIIRKONNA LAIENDAMINE

Mingi pinge mõõtmiseks lülitatakse voltmeeter alati p a r a l l e e l s e l t nende kahe punkti vahele vooluringis, millede vahel esineb mõõdetav pinge (kas vooluallika või elektrivõrgu pingena

või siis pingelanguna vooluringi mõnes osas, näiteks tarbijal või eeltakistil).

Voltmeetrina võib kasutada magnetelektrilisi ja elektromagnetilisi mõõtemehhanisme. Ühe- või teisetüübilise mehhanismiga saab mõõta vahetult pingeid, mis ei ületa selle mehhanismi maksimaalhälbe pinget. Suuremate pingete mõõtmiseks tuleb mõõtemehhanismi vooluringi lülitada järjestikune *eeltakisti.*



Joonis 12. 11. Voltmeetri mõõtepiirkonna laiendamine.

Voltmeetri mõõtepiirkonna laiendamise eeltakisti lülitatakse alati järjestikku mehhanismiga (joonis 12. 11). Mõõdetav pinge U mõjub voltmeetrile, s. o. mehhanismi sisetakistusele ja järjestikusele eeltakistusele, ning tekitab nendes enesega võrdelise voolu I_m.

Mõõtemehhanismi hälbe määrab teda läbiv vool, seega ka voltmeetrile mõjuv pinge. Sisuliselt töötab voltmeetri mõõtemehhanism ampermeetrina (näitab teda läbivat voolu), kuid tema skaala astmik on gradueeritud eeltakistusele vastavates pingeühikutes.

Arv n_v, mis näitab, mitu korda laiendab eeltakistus voltmeetri mõõtepiirkonda, on voltmeetri *mõõtepiirkonna laiendustegur* selle eeltakistuse puhul. Voltmeetri mõõtepiirkonna laiendustegur

$$n_v = \frac{U_m}{U_i},$$

kus U_m on mõõteriista (s. o. eeltakistiga varustatud mõõtemehhanismi) laiendatud mõõtepiirkonna täishälbe pinge ja U_i — mehhanismi täishälbe pinge, mõlemad mõõdetud samades ühikutes.

Kui voltmeetrina kasutatava mõõtemehhanismi sisetakistusest, täishälbe pingest ja täishälbe voolust on teada kaks väärtust, siis saab arvutada eeltakistite suurusi sellele mehhanismile valemiga:

$$R_e = R_i \left(\frac{U_m}{U_i} - 1\right) = R_i(n_v - 1) = \frac{U_m}{I_i} - R_i.$$

Nendes valemites on U_m eeltakistiga varustatud mõõteriista valitud maksimaalhälbe pinge, U_i ja I_i — mehhanismi maksimaalhälbe pinge ning vool ja R_i — mõõtemehhanismi sisetakistus.

Näide. Leida 300-voldise mõõtepiirkonna eeltakisti arvväärtus ja maksimaalne koormus voltmeetrile, mille mõõtemehhanismi maksimaalhälbe vool $I_i = 1$ milliamper ja sisetakistus $R_i = 167$ oomi.

Eeltakistus

$$R_e = \frac{U_m}{I_i} - R_i = \frac{300}{0{,}001} - 167 = 300\,000 - 167 = 299\,833 \text{ oomi.}$$

Käesoleval juhul võime nimetamisväärset viga tegemata ümardada eeltakistuse suuruse 300 000 oomini.

Eeltakistil vabaneb soojusena võimsus, mille suurus on maksimaalhälbe puhul

$$P_e = (U - U_i) I_i.$$

Kuna mõõtemehhanismi maksimaalhälbe pinge on suhteliselt väike suurus, võime lugeda eeltakistil vabanevaks võimsuseks

$$P_e \approx UI_i = 300 \cdot 0{,}001 = 0{,}3 \text{ vatti.}$$

Antud juhul sobib eeltakistuseks 300 000-oomine takisti, mille koormatavus pole alla 0,3 vati.

Voltmeetri sisetakistus peab olema võimalikult suur, et mitte olla lisakoormuseks mõõdetavas vooluringis. Seega sobib voltmeetriks väikese maksimaalhälbe vooluga mõõtemehhanism. Väikese sisetakistusega (suure maksimaalhälbe vooluga) voltmeeter ei anna suurema takistusega vooluringides mõõtmisel õigeid tulemusi, sest niisugune mõõteriist koormab tugevasti vooluringi. Mõõdetavas vooluringis tekivad niiviisi lisa-pingelangud ja voltmeeter näitab tegelikust väiksemat pinget.

Sellest seisukohast iseloomustab voltmeetrit tema sisetakistuse ja maksimaalhälbe pinge suhe

$$\frac{R_m}{U_m} = \frac{R_i}{U_i} = \frac{1}{I_i},$$

mis on pöördvõrdeline mõõtemehhanismi maksimaalhälbe vooluga. See arv on igal voltmeetril jääv suurus ning ei muutu ka mõõtepiirkonna laiendamisel. Mida suurem on suhe $R_m : U_m$ (mida väiksem on I_i), seda täpsemad mõõtetulemused saavutatakse pingete mõõtmistel suure takistusega vooluringides. Pinge mõõtmiseks suhteliselt väikese takistusega vooluringis (valgustusvõrgud, suured elektrigeneraatorid ja -mootorid) sobivad ka väikest suhet $R_m : U_m$ omavad voltmeetrid. Raadiotehnilisi mõõtmisi, mis enamikus toimuvad suuri takistusi sisaldavates vooluringides, pole aga mõtet teostada voltmeetriga, mille sisetakistuse ja maksimaalhälbe pinge suhe on alla 1000 Ω/V.

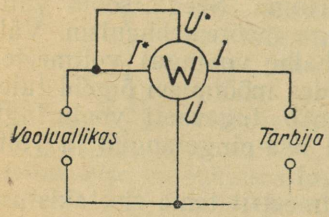
Tavalistel madalahinnalistel lülituskilbile monteeritavatel voltmeetritel on sisetakistuse ja maksimaalhälbe pinge suhe enamasti alla 100 oomi voldi kohta. Spetsiaalsetel laboratoorsetel voltmeetritel küünib see kuni 25 tuhande oomini voldi kohta. Eriseadmetel — lampvoltmeetritel — võib sisetakistus olla isegi mitukümmend megaoomi.

§ 8. VÕIMSUSE MÕÕTMINE; ELEKTRODÜNAAMILINE VATTMEETER

Vooluringis või selle osas avaldub elektrivoolu võimsus pinge või osapinge ja vastava voolu korrutisena. Mõõtnud voltmeetriga pinge ja ampermeetriga voolu, saame nende suuruste korrutisena kaudsel teel määrata võimsuse. Kaudsel mõõtmisel vahelduvvooluringis volt- ja ampermeetri meetodil segab tulemust võimsustegur $\cos \varphi$.

Spetsiaalsete elektrodünaamilist süsteemi mõõteriistadega saab mõõta võimsust ka otseselt.

Elektrodünaamilisel vattmeetril on kaks mähist — üks pingemähis (ühenduskontaktide tähised: U^* ja U) ning üks voolumähis (I^* ja I). Pingemähis lülitatakse mõõdetavasse vooluringi paralleelselt ja voolumähis järjestikku tarbijaga. Nendes mõõteriistades puudub püsivmagnet.



Joonis 12. 12. Elektrodünaamilise vattmeetri lülitamine vooluringi.

Jämedast traadist voolumähis on paigalpüsiv ja peenikesest traadist pingemähis on selle sees liikuv nagu pöördpool-mõõtemehhanismide püsivmagneti õhupilus. Liikuva mähise pöördenurk ja osuti hälve on võrdeline teda läbiva vooluga ning paigalseisva pooli magnetvälja tugevusega, s. o. viimast läbiva vooluga. Liikuvat mähist läbiv vool on võrdeline sellele rakendatud pingega — seega elektrodünaamilise voltmeetri hälve osutub võrdeliseks ühelt poolt vooluga voolumähises ja teiselt poolt ka pingemähisele mõjuva pingega, seega nende korrutisega, mis ongi võimsus.

Elektrodünaamilised vattmeetrid sobivad ka tehniliste vahelduvvoolude mõõtmiseks, sest osuti hälbe suund ei muutu voolu suuna üheaegsel muutumisel kummaski mähises. Samuti «arvestab» vattmeeter vahelduvvooluringis ka võimsustegurit $\cos \varphi$.

Valesuunalise hälbe annab elektrodünaamiline vattmeeter mähiste ebaõigel ühendamisel vooluringi. Selle ilmnemisel piisab ühe mähise ühenduste omavahelisest ümbervahetamisest hälbe suuna muutmiseks. Kummagi mähise alguste ühendusklemmid on märgitud tähekesega. Õigesuunalise hälbe saamiseks tuleb elektrodünaamiline vattmeeter ühendada vooluringi vastavalt joonisele 12. 12.

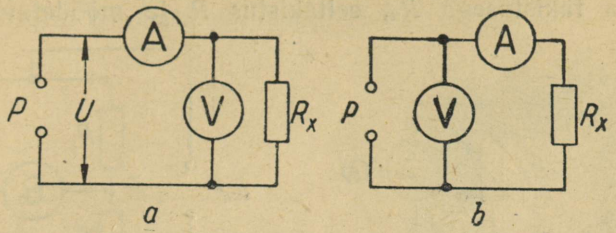
§ 9. TAKISTUSE MÕÕTMINE; OOMMEETER

Kaudsel teel võib määrata takistust sellel tekkiva pingelangu ja voolu mõõtmisega *ampermeetri ja voltmeetri meetodil.*

Takistust saab ampermeetri ja voltmeetri meetodil mõõta kahe lülitusskeemi järgi (joonis 12. 13). Selleks et mõõteriistade sise-

takistused ei muudaks oluliselt mõõtetulemusi, tuleb valida igale juhule sobiv lülitusskeem. Lülitus *a* sobib väikeste takistuste mõõtmiseks ja lülitus *b* suurte takistuste mõõtmiseks.

Lülituses joonisel 12. 13-*a* näitab ampermeeter mõõdetavat takistust ja voltmeetrit läbivate voolude summat. Kui voltmeetri



Joonis 12. 13. Takistuse määramine volt- ja ampermeetri meetodil väikeste (*a*) ja suurte (*b*) takistuste puhul.

sisetakistus on tunduvalt suurem mõõdetavast takistusest, siis osutub sellest tekkiv viga võrdlemisi tühiseks. Otsitava takistuse võime siis määrata lihtsalt:

$$R_x \approx \frac{U}{I}.$$

Kui voltmeetri sisetakistus on umbes samas suurusjärgus mõõdetava takistusega, tuleb arvutamiseks kasutada täpsemat valemit:

$$R_x = \frac{U}{I - \frac{U}{R_v}},$$

milles R_v on voltmeetri sisetakistus.

Teises lülituses (joonisel 12. 13-*b*) näitab voltmeeter mõõdetaval takistusel ja ampermeetril tekkivate pingelangude summat. Kui mõõdetav takistus on ampermeetri sisetakistusest tunduvalt suurem, siis saab otsitavat suurust leida lihtsustatud valemiga:

$$R_x \approx \frac{U}{I}.$$

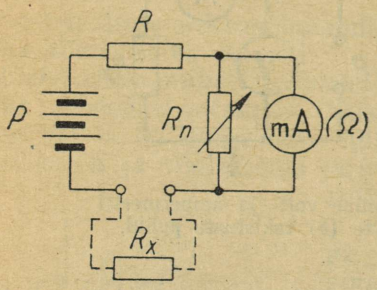
Mõõdetava takistuse kuulumisel umbes samasse suurusjärku ampermeetri sisetakistusega tuleb otsitav suurus avaldada täpsemast valemist:

$$R_x = \frac{U}{I} - R_a,$$

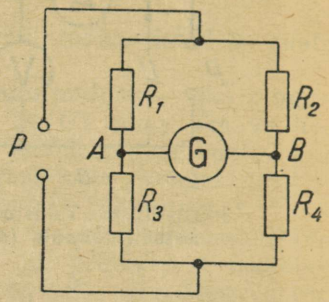
kus R_a on ampermeetri sisetakistus.

Vahelduvvoolu puhul avaldub toodud valemitest volt- ja ampermeetri meetodil mõõdetava elektriseadme näivtakistus Z, mis on aktiiv- ja reaktiivtakistuste geomeetriline summa.

Tavalist pöördpool-mõõteriista võib kasutada aktiivtakistuste otseseks mõõtmiseks. Selliste nn. *pöördpool-oommeetrite* üks lülitus on kujutatud joonisel 12. 14. Mõõteriistas asuvast väikesest vooluallikast, enamasti kuivelemendist, toidetakse vooluringi, millesse on järjestikku lülitatud pöördpool-milliampermeeter mA ühes šunteeriva takistusega R_n, eeltakistus R ja mõõdetav takistus



Joonis 12. 14. Vooluallikaga varustatud milliampermeetri kasutamine oommeetrina.



Joonis 12. 15. Sildlülituse kasutamine oommeetrina.

R_x. Mõõtemehhanismi osuti hälve on seda väiksem, mida suurem on tundmatu takistus ja vastupidi. Pöördpool-oommeetri skaala annab lugemi vahetult ning on gradueeritud oomides.

Reguleeritavat šunttakistit R_n kasutatakse enne mõõtmisele asumist osuti nullpunkti korrigeerimiseks. Lühistatud ühenduskontaktide puhul viiakse mehhanism täishälbeni (skaala nullpunkti) takisti R_n suuruse sobiva muutmisega.

Seadme paheks on väike mõõtetäpsus (eriti skaala alguses ja lõpus), paremus enamiku teiste oommeetrite ees on otsene loetavus: mõõdetava takistuse väärtus avaldub vahetult mõõteriista skaalal ilma muude lisaoperatsioonideta.

Sildlülituses oommeeter on täpsemaid takistuse mõõtjaid. Neljast takistist koosnevas skeemis — sildlülituses — (joonisel 12. 16) ei anna tundlik pöördpool-galvanomeeter G (voolu suuna ja olemasolu määraja) hälvet juhul, kui punktide A ja B potentsiaalid on võrdsed. Potentsiaalide vahe nendes punktides puudub aga juhul, kui pingelangud takistites R_1 ja R_2 ning R_3 ja R_4 on omavahel võrdsed (sildlülitus on tasakaalustatud).

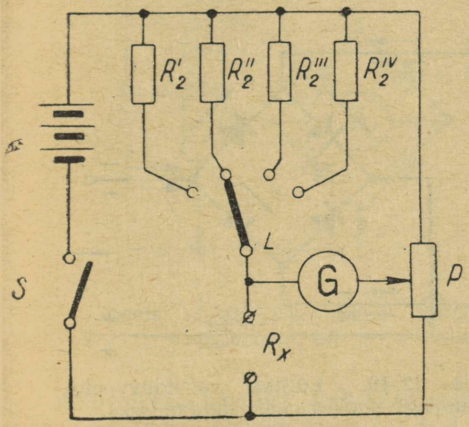
Sildlülitus on ainult siis tasakaalus, kui kõigi takistite suuruste vahel kehtib seos:

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4}.$$

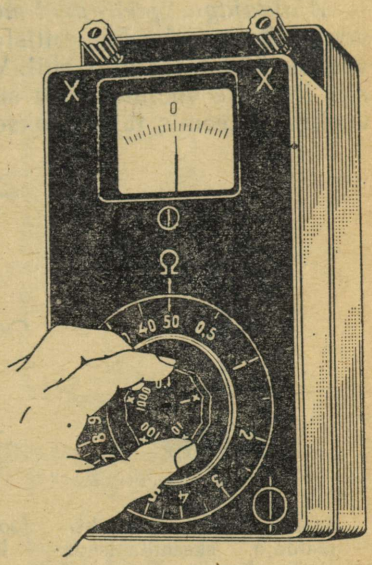
Tundliku galvanomeetriga varustatud sildlülitust, milles ühe haru takistid on asendatud liikuvat kontakti omava potentsiomeet-

riga, kasutatakse sildlülituses oommeetrina (*takistuste mõõtesillana*).

Üht sildlülituses mõõteriista tavalist skeemi kujutab joonis 12. 16. Selles seadmes on takistid R_1 ja R_3 liidetud potentsiomeetriks P; R_x on tundmatu takistus. Silla mõõtepiirkonda saab muuta ümberlüliti L abil takisti R_2 suuruse muutmisega. Väike kuivpatarei toidab lüliti S kaudu vooluringi alalisvooluga.



Joonis 12. 16. Sildlülituses oommeetri skeem.



Joonis 12. 17. Sildlülituses oommeeter.

Muutes potentsiomeetri liikuva kontakti asukohta, leitakse selle asend, mille puhul galvanomeetrit vool ei läbi. Siis saab potentsiomeetri nupu skaalalt määrata, millise osa kasutatud võrdlustakistusest R_2 moodustab mõõdetav takistus R_x. Tavaliste sildlülituses oommeetritega (joonis 12. 17) mõõdetakse takistusi piirkonnas 0,05 oomist kuni 50 kilo-oomini.

Suurimat mõõtetäpsust omab sildlülituses oommeeter potentsiomeetri skaala keskosas. Vooluallika pinge muutumine ei mõjuta siin mõõtetulemust.

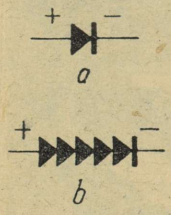
§ 10. VAHELDUVVOOLU JA -PINGE MÕÕTMINE PÖÖRDPOOL-MÕÕTEMEHHANISMIGA

Madalsagedusliku vahelduvvoolu ja -pinge mõõtmiseks kasutatavate odavate elektromagnetiliste mõõteriistade täishälbe vool on harva alla 10 milliampri. Sel põhjusel ei saa ehitada elektro-

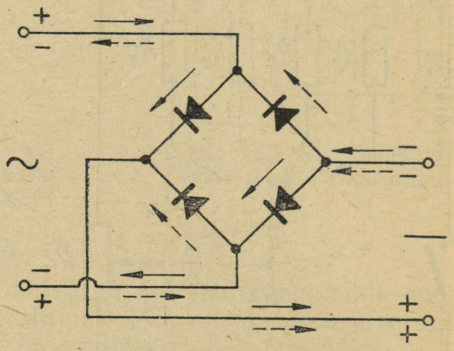
magnetilise süsteemiga voltmeetrit suurema sisetakistusega kui 100 oomi voldi kohta. Ka pole need mõõteriistad sagedustel üle 500 hertsi kuigi täpsed, kõrgsagedusvoolude mõõtmiseks ei sobi aga üldse.

Helisageduslike ja tehniliste vahelduvvoolude ning -pingete mõõtmiseks (sagedustel alla 20 000 hertsi) sobivad hästi alaldajaga varustatud pöördpool-mõõteriistad.

Alaldajaga pöördpool-mõõteriistades muudetakse vahelduvvool ühesuunaliseks eriliste pooljuhtalaldajate (kuproks- ehk vaskoksüüdalaldajate) abil. Vaskoksüüdalaldaja avaldab ühes suunas läbivale voolule palju suuremat takistust kui teisesuunalisele voolule. Skeemis tähistatakse kuproksalaldaja üksikut elementi ja



Joonis 12. 18. Pooljuhtalaldaja skeemitähised: üksik element (*a*) ning järjestikune patarei (*b*).



Joonis 12. 19. Lülitus vahelduvvoolu kummagi poolperioodi alaldamiseks.

järjestikku lülitatud elementide komplekti joonisel 12. 18 toodud märkidega. Väiksemat takistust voolule avaldab alaldaja noole suunas. Lähemalt vaadeldakse pooljuhtalaldajaid õpiku 17. peatükis.

Enamasti ühendatakse neli alaldajaelementi sildlülitusse, mis alaldab vahelduvvoolu mõlemad poolperioodid (joonis 12. 19). Voolu suunad lülituse harudes ühe poolperioodi ajal on skeemil näidatud noolekestega ja vastassuunalisel poolperioodil — punktiirnoolekestega. Nagu näha, läbib mõõtemehhanismi kummalgi poolperioodil samasuunaline vool.

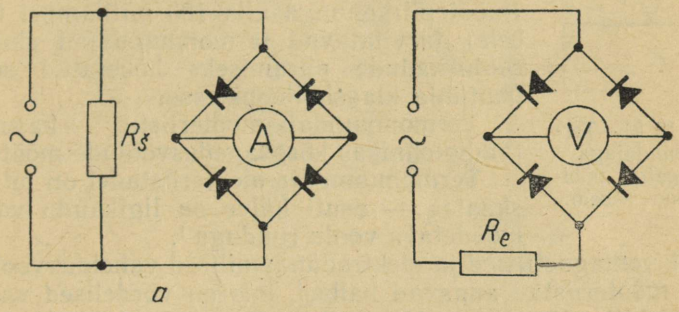
Alaldajaga pöördpool-mõõtemehhanismide tundlikkus võib olla kaunis suur — sageli on täishälbe vool alla 1 milliampri, millele vastaks voltmeeter sisetakistusega üle 1000 oomi voldile. Kuproksalaldajaga volt- ja ampermeetrite mõõteviga ei ületa tavaliselt 5 protsenti täishälbest.

Kuproksalaldajaga vahelduvvoolu mõõteriistade oluliseks puu-

duseks on suur pingelang alaldajas, mis võib tõusta 1-milliamprise täishälbega mõõtemehhanismi juures kuni ühe voldini.

Alaldatud vool on terve skaala ulatuses, välja arvatud selle algus, kaunis täpselt võrdeline mõõdetava vahelduvvooluga. Järelikult kujuneb kuproksalaldajaga mõõteriista skaala ka vahelduvvoolu puhul võrdlemisi ühtlaseks.

Kuproksalaldaja sisetakistus pole püsiv suurus, vaid oleneb tunduvalt pingest. See muudab madalate pingete mõõtepiirkondade skaala jaotused ebaühtlaseks [1]. Paremate mitme mõõtepiirkonnaga vahelduvvoolu voltmeetrite skaalal on väiksemate mõõtepiirkondade jaoks eraldi jaotused.



Joonis 12. 20. Laiendatud mõõtepiirkonnaga vahelduvvoolu ampermeetri (*a*) ja voltmeetri (*b*) lülitusskeemid.

Kuproksalaldajaga vahelduvvoolu ampermeetri ja samatüübilise voltmeetri skeemid on toodud joonisel 12. 20. Šunttakisti on tähistatud $R_š$ ja eeltakisti — R_e.

Termoelemendiga varustatud pöördpool-mõõtemehhanism sobib madal- ja kõrgsageduslike vahelduvvoolude mõõtmiseks.

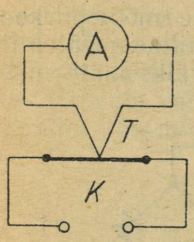
Termoelement koosneb kahest erinevast metallist traadist, mille otsad on kokku keevitatud. Termoelemendi keevisliite kuumutamisel ilmub traatide vahele elektromotoorne jõud, mille suurust mõõdab tundlik pöördpool-mõõtemehhanism. Tekkiva termoelektromotoorse jõu suurus sõltub kuumendamise temperatuurist ja metallidest. Suure termoelektromotoorse jõu annab rauast ja konstantaanist termopaar — ligi 5,2 millivolti temperatuuri iga 100° C kohta ning vask ja konstantaan — 4,5 mV/100° C.

Termoelementide kasutamiseks mõõtetehnikas (joonis 12. 21) juhitakse mõõdetav (enamasti kõrgsageduslik) vahelduvvool läbi küttetraadikese *K*, mis kuumutab üht või mitut pöördpool-mõõte-

[1] Voltmeetris on alaldajate sisetakistus lülitatud järjestikku mõõtepiirkonda laiendava eeltakistiga. Kui viimane on võrreldes esimesega küllalt suur, siis voltmeetri vooluringi kogutakistus seoses mõõdetavate pingetega ei muutu kuigi märgatavalt. Väikeste pingete mõõtepiirkondade eeltakistid on aga umbes samas suurusjärgus alaldajakomplekti muutliku sisetakistusega.

mehhanismiga ühendatud termoelementi *T*. Mõõtemehhanismi hälve on kaudses seoses mõõdetava vooluga, sest sellest oleneb termoelemendi keevisliite temperatuur ja ühtlasi ka termoelektromotoorne jõud.

Termoelementi ühes küttetraadiga nimetame *termomuundajaks* ja termoseadmega vahelduvvoolu ampermeetrit — *termomuundaja-mõõteriistaks.*



Joonis 12. 21. Termomuundajaga ampermeetri põhimõtteline skeem.

Praktikas kasutatakse otsese ja kaudse küttega termomuundajaid. Otsese ehk vahetu kütte puhul on termoelement elektrilises ühenduses küttetraadiga, kaudse kütte puhul aga sellest isoleeritud. Nõrgemate voolude mõõtmiseks (mõõtepiirkonnaga alla 100 milliampri täishälbele) tarvitatavad termomuundajad ehitatakse soojuskadude piiramiseks hõbetatud seintega õhutühja klaasballoonikesse.

Termomuundaja-mõõteriistu kasutatakse raadiotehnikas kõrgsagedusvoolude mõõtmiseks.

Termomuundaja-mõõteriistadel on nn. «ruutskaala» — osuti hälve on ligikaudu võrdeline mõõdetava voolu ruuduga [1].

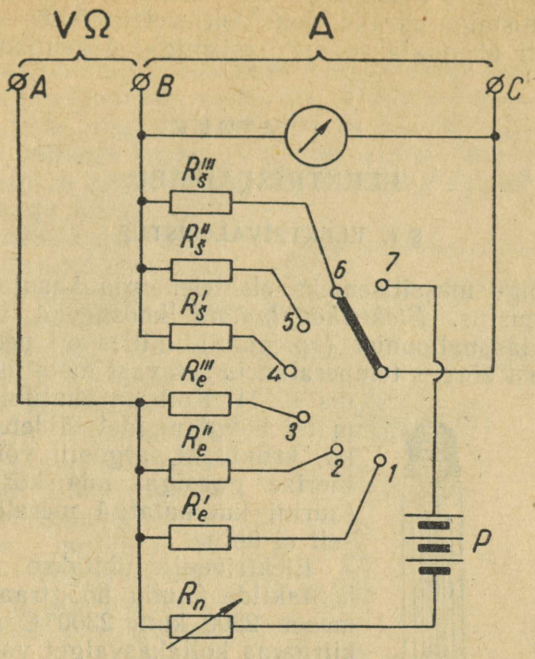
Elektromagnetilised ja elektrodünaamilised vahelduvvoolu ning -pinge mõõteriistad annavad hälbed, mis on võrdelised voolu või pinge efektiivväärtustega. Mitte-siinuseliste vahelduvvoolude mõõtmisel tekib magnetelektrilistel alaldajatega varustatud vahelduvvoolu mõõteriistadel teatav mõõteviga.

§ 11. UNIVERSAALSED MÕÕTERIISTAD

Kui varustada tundlik väikese omatarvidusega pöördpool-mõõtemehhanism sobivate ümberlülitatavate šunt- ja eeltakistitega ning kuivelementidega, siis võime seda seadet kasutada universaalselt mitme mõõtepiirkonnaga alalisvoolu ampermeetrina, voltmeetrina ja oommeetrina.

Ühe lihtsama universaalse alalisvoolu mõõteriista skeemi kujutab joonis 12. 22. Seade töötab kolme pinge-, kolme voolu- ja ühe takistuse-mõõtepiirkonnaga. Mõõdetav pinge rakendatakse ühendusklemmidele *A* ja *B* ning mõõdetav vool klemmidele *B* ja *C*. Takistusi mõõdetakse samuti klemmide *A* ja *B* vahel. Pingeid mõõdetakse ümberlüliti asendites 1, 2 või 3 ja voole — asendites 4, 5 või 6. Takistuste mõõtmiseks on asend 7. Reguleeritav takistus R_n on mõõteriista nullpunkti reguleerimiseks oommeetrina kasutamise eel. Voltmeetri eeltakistid kolmele pingepiirkonnale

[1] Küttetraadis eraldub soojusena võimsus $P = I^2R$, seega ka termopaari temperatuur ja termoelektromotoorne jõud kasvab võrdeliselt voolu ruuduga.



Joonis 12. 22. Universaalse alalisvoolu volt-, amper- ja oommeetri lülitusskeem.

on R_e', R_e'' ja R_e''' ning ampermeetri šunttakistid samuti kolmele voolupiirkonnale on R_s', R_s'' ja R_s'''.

Kirjeldatud universaalse mõõteriista skeemi täiendamisel kuproksalaldajatega võib seadet kasutada ka vahelduvpingete ja -voolude mõõtmiseks.

Olulisim

1. Tegelikkusele vastavate mõõtmistulemuste saamise huvides ei tohi mõõteriistade lülitamine vooluringi muuta märgatavalt selle talitlusrežiimi.
2. Mõõtemehhanismi täishälbe vool on mehhanismi konstruktsiooniga määratud kindel vool, mis on vajalik osuti viimiseks skaala lõppjaotuseni.
3. Mõõtemehhanismi sisetakistus on selle mähise, ühendusjuhtmete jms. üldtakistus.
4. Mõõtemehhanismi täishälbe pinge tekitab mehhanismi sisetakistuses täishälbe voolu.
5. Ampermeeter ühendatakse mõõdetavasse vooluringi järjestikku. Voltmeeter ühendatakse mõõdetavasse vooluringi paralleelselt.

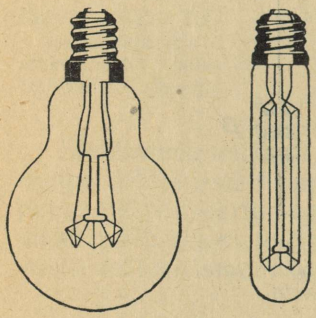
6. Ampermeetri mõõtepiirkonda laiendav šunttakisti ühendatakse mehhanismiga paralleelselt. Voltmeetri mõõtepiirkonda laiendav eeltakisti ühendatakse mehhanismiga järjestikku.

13. PEATÜKK

ELEKTRISEADMED

§ 1. ELEKTRIVALGUSTUS

Üheks kõige massilisemaks elektrienergia kasutamise viisiks on hõõgvalgustus. *Elektrihõõglambid* koosnevad metallsokliga varustatud klaasballoonist («pirnist»), milles on peenike volframist või muust kõrges temperatuuris sulavast metallist traat (joonis 13. 1). Kolb on õhutühi või võimsamatel hõõglampidel täidetud lämmastiku, krüptooni, argooni või mõne muu inertse gaasiga, mis kõrge temperatuurini kuumutatud metalliga keemiliselt ei ühine.



Joonis 13. 1. Elektrihõõglampe.

Elektrivool juhitakse lambi sokli kontaktide kaudu hõõgtraati, mis kuumeneb 2200 kuni 2300° C ning hakkab kiirgama kollakasvalget valgust. Hõõgtraat on keeratud spiraali ja sageli see veel omakorda spiraali (bispiraal-hõõglambid), et vähendada jahtumist soojuskiirguse tagajärjel.

Hõõglampi iseloomustab nimipinge, nimivõimsus ning mõned optilised suurused. Hõõglampe valmistatakse väga mitmesuguse kujuga, nimipingega ja -võimsusega. Levinumad on tavalised «valgustuslambid» pingetele 127 ja 220 volti ning võimsustele 10 kuni 1000 vatini. Lambid võimsustega kuni 300 vatti omavad 27-millimeetrise läbimõõduga keermetatud *normaalsoklit,* võimsamate lampide puhul kasutatakse 40-millimeetrise läbimõõduga *koljatsoklit.* Klaaskolvi pind on läbipaistev, mateeritud või valgest piimklaasist.

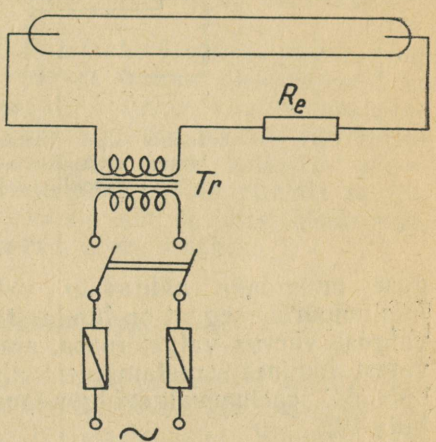
Lisaks kirjeldatutele vajatakse mitmesuguseid väikesemõõtmelisi madala nimipingega signaal- ja valgustuslampe. Taskulampides kasutatakse 2,5- või 3,5-voldise nimipinge ja 0,16- või 0,28-amprise nimivooluga hõõglampe. Raadioseadmete skaalavalgustuseks on levinud 6,3- ning 26-voldised pisilambid.

Hõõglambid muundavad valguseks ainult üsna väikese osa nendesse juhitavast elektrienergiast, sest suurem osa (90 . . . 95 protsenti) eraldub tarbetu soojusena. See asjaolu sundis otsima uusi, ökonoomsemaid elektrivalgustuse meetodeid ning prakti-

kasse ilmusid mitmesugused gaaslahendus- ja luminestsentslambid, millede valgusviljakus (lambi valgusvoo ja tarbitava võimsuse suhe) on suurem.

Gaaslahenduslampides saadakse valgus elektrivoolu läbimisel gaasist või metalliaurust vastavate elektroodidega varustatud klaastorus. Sobiva pinge ja gaasirõhu juures tekib gaasi aatomite ioniseerumine, millega kaasuvad valgusnähted. Gaaslahenduslampides muundatakse kiirgusenergiaks kuni 80 protsenti elektrienergiast. Kuigi kogu kiirgusenergia ei osutu nähtavaks valguseks, on gaaslahenduslampide valgusviljakus tunduvalt suurem kui hõõglampidel.

Gaaslahenduslampide laialdast rakendamist valgustusseadmetes piirab nende valguse värvus. Nii on gaaslahenduse valguse värvus elavhõbeda auru puhul lillakassinine, naatriumiaurul erekollane, neoonil punane, heeliumil ja lämmastikul — kollane. Nende gaaside kombinatsioone kasutatakse värvilistes valgusreklaamseadmetes.



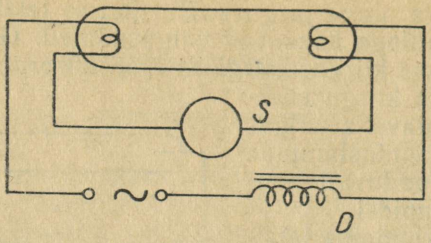
Joonis 13. 2. Gaaslahenduslambi lülitamine vahelduvvooluvõrku trafo ja piiramistakisti kaudu.

Gaaslahendustorusid toidetakse suhteliselt kõrge pingega (kuni 6000 volti), mida saadakse sobivast trafost piiramistakisti või paispooli kaudu (joonis 13. 2). Viimane määrab gaaslahenduslambi talitlusrežiimi, sest lamp omab negatiivset takistust (elektroodide vahelise pinge alanemisel vool tugevneb). Piiramistakisti või paispooli puudumisel rikneb gaaslahenduslamp esimesel pingestamisel.

Luminestsentslamp on gaaslahenduslamp, mille torukujulise klaasballooni sisepind on kaetud erilise ainega — luminofooriga. Torus on vähesel määral elavhõbedaauru ja argooni. Elektroodid, mis asuvad toru otstes, on valmistatud hõõgniitidena ja lülitatud vooluallikaga piiramispaispooli *D* ja käiviti *S* kaudu (joonis 13. 3). Viimase ülesanne on mõni sekund pärast lambi sisselülitamist katkestada järjestikuste hõõgniitide vooluring, millega kummagi hõõgniidi kui elektroodi vahele ilmub vooluallika pinge. Hõõgniidid on tarvilikud lambi süttimise hõlbustamiseks, s. o. täitegaasi esialgseks ioniseerimiseks. Pärast küttevoolu katkemist tekib gaaslahendus ning see hoiab hõõgniidid ka edaspidi kuumadena.

Elavhõbedaauru ioniseerimisel muundub lillakassinise valguse tekkimise kõrval peamine energiahulk mittenähtavaks ultravioletseks kiirguseks, mille nähtavakstegemiseks rakendatakse lumino-

foori. Igale luminofoorile omane *luminestsentsinähtus* avaldub selles, et selle aine molekulid, neelates üht liiki kiirgust, kiirgavad samaaegselt välja teist liiki kiirgust. Sobivalt valitud luminestseeriv aine võib valgustamiseks mittesobiva ultravioletse kiir-



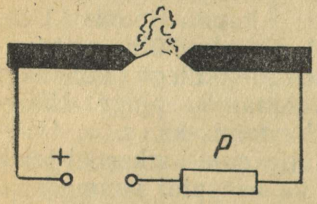
Joonis 13. 3. Luminestsentslambi lülitamine vahelduvvooluvõrku piiramispaispooli ja käiviti kaudu.

guse muundada nähtavaks valguseks. Sõltuvalt kasutatavast luminofooride segust on luminestsentslambi («päevavalguslambi») valguse värvus valge, roosa, sinakasvalge vms. Praegukasutatavatest luminestsentslampidest olgu nimetatud «valgevalgus-lambid» БС, «pehmevalgevalgus-lambid» ТБС ja «päevavalgus-lambid» ДС.

Luminestsentslambi valgusviljakus on palju kõrgem hõõglambi omast (30 . . . 40-vatise võimsusega hõõglampi asendab 15-vatine «päevavalguslamp»). Ka on luminestsentslambi talitlusiga (keskmiselt 2500 tundi) umbes kaks korda pikem kui hõõglambil.

§ 2. LEEKLAHENDUS; KEEVITAMINE

Kahe süsielektroodi pingestamisel umbes 30 . . . 40-voldisest alalisvooluallikast saab nende vahel tekitada väga kõrge temperatuuriga *leeklahenduse* ehk *kaarleegi*. Kuna leeklahendus, nagu gaaslahenduski, omab negatiivset takistust, tuleb ka siin kasutada piiramistakistit (joonis 13. 4). Tugeva erevalge valguse tõttu kasutatakse leeklahendust prožektorites ja kinoprojektorites; kõrge temperatuuri (kuni 4000° C) tõttu — elektrikeevitamiseks ja metallide sulatamiseks leekahjudes.



Joonis 13. 4. Kaarleegi tekitamine süsielektroodide vahel.

Keevitamisega saab liita lahutamatuks tervikuks metallesemeid ning hõlpsalt valmistada keerukaid konstruktsioone (sildu, antennimaste jm.). Elekt-

rikeevituse vooluallika positiivne poolus ühendatakse keevitatavate metallesemetega ja negatiivne poolus — samast metallist valmistatud ning käepidemega varustatud vardakujulise keevituselektroodiga. Elektroodi kerge puudutamisega vastu keevitatavat eset tekitatakse sobivas kohas kaarleek. Leegis kuumenevad nii elektrood kui ka keevitatavad esemed ja sulavast elektroodist langevad metallitilgad moodustavad koos vedeldunud põhimetalliga nn. keevisõmbluse, mis pärast kaare katkestamist ning jahtumist liidab esemed tervikuks. Keevitamiseks kasutatakse ka vahelduvvoolu.

Kaarkeevituse kõrval kasutatakse *takistuskeevitust* punkt- ning joonkeevitusmasinate abil, mis liidavad kokku plekkesemeid ja valtsitud metalltooteid. Keevitatavate esemete servad surutakse vaheliti punktkeevitusmasina teravikukujuliste metallelektroodide vahele ning madalapingelise, kuid tugeva voolu hetkelisel sisselülitamisel eralduv soojus sulatab esemed selles punktis kokku. Joonkeevitamisel kasutatakse pöörlevaid kettakujulisi elektroode, millede vahelt tõmmatakse liidetavad esemed läbi.

§ 3. ELEKTRISOOJENDUSRIISTAD

Elektrienergiat soojuseks muundavates seadmetes kasutatakse küttekeha — takistit, mis koosneb kuumuskindlast isoleermaterjalist valmistatud alusele keritud takistustraadist. Viimane valitakse suure eritakistusega ning ta võib olla ringi- või ristkülikukujulise ristlõikega (ümar- või lapiktraat). Küttekehade takistustraat peab taluma temperatuure 600 kuni 900 kraadini ja olema võimalikult vastupidav oksüdeerumisele õhuhapniku toimel. Küttekehade traadi kasutatavamateks materjalideks on kroomnikkel, ferrokroom ja kantaal, isoleermaterjaliks — vilgukivi või magneesiumoksüüdi sisaldavad massid, portselan ja mõned teised tulekindlad keraamilised ained.

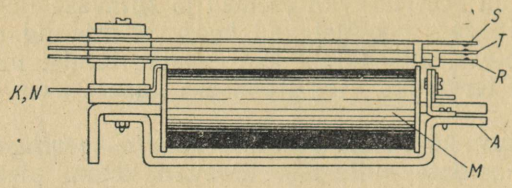
Küttekeha võimsus arvutatakse tuntud valemitega takistuse ja toitepinge kaudu, kusjuures takistuse väärtusena tuleb kasutada küttetraadi takistust k u u m a s olekus, s. t. tuleb arvestada takistuse temperatuuritegurit.

Küttetraadi koormatavus (voolutihedus) sõltub jahtumistingimustest.

§ 4. RELEED

Elektromehaaniline relee on elektrivoolu abil tüüritav lüliti, s. t. lülituselement, mis teostab ühe vooluringi voolu mõjul ümberlülitamisi teises, sellega mitteühendatud vooluringis. Releesid kasutatakse väga laialdaselt kaasaegses automaatikas, signaalseadmetes, sidetehnikas ja mujal, kus tuleb nõrkade voolude abil tüürida tugevaid voole või kõrgeid pingeid.

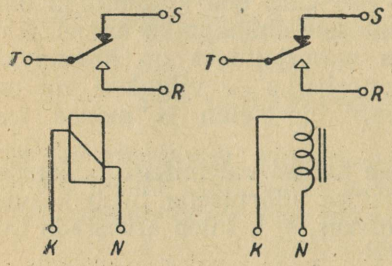
Alalisvoolude ja tehniliste vahelduvvoolude puhul kasutatakse niisuguste tüürimisseadmetena mitmesuguseid *elektromagnetilisi releesid,* mis suhteliselt väikese energiakulu juures tüürivad suuri energiahulki. Üks niisugune relee on kujutatud joonisel 13. 5. Elektromagnetilise relee skeemitähiseid näeme joonisel 13. 6.



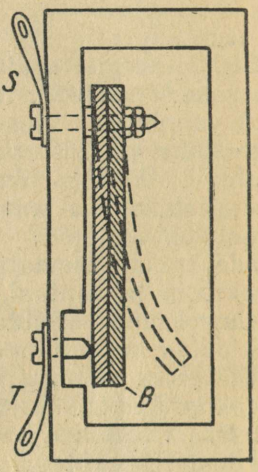
Joonis. 13. 5. Elektromagnetiline relee.

Elektromagneti *M* mähisesse juhitakse ühendusklemmide *K* ja *N* kaudu tüüriv vool. Kui see ületab teatud tugevuse, siis muutub elektromagneti tõmbejõud tugevamaks kontaktvedrukese *T* pingest ja pehmest terasest ankur *A* läheneb pooli raudsüdamikule. See omakorda sulgeb tugevvooluringi kontaktipaari *S* ja *T* ning avab kontaktipaari *R* ja *T*.

Alalisvooluga tüüritavad elektromagnetilised releed jagunevad



Joonis 13. 6. Elektromagnetilise relee skeemitähised.



Joonis 13. 7. Lahutava termorelee põhimõtteline ehitus.

neutraalseteks ja polariseeritud releedeks. Esimestes tekitatakse magnetväli ainult relee mähist läbiva voolu poolt ning ankur sooritab vajaliku lülitamisoperatsiooni tüürivvoolu suunast sõltumatult. Polariseeritud releedes kasutatakse elektromagnetit koos püsivmagnetiga. Nendega võib teostada kaht erinevat lülitamisoperatsiooni, sest ankur liigub nendes tüürivvoolu suunast olenevalt kas ühes või teises suunas ja suleb kummalgi juhul iseseisva

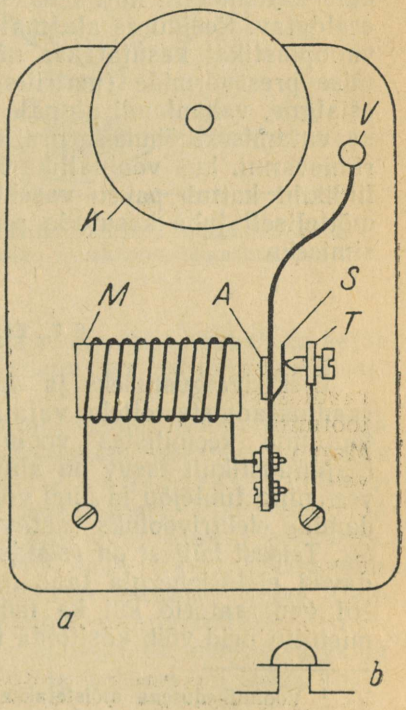
kontaktipaari. Polariseeritud releed on tundlikumad kui neutraalsed releed, s. t. vajavad käitamiseks väiksemat tüürivõimsust.

Arvukatest kasutuselolevatest releetüüpidest vaatleme veel *termoreleed*. Selle üks kontaktvedru on valmistatud bimetallist, s. o. kahest kokkukeevitatud või -needitud erineva soojuspaisumisega metallist plaadikesest (joonis 13. 7). Temperatuuri tõusmisel paindub bimetallvedru *B* kummagi metalli ebaühtlase paisumise tõttu ja sooritab vajaliku lülitamisoperatsiooni — näiteks avab tüüritava vooluringi kontaktid *S* ja *T*.

Raadiopraktikas vajatakse bimetall-termoreleesid trafode väljalülitamiseks juhul, kui lühise või kestvama ülekoormuse tõttu mähise temperatuur ületab lubatava suuruse. Selleks asetatakse trafo mähise kerimisel jäetud süvendisse väikesemõõtmeline termokontakt, mis ühendatakse primaarmähise vooluringi.

§ 5. HELISIGNAALSEADISED

Elektrilistest helisignaalseadistest kirjeldame kõlistit ja sumistit. *Elektrikõlisti* põhimõtteline ehitus ja skeemitähis on toodud joonisel 13. 8. Vool kulgeb läbi elektromagneti mähise *M* ning ankruga *A* liidetud katkesti kontaktide *S* ja *T*. Tekkiv magnetväli tõmbab ankru vastu elektromagneti südamikku, vasarake *V* lööb vastu kellukest *K*, kuid kontaktipaar *S* ja *T* lahutub. Vool katkeb, magnetväli lakkab ja ankur liigub vedru elastsuse tõttu algasendisse tagasi, taas vooluringi sulgedes. Vasar hakkab niiviisi pidevalt vibreerima ja tekitab helina. Harilikud tärinkõlistid tarbivad 4 kuni 8 voldi juures ligikaudu 1-amprilist alalis- või vahelduvvoolu.



Joonis 13. 8. Elektrikõlisti põhimõtteline ehitus (*a*) ja skeemitähis (*b*).

Sumisti omab sama ehitust kui tärinkõlisti, kuid temal puudub ankru külge kinnitatud vasarake ja kelluke. Ankru vibreerimine on siis kuulduv iseloomuliku suminana.

Elektrilistest signaalseadistest kasutatakse veel mitmesuguseid pasunaid (näiteks liiklusvahenditel), mis sarnanevad sumistiga, kuid omavad ankrut asendavat terasmembraani, mis annab tugevama heli.

§ 6. GALVANOTEHNIKA

Galvanotehnika hõlmab galvanosteegiat — metallesemete elektrokeemilist katmist teise metalli kihiga, galvanoplastikat — metallist koopiate ja vormide valmistamist, ning elektrolüüsi — mitmesuguste keemiliste ainete puhastamist mittevajalikest lisanditest.

Galvanosteegias sadestatakse sobivasse elektrolüüti asetatud metallesemele elektrolüüsi teel vajaliku metalli kiht. Galvaniseerimisvann täidetakse elektrolüüdiga (nikeldamisel nikkelammooniumsulfaadi lahusega, vasetamisel vasksulfaadi lahusega, hõbetamisel kloorhõbeda ja kaaliumtsüaniidi lahusega) ning sellesse paigutatakse madalapingelise alalisvooluallika negatiivse poolusega ühendatud metallese, mille pind kuulub katmisele. Vooluallika positiivne poolus ühendatakse vanni teise elektroodiga, mis üldreeglina on sellest metallist, millega ese kaetakse. Vannile rakendatav pinge on 0,5 kuni 10 volti ja voolutihedus [1] nikeldamisel 0,3 A/dm^2, vasetamisel 1 ... 6 A/dm^2 ning hõbetamisel kuni 0,3 A/dm^2.

Galvanoplastika toimub üldiselt samuti kui galvanosteegia, kuid kattemetalli kiht tehakse paksem ja alusmaterjalist kergesti eraldatav. Seejuures alusmaterjal ei tarvitse olla elektrijuht. Galvanoplastikat kasutatakse näiteks grammofoniplaatide paljundamise pressvormide (matriitside) valmistamisel. Selleks kaetakse esialgne, vahaplaadi pinnale lõigatud fonogramm elektrijuhtivuse saavutamiseks õhukese grafiidikihiga ning asetatakse galvaniseerimisvanni, kus vooluallika negatiivse poolusega ühendatud grafiidikiht kattub paksu vasekihiga. Saadavat matriitsi võib põhimõtteliselt juba kasutada plastmassist grammofoniplaatide pressimiseks.

§ 7. ELEKTRIMASINAD

Elektrivalgustuseks ja -kütteks ning loendamatute elektri- ja raadioseadmete toiteks vajatakse suuri elektrienergia hulki, mille tootmine keemilistes vooluallikates oleks äärmiselt kulukas. Majanduslikult tasuv on ainult odava mehaanilise energia, nagu vee- ning tuulejõu ja ühel või teisel viisil toodetud aurujõu muundamine elektrivooluks vastavates elektrimasinates — *generaatorites*. Teisest küljest on asendamatud ka elektrimasinad, mis muundavad elektrienergia taas mehaaniliseks energiaks — *mootorid*. Nii generaatorid kui ka mootorid ehitatakse täiesti sarnastena, mistõttu neid võib käsitleda ühiselt.

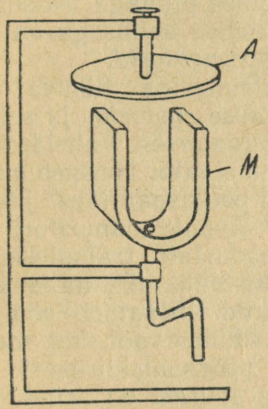
---

[1] Voolutihedusena mõistetakse siin voolu amprites elektrokeemiliselt kaetava eseme pinna iga ruutdetsimeetri kohta.

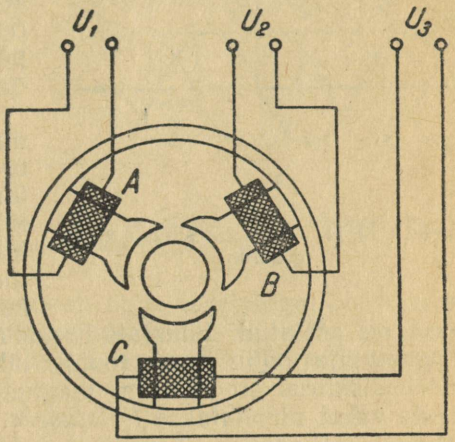
§ 8. VAHELDUVVOOLUMASINAD

Vahelduvvoolumasinad jagunevad asünkroon- ja sünkroonmasinateks. Kummagi tüübiga puutub raadioamatöör kokku peamiselt magnetofonide ja elektrigrammofonide juures.

Vahelduvvoolumasinate tööprintsiibiga tutvumiseks vaatleme esmalt üht füüsikalist nähtust, mis põhineb elektromagnetilisel induktsioonil. Püsttelje ümber pöörelda võiva vask- või alumiiniumketta *A* lähedusse on vastavalt joonisele 13. 9 asetatud samuti pöörelda võiv hobuseraua-kujuline püsivmagnet *M*. Ketta ja magneti pöörlemisteljed ühtivad, kuid nad pole omavahel mehaaniliselt seoses. Kui nüüd magnet pöörlema panna, siis hakkab ka ketas pöörlema samas suunas, kuigi viimane on mittemagnetilisest materjalist.



Joonis 13. 9. Asünkroonmootori talitluspõhimõte.



Joonis 13. 10. Pöörleva magnetvälja tekitamine vahelduvvoolumasinates.

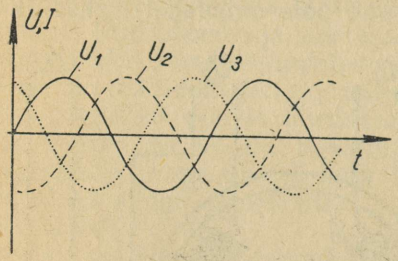
Kirjeldatud nähtuse selgitamine on lihtne. Koos magnetiga pöörlev magnetväli indutseerib metallkettas pöörisvoolu, mille tugevus oleneb magnetvälja (magneti) s u h t e l i s e s t pöörlemiskiirusest ketta suhtes, s. o. kiiruste vahest. Pöörisvoolu ja pöörleva magnetvälja koosmõjul hakkab ketas samuti pöörlema.

On ilmne, et ketta pöörlemiskiirus peab jääma väiksemaks magnetvälja kiirusest, sest nende kiiruste ühtimisel ketas magnetvälja suhtes ei liiguks ning pöörisvoolu ei indutseeruks. Pöörisvool kettas on seda tugevam, mida suurem on magnetvälja ja ketta pöörlemiskiiruste vahe, s. t. mida rohkem on ketta liikumine mehaaniliselt pidurdatud.

Pöörlevat magnetvälja kasutatakse peaaegu kõikide vahelduvvoolumasinate juures. Vahelduvvoolugeneraatorites tekitatakse

pöörlev magnetväli tõepoolest pöörlevate püsiv- või elektromagnetite abil, kuid mootorites on rakendatud teisi põhimõtteid.

Kui asetada malmist silindrisse vastavalt joonisele 13. 10 kolm pehmest terasest (trafoplekkidest) elektromagnetit *A*, *B* ja *C* ning neid toita kolmefaasilisest vooluvõrgust kolme võrdse sagedusega ja võrdse tugevusega vahelduvvooluga, millede ajaline kulgemine toimub 120-kraadise faasinihkega (joonis 13. 11), siis tekib pooluste vahelises alas ühtlase tugevusega pöörlev magnetväli. Viimane võib endaga kaasa haarata mistahes metallist silindri, kui see asetada vabalt pöörelda võivana pooluste vahele nii, et pöörlemistelg jääks risti joonise pinnaga. Niisuguse põhimõttelise ehitusega on kõik *asünkroonmootorid*.



Joonis 13. 11. Kolmefaasilise voolu graafik.

Elektrimasina liikuvat osa nimetatakse *rootoriks* ja seisvat osa — *staatoriks*. Vahelduvvoolumasina staator koosneb malmkestast, pooluspaaridest ja mähistest. Asünkroonmootori rootori moodustab trafoplekkidest koostatud südamik, mille uuretesse on asetatud lühistatud mähisekeerud. Staatori pöörleva magnetvälja mõjul ilmub rootori lühiskeerdudes vool, kui rootori pöörlemiskiirus on väiksem magnetvälja pöörlemiskiirusest. Viimaste vahet nimetatakse *libistuseks*. Mida suurem on asünkroonmootori mehaaniline koormus, seda aeglasemalt pöörleb rootor ning seda suurem on libistus ja vool rootori lühiskeerdudes.

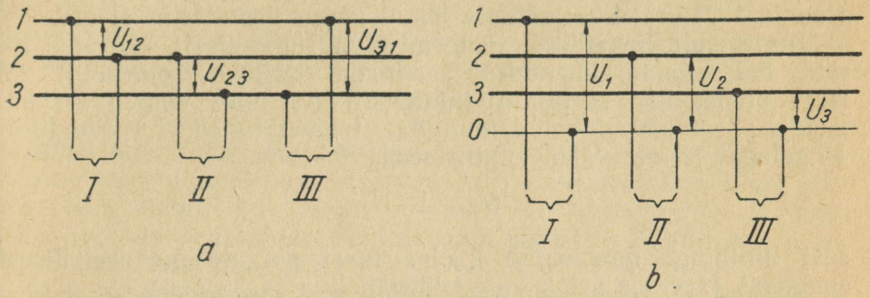
Asünkroonmootori rootori lühiskeerud on suuremate võimsuste puhul valmistatud isoleerimata vasktraatidest, millede otsad on omavahel ühendatud kahe lühistava vaskrõngaga. Väiksemate asünkroonmootorite rootorite uurded valatakse lihtsalt alumiiniumi täis, mis siis moodustab nagu süsteemi omavahel lühistatud voolujuhtmetest.

Pöörleva magnetvälja saamiseks vahelduvvoolumootorites tuleb neid toita kas kolmefaasilisest (keerdvoolu-) võrgust või hariliku vahelduvvoolu puhul — faasinihet tekitavate lisaseadiste kaudu.

Kolmefaasiline süsteem, mille töötas välja suur vene elektrotehnik M. O. Dolivo-Dobrovolski 1889. aastal, leiab rea tugevvoolutehniliste eeliste tõttu kasutamist eranditult igas ulatuslikus vahelduvvoolu-energiavõrgus. Selles süsteemis ühendab generaatorit tarbijaga kolm juhet või kolm juhet ning üks nulljuhe. Neid kolme juhet nimetatakse faasijuhtmeteks. Faasijuhtmed moodustavad paarikaupa või ka nulljuhtme suhtes üksikult justkui kolm iseseisvat lihtsat kahejuhtmelist süsteemi (joonis 13. 12).

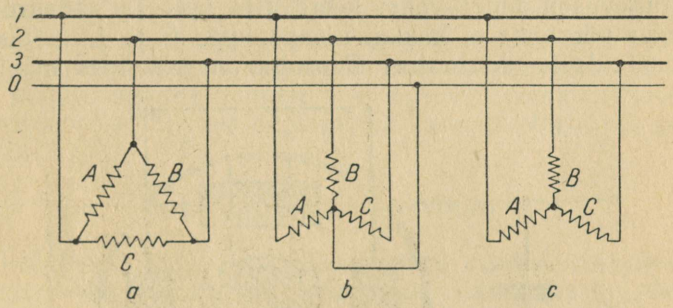
Kahe faasijuhtme vahelised pinged ehk *liinipinged* U_{12}, U_{23} ja

U_{31} (indeksid tähistavad, milliste faasijuhtmete vahel vastav pinge mõjub) ning ühe faasijuhtme ja nulljuhtme vahelised pinged ehk *faasipinged* U_1, U_2 ja U_3 on omavahel faasis nihutatud 120 kraadi võrra. Kui mingil hetkel üks nendest pingetest — näiteks U_1 — on positiivsesuunaliselt maksimaalne, siis samal ajal on ülejäänud kaks pinget — seega U_2 ja U_3 — negatiivsed (joonis 13. 11).



Joonis 13. 12. Liinipinged nulljuhtmeta (*a*) ja faasipinged nulljuhtmega (*b*) kolmefaasilises elektrivõrgus.

Liinipingete üldiseks tähiseks on U_l ja faasipingel U_f. Niinimetatud sümmeetrilistes keerdvoolusüsteemides on kõik liinipinged U_{12}, U_{23} ja U_{31} omavahel võrdsed, samuti ka kõik faasipinged U_1, U_2 ja U_3.



Joonis 13. 13. Kolmnurklülituses (*a*), nulljuhtmega tähtlülituses (*b*) ning nulljuhtmeta tähtlülituses (*c*) kolmefaasilise elektriseadme ühendamine keerdvooluvõrku.

Kolmefaasilisest võrgust toidetava vahelduvvoolumootori staatoril on kolm, kuus, üheksa või enam pooluspaari, mille mähised ühendatakse järjekorras iga faasiga. Kuna kolmefaasilises süsteemis on faasivoolude (ka liinivoolude) vahel 120-kraadised faasinihked, siis ilmub mootori staatoris ühtlaselt pöörlev magnetväli.

Mähiste ühendusviise on põhiliselt kaks: kolmnurk- ja täht-

ühendus. *Kolmnurkühenduse* puhul ühendatakse esimese mähise lõpp teise algusega, selle lõpp kolmanda algusega ja kolmanda lõpp esimese algusega. Mähiste ühenduspunktid ühendatakse faasijuhtmetega (joonis 13. 13-*a*). *Tähtühenduse* puhul ühendatakse kõikide mähiste lõpud omavahel kokku ja iga mähise algust toidetakse vastavalt ühest faasijuhtmest (joonis 13. 13-*b* ja *c*). Nulljuhtmega tähtühenduse puhul on mähiste lõpud ühendatud võrgu nulljuhtmega. Sageli kasutatakse ka nulljuhtmeta tähtühendust (joonis 13. 13-*c*), kus mähiste lõpud võrku ühendatud ei ole.

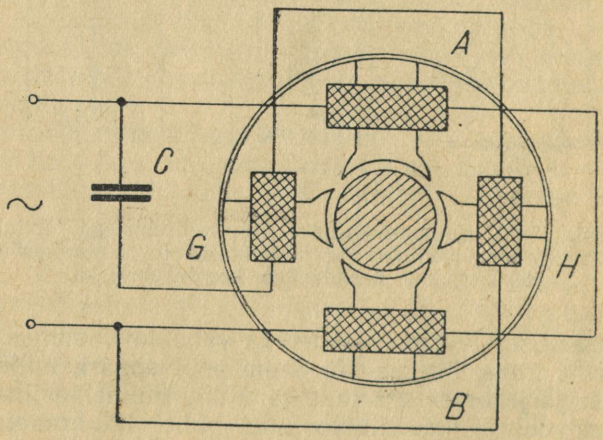
Kuna kolmefaasilisse süsteemi võib üheaegselt lülitada nii täht- kui kolmnurkühenduses seadmeid (näiteks mootoreid) või isegi ühefaasilisi tarbijaid (näiteks hõõglampe, soojendusseadmeid), siis tuleb siinkohal mainida, et faasipinged ei võrdu liinipingetega. Nende vahel kehtib seos:

$$U_l = 1{,}71 U_f,$$

sest liinipinge moodustub k a h e faasi pingete geomeetrilisest summast (arvesse tuleb ka nendevaheline faasinihe!).

Kasulik on meeles pidada, et 380-voldise liinipingega keerdvoolusüsteemides on faasipingeks 220 volti ja 220-voldise liinipingega süsteemide faasipinge on 127 volti.

Ühefaasilise vahelduvvoolumootori staatoris tekitatakse pöörlev magnetväli kondensaatori kaudu toidetava lisamähise abil. Niisuguse mootori staator sisaldab kaht mähistega varustatud pooluspaari (joonis 13. 14). Peapooluste *A* ja *B* mähiste ühendamisel vahelduvvooluvõrku tekkiv vahelduv magnetväli osutub ainult tugevuselt muutuvaks; keerdvälja pole ja asünkroonmootori rootor pöörlema ei hakka. Lisapooluste *G* ja *H* mähiste pingestamisel üle kondensaatori *C* osutub vool nendes mähistes ja



Joonis 13. 14. Lisapoolustega ühefaasiline asünkroonmootor.

samuti ka nende magnetväli teataval määral faasis nihutatuks peapooluste magnetvälja suhtes. Kahe välja koosmõjul ilmub poolustevahelises ruumis ka pöörlev magnetväli, mis on suuteline rootorit kaasa haarama.

Rootori pöörlemissuuna muutmiseks tuleb muuta voolu suunda lisapooluste mähistes või kolmefaasilise mootori puhul vahetada omavahel kaks toitejuhet.

Sünkroonmootor ei erine staatori osas asünkroonmootorist, kuid rootoriks on temal püsiv- või elektromagnet. Kui see panna mõne välise jõu abil vajaliku kiirusega pöörlema ja pingestada staatori mähised, siis jääb rootor mootorisse juhitava elektrienergia arvel pöörlema ning võib anda mehaanilist energiat.

Et sünkroonmootori rootor on magnet, siis järgneb ta täpselt staatori pöörlevale magnetväljale, s. t. libistust ei esine. Tekkiv nähtus on analoogiline olukorraga, kui joonisel 13. 9 esitatud näites oleks metallketas asendatud teise püsivmagnetiga. Esimese püsivmagneti pöörlemisel hakkab tema pöörlev väli enesega kaasa vedama ka teist magnetit.

Kui sünkroonmootori rootorit ülemääraselt pidurdada (nii, et ta jääb maha staatori pöörlevast magnetväljast), siis mootor peatub. Taas käivitamiseks peab mootorile esialgu andma mingil viisil normaalse pöörlemiskiiruse — sünkroonmootor pole isekäivituv voolu sisselülitamisel.

Leidub ka sünkroonmootoreid, mis käivituvad asünkroonselt, s. o. pöörisvoolude tekkimise arvel rootoris. Kui sellise mootori rootor on omandanud küllaldase pöörlemiskiiruse, siis edasi töötab ta juba sünkroonmootorina, s. o. ilma libistuseta.

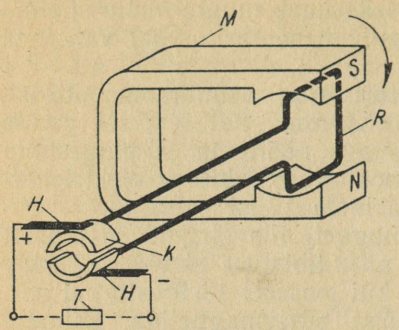
Kui normaalsetes piirides koormatud sünkroonmootori pöörlemiskiirus sõltub vaid tema ehitusest (pooluspaaride arvust staatoril ja rootoril) ning toitva voolu sagedusest, siis asünkroonmootori puhul lisandub nendele veel sõltuvus mehaanilisest koormusest mootori võllil. See ongi nende kahe mootoritüübi põhiline erinevus.

§ 9. ALALISVOOLUMASINAD

Kõiki alalisvoolumasinaid iseloomustab nendes esinevate elektrilis-magnetiliste protsesside pööratavus: sama masin võib töötada generaatorina, kui välise jõu mõjul panna pöörlema tema rootor, ja mootorina, kui temasse juhtida elektrienergiat väljastpoolt.

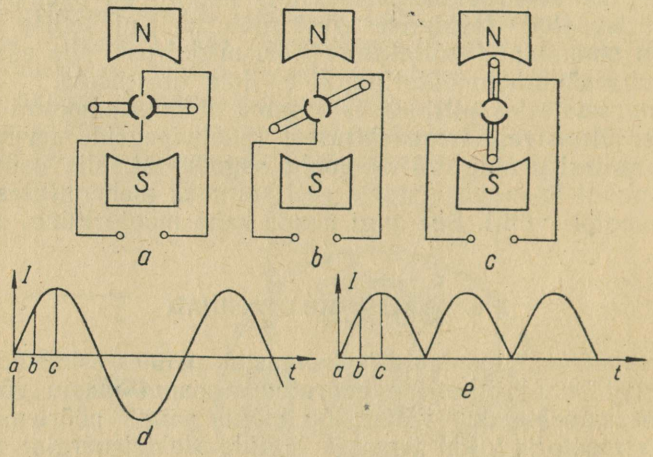
Lihtsaima alalisvoolugeneraatori põhimõtet selgitab joonis 13. 15. Püsivmagneti *M* pooluste *N* ja *S* vahelises enam-vähem ühtlases magnetväljas pannakse välise mehaanilise jõu poolt pöörlema traatraam *R*, mille otsad on ühendatud pöörlemisteljel asuva *kommutaatori K* poolsilindriliste vasklamellidega. Kommutaatorit puudutavad liugkontaktid — grafiidist *harjad H* — ühendavad raami välise vooluringiga — tarbijaga *T*.

Raami pöörlemisel näiteks päripäeva tekib selle külgedes induktsiooni elektromotoorne jõud. Voolu suuna määramise reegli kasutamisel selgub, et ülemise magnetipooluse *S* all paremale liikuvasse raami külge indutseeruv elektromotoorne jõud on suunatud joonise poolt vaatleja poole ja alumise pooluse *N* kohal vasakule liikuvasse raami külge indutseeruv elektromotoorne jõud on suunatud vaatleja poolt joonise poole. Seega osutub kommutaatori ülemine lamell positiivseks ja alumine negatiivseks. Voolu suund raamikese külgedes muutub vastavalt sellele, kas see liigub magnetväljas paremale või vasakule.



Joonis 13. 15. Alalisvoolumasina põhimõtteline ehitus.

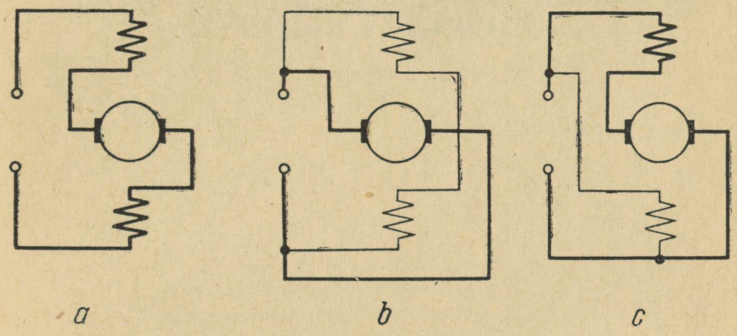
Raami pöörlemisel ei muutu voolu suund välises vooluringis ja tarbijas tänu kommutaatorile ning harjadele. Niipea kui raam on pöördunud rõhtsaks ja senine ülemine raami külg, mis seni läbis magnetvälja vasakult paremale, hakkab liikuma all tagasi



Joonis 13. 16. Elektromotoorse jõu indutseerimine ja kommutaatori talitluspõhimõte lihtsaimas alalisvoolumasinas.

vasakule, vahetuvad ka harjadega kokkupuutuvad kommutaatori lamellid. Uus ülemine raami külg saab taas ühendatuks ülemise harjaga ning alustab jällegi liikumist magnetväljas vasakult paremale. Ülemine hari jääb seega ka edaspidi positiivseks ja vool välises vooluringis ühesuunaliseks.

Raamilt harjade kaudu saadav elektromotoorne jõud pole püsiv, vaid pulseerib kirjeldatud generaatori puhul nulli ning maksimaalväärtuse vahel. See asjaolu seletub raami pöörlemisega magnetväljas (joonis 13. 16). Esimesel juhul (*a*) liigub raami kumbki külg magnetvälja praktiliselt mitte lõigates (joonisel noolte suunas) p i k i välja suunda, mistõttu elektromotoorset jõudu ei indutseeru. Järgneval hetkel (*b*) on raam pisut pöördunud ja ta küljed liiguvad magnetvälja suhtes poolviltu, viimast juba pisut lõigates ja elektromotoorset jõudu tekitades. Kolmandaks hetkeks (*c*) on raam pöördunud täpselt pooluste kohale, mis puhul raam liigub risti magnetväljaga. Seepärast on ka raami selles asendis indutseeruv elektromotoorne jõud suurim. Raamis indutseeritava elektromotoorse jõu graafik omandab siinusjoone kuju, s. t. on vahelduvvool (joonisel 13. 16-*d* on märgitud raami



Joonis 13. 17. Järjestikku- (*a*), rööbiti- (*b*) ja segaergutusega (*c*) alalisvoolumasinad.

asenditele vastavad punktid *a*, *b* ja *c*). Välises vooluringis kulgev pulseeriv alalisvool on kujutatud joonisel 13. 16-*e*.

Alalisvoolugeneraatorist saadava voolu pulseerimise vähendamiseks suurendatakse raamide ja kommutaatori lamellide arvu; pinge tõstmiseks keritakse iga raam poolina ja kasutatakse trumlikujulist trafoplekkidest rootorit, mille uuretesse paigutatakse mähised. Ferromagnetilisest materjalist rootor suurendab magnetvälja tihedust pooluste vahelises alas ja seega tõstab indutseeruvat elektromotoorset jõudu.

Tugeva magnetvälja loomiseks varustatakse staatorid mitte püsiv-, vaid elektromagnetitega. Alalisvoolumasina magnetite süsteem võib omada üks, kaks, kolm, neli või enam pooluspaari. Staatori pooluspaaride mähised ühendatakse kas järjestikku (joonis 13. 17-*a*) või rööbiti (*b*). Esimesel juhul on tegemist peavoolumasinaga ja teisel juhul haruvoolumasinaga. Palju kasutatakse kombineeritud ergutusviisi (*c*) — staator varustatakse kahe mähisega, millest üks toimib järjestikusena ja teine rööbitisena (kom-

paundmasinad). Kompaundgeneraatori pinge on vähe sõltuv koormusvoolust ja kompaundmootori pöörlemiskiirus on vähe sõltuv mehaanilisest koormusest võllil.

Alalisvoolumootorid ei erine ehituselt millegagi sama liiki generaatoritest. Ka on nende ergutusmähiste lülitusskeemid analoogilised: eristatakse peavoolu-, haruvoolu- ja kompaundmootoreid (joonis 13. 17).

Alalisvoolumootoris ilmub rootori mähiseid läbiva voolu ja staatori magnetvälja koosmõjul mehaaniline jõud. Rootor hakkab kindlas suunas pöörlema tänu kommutaatori olemasolule.

Mootori rootori pöörlemissuund oleneb voolude omavahelisest suunast rootori ja staatori mähistes. Pöörlemissuuna muutmiseks ei piisa vooluallika pooluste ümbervahetamisest, sest siis muutuksid nii rootori kui ka staatori magnetväljade suunad; selleks tuleb voolu suunda muuta kas staatoris või siis rootoris.

II OSA

RAADIOTEHNIKA

14. PEATÜKK

VÕNKERINGID

§ 1. ELEKTROMAGNETILISED LAINED

Raadioside on elektromagnetiliste lainete vahendusel teostatav traadita side raadiosaatja ja ühe või mitme raadiovastuvõtja vahel. Saateseadmes toodetakse küllaldase võimsusega kõrgsagedusliku vahelduvvoolu ja juhitakse see saateantenni. Antenni ümber tekkivad võnkumise rütmis kiiresti vahelduvad elektri- ja magnetväljad moodustavad ühise elektromagnetilise välja. See levib antenni ümbritsevas ruumis valguse kiirusega (300 000 000 meetrit sekundis) ja moodustab *elektromagnetilise* ehk *raadiolaine.*

Mitte kõiki elektromagnetilisi laineid ei saa lugeda raadiolaineteks. Näiteks on soojuskiirgus ja nähtav valgus, gammakiired (liik radioaktiivset kiirgust) ning röntgenikiired samuti elektromagnetilised lained.

Laineid iseloomustavaks põhisuuruseks on lainepikkus. Selle all mõistetakse mingites pikkusühikutes määratavat vahemaad, mille laine läbib võnkumise ühe perioodi vältel. Lainepikkus λ (kreeka täht «lambda») on võrdne laine levimiskiiruse $c = 300\,000\,000$ m/sek ja perioodi T korrutisega:

$$\lambda = cT.$$

Elektromagnetilise laine pikkust ja kõrgsagedusvoolu võnkesagedust seob valem:

$$\lambda_{(m)} = \frac{c_{(m/sek)}}{f_{(Hz)}}.$$

Orienteerumiseks on kasulik meeles pidada, et lainepikkusele 300 meetrit vastab 1-megahertsine võnkesagedus.

Raadiotehnikas kasutatavate lainepikkuste liigitamise kohta kehtib üleliiduline standard (OCT 7768), mis on antud tabelis 7.

Ringhäälingusaatjad töötavad peamiselt kesk- ja lühilaine piirkondades. Lühilainetel on eraldatud veel laineribad laevade

Tabel 7

Raadiotehnilised lainepiirkonnad

Lainepikkus m	Sagedus MHz	Laineala nimetus	
Üle 3000	alla 0,1	pikklained	
3000—200	0,1—1,5	kesklained [1]	
200—50	1,5—6,0	vahelained	
50—10	6,0—30	lühilained	
10—1	30—300	meeterlained	
1—0,1	300—3 000	detsimeeterlained	ultralühilained
0,1—0,01	3 000—30 000	sentimeeterlained	ultralühilained

ning lennukite raadiosideks, amatöörsaatjatele ja paljuks muuks. Ultralühilaineribades töötavad televisioonisaatjad, ringhäälingujaamad, amatöörsaatjad jt.

Saateantenni juhitud kõrgsagedusvoolu poolt ruumis tekitatavad raadiolained lõikavad oma levikul vastuvõtuantenni ja indutseerivad selles elektromotoorse jõu. Kuna aga üheaegselt tegutseb tohutu arv raadiosaatjaid, siis peab iga raadiovastuvõtja sisaldama seadet, mis võimaldaks eraldada kõigist antenni saabuvatest signaalidest vajalikke. Seda ülesannet täidab võnkering.

§ 2. VÕNKERING; VABAVÕNKUMINE

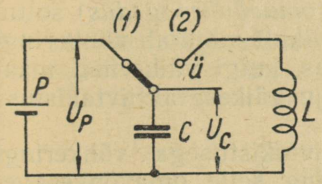
Kondensaatori tühjenemisel läbi väikest aktiivtakistust omava induktsioonipooli tekib vooluringis elektriline võnkumine. Seepärast nimetataksegi kondensaatorist ja poolist koosnevat lülitust *võnkeringiks*. Elektriliste nähtuste selgitamiseks võnkeringis koostame joonisel 14. 1 kujutatud lülituse alalispingeallikast *P*, kondensaatorist *C*, endainduktsioonipoolist *L* ja ümberlülitist *Ü*. Algul, kui ümberlüliti on seisus *1*, osutub kondensaatori kumbki plaat ühendatuks pingeallika vastavate klemmidega ning kondensaator laadub.

Nüüd lahutame kondensaatori ümberlüliti abil pingeallikast. Kondensaatoris säilib teatav energiahulk elektrilaenguna ja plaatidevaheline pinge jääb püsima. Ümberlüliti viimisel seisu *2* moodustub kondensaatorist ja poolist võnkering ning kondensaatorisse salvestunud laeng kutsub esile voolu endainduktsioonipoolis.

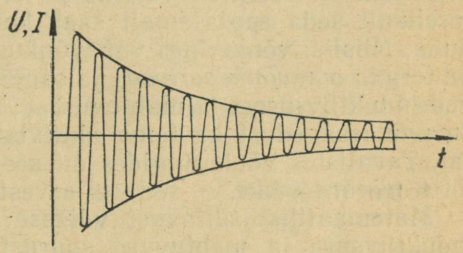
Vool poolis tugevneb ja kondensaatori laeng ning plaatide

[1] Ringhäälingusaadeteks tavaliselt pikki laineid üle 2000 m ei kasutata ja seetõttu loetakse ringhäälingutehnikas pikklaineks lainepikkused vahemikus 600 kuni 2000 m ja kesklaineks — vahemikus 180 kuni 600 m.

vaheline pinge kahanevad. Vool osutub maksimaalseks hetkel, millal pinge U_C on muutunud nulliks, s. o. kui kondensaator on täielikult tühjenenud. Kondensaatorisse esialgselt salvestunud energia on nüüd üle läinud pooli ümbritsevasse magnetvälja, mis tekib koos vooluga. Vaatamata kondensaatori täielikule tühjenemisele ei katke veel vool. Vool hakkab küll nõrgenema, kuid see tekitab omakorda poolis endainduktsiooni elektromotoorse jõu, mis Lenzi reegli kohaselt takistab voolu kahanemist. Endainduktsiooni elektromotoorne jõud ilmub pooli magnetvälja salvestunud energia arvel ja põhjustab nüüd kondensaatori ümberlaadimist — ta nagu «pumpab» elektrone võnkeringis endises suunas edasi.



Joonis 14. 1. Lülitus kondensaatori laadimiseks alalispingeallikast ning tühjendamiseks läbi induktsioonipooli.



Joonis 14. 2. Kustuva võnkumise pinge- või voolugraafik.

Magnetväli ja vool nõrgenevad vastavalt sellele, kuidas kondensaatori pinge kasvab, ning lõpuks laadub kondensaator uuesti, kuid eelmisele laengule vastupidises suunas. Kondensaatori laadimisprotsess kestab kuni magnetvälja salvestunud energia on täielikult kulutatud uue elektrivälja moodustamiseks kondensaatoris. Kui võnkeringis puuduksid energiakaod (peamiselt kaod pooli ja ühendusjuhtmete aktiivtakistusel), siis laaduks kondensaator täpselt endise pingeni ja kirjeldatud protsess — energia vahelduv üleminek elektriväljast magnetvälja ja tagasi — hakkaks perioodilise võnkumisena korduma lõpmatuseni. Sellisel puhul ilmneks võnkeringis *kustumatu* ehk *mittesumbuv võnkumine.*

Tegelikult võib üksiku energiatõuke (vaadeldaval juhul kondensaatori alglaengu) tagajärjel tekkida võnkeringides paratamatult esinevate energiakadude tõttu ainult *kustuv* ehk *sumbuv võnkumine,* sest võnkuva energia hulk väheneb järjekindlalt igal poolperioodil ja iga järgnev pingeamplituud on eelnevast mõnevõrra väiksem.

Võnkeringis ilmnevat võnkumisprotsessi võib kujutada graafiliselt (joonis 14. 2), kui rõhttelg valida ajateljeks ning püsttelje kanda voolu või pinge väärtused. Kuna niisuguses võnkeprotsessis esinevad vahelduvad pinged ja voolud, siis kantakse

leppeliselt positiivseks loetud pinged ja voolud rõhtteljest ülespoole ning vastassuunalised voolud ja pinged sellest teljest allapoole.

Protsessi, kus võnkeringi viidud energia hakkab perioodiliselt kondensaatori elektriväljast kanduma pooli magnetvälja ja tagasi, nimetatakse võnkeringi *vabavõnkumiseks*. Vabavõnkumise periood sõltub võnkeringi kondensaatori laadimise ja tühjenemise kiirusest. Mida suurem on kondensaator, seda kauemini ta tühjeneb ja laadub antud tingimustes ning seda pikemaks kujuneb võnkumise periood. Teisest küljest aga takistab kondensaatori laengu kiiret muutumist pooli endainduktsioon. Mida suurem see on, seda aeglasem on voolu kasvamine ja kahanemine võnkeringis ning järelikult seda aeglasemalt saab kondensaator tühjeneda ja laaduda. Niisiis: võnkeringi vabavõnkumise periood (rohkem levinud on termin *omavõnkeperiood*) ja sagedus (*omavõnkesagedus*) sõltuvad induktiivsusest ja mahtuvusest. Tegelikult mõjutab võnkeringi omavõnkesagedust ka tema aktiivtakistus, kuigi väiksemal määral. Tavalistes võnkeringides on see mõju väikese aktiivtakistuse tõttu niivõrd väike, et seda ei arvestata.

Matemaatilist sõltuvust väikese aktiivtakistusega võnkeringi induktiivsuse ja mahtuvuse suuruste ning selle omavõnkesageduse f_0 või omavõnkeperioodi T_0 vahel väljendavad järgmised valemid:

$$f_{0(\mathrm{Hz})} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{(\mathrm{H})} \cdot C_{(\mathrm{F})}}} \quad \text{ja} \quad T_{0(\mathrm{sek})} = 2\pi\sqrt{L_{(\mathrm{H})} \cdot C_{(\mathrm{F})}}.$$

Praktiliseks kasutamiseks sobivamad on esimese valemi teisendid:

$$f_{0(\mathrm{kHz})} = \frac{159000}{\sqrt{L_{(\mu\mathrm{H})} \cdot C_{(\mathrm{pF})}}} \quad \text{ja} \quad f_{0(\mathrm{kHz})} = \frac{5030}{\sqrt{L_{(\mathrm{mH})} \cdot C_{(\mathrm{pF})}}}.$$

Võnkeringi induktiivsus leitakse omavõnkesageduse ja mahtuvuse kaudu järgmiste valemitega: [1]

$$L_{(\mu\mathrm{F})} = \frac{253 \cdot 10^8}{f_{0(\mathrm{kHz})}^2 \cdot C_{(\mathrm{pF})}}; \quad L_{(\mathrm{mH})} = \frac{253 \cdot 10^5}{f_{0(\mathrm{kHz})}^2 \cdot C_{(\mathrm{pF})}}$$

ja

$$C_{(\mathrm{pF})} = \frac{253 \cdot 10^8}{f_{0(\mathrm{kHz})}^2 \cdot L_{(\mu\mathrm{H})}}; \quad C_{(\mathrm{pF})} = \frac{253 \cdot 10^5}{f_{0(\mathrm{kHz})}^2 \cdot L_{(\mathrm{mH})}}.$$

Võnkeringi omavõnkeperioodi või -sageduse kaudu saab leida sellele vastava lainepikkuse:

$$\lambda_{0(\mathrm{m})} = cT_{0(\mathrm{sek})} = \frac{c}{f_{0(\mathrm{Hz})}},$$

kus c on laine levimiskiirus (vabas ruumis ja ka ioniseerimata

[1] Meenutame, et arvu 10 astendaja määrab nullide arvu:
$10^8 = 100\,000\,000$ ja $10^5 = 100\,000$.

atmosfääris 300 000 000 m/sek). Lainepikkuse vahetuks määramiseks võnkeringi elektrilistest suurustest sobivad järgmised praktilised valemid:

$$\lambda_{0(m)} = 1{,}885\sqrt{L_{(\mu H)} \cdot C_{(pF)}} \text{ ja } \lambda_{0(m)} = 59{,}6\sqrt{L_{(mH)} \cdot C_{(pF)}}.$$

Võnkeringi induktiivsuse leidmine omalaine ja mahtuvuse kaudu või mahtuvuse leidmine omalaine ja induktiivsuse kaudu toimub järgmiste valemitega:

$$L_{(\mu H)} = \frac{0{,}281 \cdot \lambda_0^2{}_{(m)}}{C_{(pF)}}; \quad L_{(mH)} = \frac{281 \cdot \lambda_0^2{}_{(m)}}{10^6 \cdot C_{(pF)}}$$

ja

$$C_{(pF)} = \frac{0{,}281 \cdot \lambda_0^2{}_{(m)}}{L_{(\mu H)}}; \quad C_{(pF)} = \frac{281 \cdot \lambda_0^2{}_{(m)}}{10^6 \cdot L_{(mH)}}.$$

Näide. Määrata võnkeringi omavõnkesagedus, kui tema induktiivsus on 20 μH ja mahtuvus 50 pF.

Vastavast valemist

$$f_{0(kHz)} = \frac{159\,000}{\sqrt{L_{(\mu H)} \cdot C_{(pF)}}} = \frac{159\,000}{\sqrt{20 \cdot 50}} = \frac{159\,000}{\sqrt{1000}}.$$

Raamatu lisas toodud ruutjuurte tabelist leiame, et $\sqrt{1000} \approx$ $\approx 31{,}6$. Niisiis

$$f_0 = \frac{159\,000}{31{,}6} \approx 5000 \text{ kHz} = 5 \text{ MHz}.$$

Näide. Määrata 465-kilohertsise omasagedusega võnkeringi pooli induktiivsus, kui kondensaatori mahtuvus on 180 pikofaradit. Pooli keerdude vahelist lisamahtuvust mitte arvestada.

$$L_{(\mu H)} = \frac{253 \cdot 10^8}{f_0^2{}_{(kHz)} \cdot C_{(pF)}} = \frac{253\ 10^8}{465^2 \cdot 180} = 470 \ \mu H.$$

§ 3. SUNDVÕNKUMINE

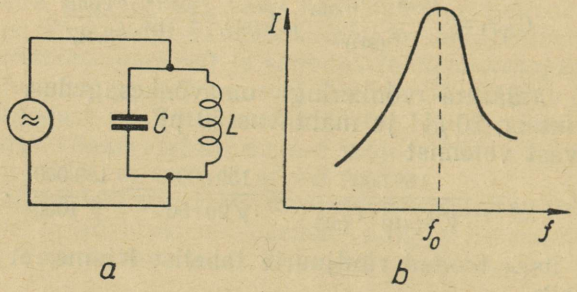
Igas vabalt võnkuvas võnkeringis väheneb kadude tõttu pidevalt pinge ja vool ning energia ühekordse viimisega sellesse pole võimalik saada kestvat mittesumbuva amplituudiga võnkumist. Vabavõnkumise sumbumist põhjustab pooli ja ühendusjuhtmete aktiivtakistuse kõrval ka võimsuskadu isolatsioonis — nn. *dielektrikuskadu*, *pöörisvoolude* tekkimine võnkeringi magnetvälja piirkonnas asuvates elektrijuhtides ning energia *kiirgamine* ümbritsevasse ruumi elektromagnetilise väljana. Võnkeringi võimsuskaod suurenevad sageduse kasvamisel.

Vabavõnkumine sumbub seda kiiremini, mida suuremad on võnkeringi energiakaod. Kui viimased on väga suured, siis ei saa perioodilist vabavõnkumist üldse tekkida ja laetud kondensaator tühjeneb läbi pooli *aperioodiliselt* (s. o. mitteperioodiliselt, peri-

oodilise võnkumiseta). Kestvama võnkeprotsessi saamiseks võnkeringis peab selle aktiivtakistus olema võimalikult väike.

Püsiva amplituudiga (s. o. mittesumbuva) võnkeprotsessi esilekutsumiseks ja säilitamiseks peab võnkeringile pidevalt mõjuma väline perioodiliselt muutuv elektromotoorne jõud — *välisergutus*. Pideva perioodilise välisergutuse tagajärjena võnkeringis säilitatavat võnkumist nimetatakse *sundvõnkumiseks*.

Võnkeringis tekkiva sundvõnkumise sagedus ühtib alati seda põhjustava välise elektromotoorse jõu sagedusega ega tarvitse olla võrdne võnkeringi omavõnkesagedusega.



Joonis 14.3. Võnkeringi ergutamine (*a*) ja võnkuva voolu sõltuvus ergutava voolu sagedusest (*b*).

Raadioseadistes kasutatavad võnkeringid töötavad sundvõnkumise režiimis — nendesse juhitakse pidevalt või impulssidena võnkumisenergiat väljastpoolt. Siinkohal tuleb rõhutada veelkordselt, et ergutava elektromotoorse jõu sagedus ei tarvitse alati ühtida võnkeringi omavõnkesagedusega.

Sundvõnkumise puhul oleneb võnkeamplituud mitte üksnes ergutava elektromotoorse jõu suurusest, vaid ka selle elektromotoorse jõu sageduse ja võnkeringi omavõnkesageduse suhtest. Mida suurem on nende erinevus, seda suurem peab ergutav elektromotoorne jõud olema teatava amplituudiga sundvõnkumise esilekutsumiseks võnkeringis.

Kui muuta võnkeringile *L-C* (joonis 14.3-*a*) mõjuva vahelduva elektromotoorse jõu sagedust, siis saab kindlaks teha, et selle lähenemisel võnkeringi omavõnkesagedusele kasvab viimases sundvõnkumise amplituud. Ergutava elektromotoorse jõu sageduse ühtimisel võnkeringi omavõnkesagedusega tekib *resonants* — võnkumise amplituud suureneb järsult ja tema alalhoidmiseks kulub väga vähe energiat.

Resonantsi tekkimise tingimuseks on võnkeringi omasageduse võrdumine ergutava elektromotoorse jõu sagedusega.

Edasine ergutava elektromotoorse jõu sageduse muutmine viib taas võnkeamplituudi vähenemisele võnkeringis.

Resonantsi-olukorrale vastavat sagedust nimetatakse *võnkeringi resonantsisageduseks* (tähis: f_{res}). Võnkeringi resonantsisagedus võrdub praktiliselt selle omasagedusega f_0.

Võnkeringi resonantsiomadusi saab graafilisel teel iseloomustada tema *resonantsikõvera* kaudu. Viimase all mõistetakse võnkeringis tekkiva võnkumise amplituudi ja sageduse vahelise sõltuvuse graafikut. Joonisel 14. 3-*b* on kujutatud tavalise võnkeringi resonantsikõver. Graafiku rõhttelg väljendab sagedust ja püsttelg voolu võnkeringis. Nagu näha, kasvab resonantsisagedusel vool järsult.

Resonantsinähtust iseloomustab võimsa võnkumise tekkimine väga väikese ergutuse puhul.

Resonantsi mõiste paremaks omandamiseks toome veel analoogilise olukorra mehaanikast. Nagu teada, oleneb kella pendli omavõnkesagedus tema mõõtmetest ja Maa külgetõmbejõust. Tasakaaluasendist väljaviidud pendel alustab sumbuvat, väheneva amplituudiga võnkumist tema omavõnkesagedusel. See olukord on sarnane üksiku energiatõuke arvel ilmuva sumbuva vabavõnkumisega võnkeringis. Pendli võnkumine kestab seni, kuni kogu tema võnkumisenergia on kulunud hõõrdumistakistuse (õhutakistuse ja laagrisisese hõõrdumise) ületamiseks.

Kestva võnkumise saamiseks tuleb kella pendlile anda väljastpoolt liikumisenergiat pidevalt juurde. Selleks võib näiteks käega liigutada pendlit. Niisugusel juhul liigub pendel vastavalt ergutussagedusele (käe liikumisele). See olukord vastab sundvõnkumisele võnkeringis, mille puhul teatavasti ergutussagedus ei tarvitse ühtida omasagedusega.

Juhul aga, kui omavõnkesagedusega võnkuvale pendlile anda igal perioodil teatav väike tõuge, mis katab selle ajavahemiku vältel esinenud energiakao (seda teostab kella mehhanism), ilmub resonants. Pendli suhteliselt suure amplituudiga võnkumist suudab alal hoida kella mehhanismist saadav tühiselt väike energiatõuge, sest resonantsisagedusel on selleks tarvis palju väiksemal hulgal energiat kui ühelgi teisel sagedusel. See ongi resonantsi olemus nii mehaanikas kui ka raadiotehnikas.

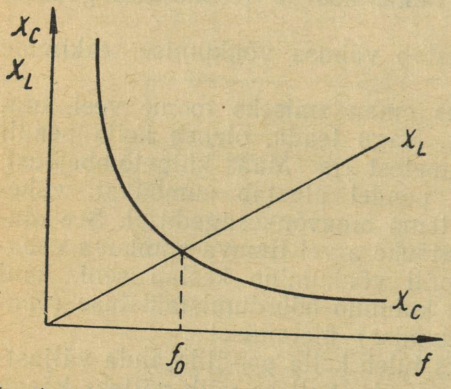
§ 4. PINGERESONANTS

Kui vahelduvvool läbib aktiivtakistust, siis sellel tekkiv osapinge (pingelang) on alati vooluga samas faasis. Reaktiivtakistusel (induktiivsel või mahtuvuslikul takistusel) tekkiv osapinge on aga teatavasti voolust veerandperioodi võrra faasis nihutatud. Nii jääb pinge muutumine mahtuvusel voolust faasis hiljemaks, induktiivsusel aga läheb pinge voolust ette (vt. 10. peatükki).

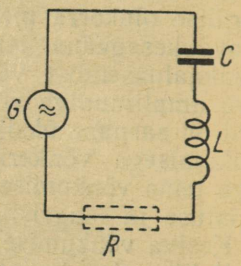
Aktiivtakistus ei sõltu vahelduvvoolu sagedusest (kui mitte

arvestada hiljem vaadeldava nähtuse — pinnaefekti mõju), reaktiivtakistus on aga sellest otseselt sõltuv. Kondensaatori mahtuvustakistus X_C muutub sagedusega pöördvõrdeliselt ning pooli induktiivtakistus X_L — sagedusega võrdeliselt (joonis 14. 4).

Mahtuvusliku ja induktiivse takistuse vastandlikud omadused põhjustavad neid lülituselemente üheaegselt sisaldavates vooluringides — võnkeringides — erilisi nähteid, mida nimetatakse resonantsiks. Olenevalt sellest, kuidas on toitev vooluallikas ühendatud pooliga ja kondensaatoriga, võib ilmneda võnkeringis kas pinge- või vooluresonants.



Joonis 14. 4. Kondensaatori ja induktsioonipooli reaktiivtakistuste sõltuvus sagedusest.



Joonis 14. 5. Järjestikune võnkering.

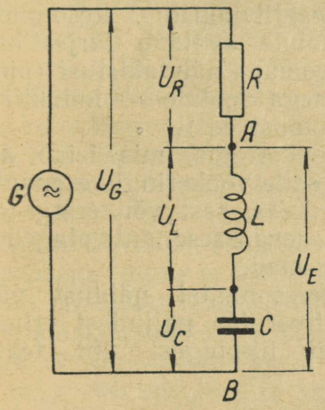
Järjestikuses võnkeringis (joonis 14. 5) on pool L ja kondensaator C lülitatud vooluallikaga G järjestikku. Paratamatult esineb selles vooluringis ka aktiivtakistus (pooli traadi, ühendusjuhtmete ning vooluallika sisetakistuse summa), mida võiksime ühiselt kujutada järjestikuse aktiivtakistusena R lülitusskeemis. Niisuguses võnkeringis võib esineda pingeresonants.

Välise pingeallika poolt võnkeringis tekitatava sundvõnkumise amplituud oleneb nii pingest kui ka sagedusest. Mida rohkem läheneb võnkeringi ergutava pinge sagedus selle võnkeringi resonantssagedusele, seda suuremaks muutub vool võnkeringis ning osapinged induktiivsusel ja mahtuvusel.

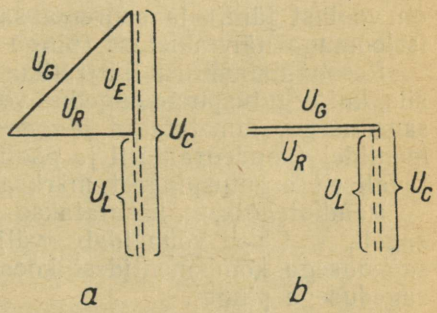
Ergutusvoolu allika G pinge U, mis mõjub võnkeringile, s. o. järjestikku ühendatud induktiivtakistusele X_L, mahtuvustakistusele X_C ja aktiivtakistusele R (joonis 14. 6), tekitab voolu, mille tugevus oleneb vooluringi näivtakistusest Z selle sageduse puhul. See vool kutsub esile igal järjestikusel lülituselemendil pingelangu:

osapinge aktiivtakistusel: $U_R = IR$;
osapinge induktiivsusel: $U_L = IX_L$;
osapinge mahtuvusel: $U_C = IX_C$.

Faasinihete tõttu reaktiivtakistusi läbiva voolu ja nendel tekkivate osapingete vahel on U_L ja U_C alati omavahel vastupidised. Osapinge leidmiseks punktide A ja B vahel joonisel 14. 6 toodud skeemis tuleb seega leida pingete U_L ja U_C v a h e, mitte nende summa. Selleks pingeks kujuneb $U_E = U_L - U_C$, kui U_L on suurem, või $U_E = U_C - U_L$, kui U_C on suurem. Osapinge U_E omab esimesel juhul induktiivset iseloomu — tema muutumine kulgeb voolust veerandperioodi võrra varem, teisel juhul aga mahtuvuslikku — kulgeb voolust veerandperioodi võrra hiljem.



Joonis 14. 6. Pinged järjestikuses võnkeringis.



Joonis 14. 7. Järjestikuse võnkeringi elementidel tekkivate osapingete geomeetriline liitmine (a — erinevate ja b — võrdsete U_L ning U_C puhul).

Aktiivtakistusel tekkiv osapinge U_R voolu suhtes nihutatud pole; järelikult on ta reaktiivtakistustel tekkivate osapingete vahe U_E suhtes samuti veerandperioodi ehk 90 faasikraadi võrra nihutatud. Need pinged tuleb seetõttu liita geomeetriliselt — täisnurkse kolmnurga abil, mille ühe kaateti pikkus väljendab (teatavas mõõtkavas) osapinget U_R, teine kaatet — osapingete vahet U_E ning hüpotenuusi pikkus — kogupinget U_G (joonis 14. 7-a). Seda geomeetrilist liitmist väljendab valem

$$U_G = \sqrt{U_E^2 + U_R^2},$$

kus $U_E = U_L - U_C$ või $U_E = U_C - U_L$.

Resonantsisageduse f_{res} puhul osutuvad reaktiivtakistused X_C ja X_L omavahel võrdseteks (joonis 14. 4). Siis võrdsustuvad muidugi ka nendel tekkivad osapinged ja tasakaalustuvad jäägitult (joonis 14. 7-b). Elektrilises mõttes vastaks see olukorrale,

kus vooluringis puuduksid reaktiivtakistused ja esineks ainult aktiivtakistus, millel tekkiv pingelang U_R peab muidugi võrduma vooluallika pingega U_G. Teisiti väljendatuna: vooluallika vahelduvpinge tekitab järjestikuses võnkeringis resonantsi puhul voolu I_{res}, mille määrab ainuüksi võnkeringi aktiivtakistus:

$$I_{res} = \frac{U_G}{R}.$$

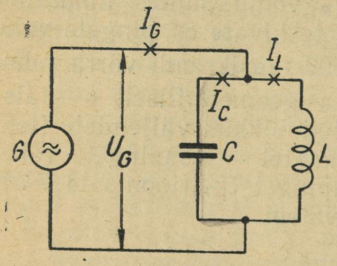
Kuna igas võnkeringis on aktiivtakistus suhteliselt väike, siis kujuneb resonantsivool suureks. Resonantsisagedusest erineva sagedusega ergutuspinge puhul väheneks vool tunduvalt, sest siis mõjuks lisaks aktiivtakistusele ka reaktiivtakistus. Resonantsisagedusest väiksema sagedusega voolule avaldab järjestikune võnkering kui tervik mahtuvusliku iseloomuga näivtakistust (pinge on voolust järel) ja suurema sagedusega voolule — induktiivse iseloomuga näivtakistust (pinge on voolust ees).

Resonantsinähtust järjestikuses võnkeringis, mis leiab aset siis, kui ergutuspinge sagedus võrdub selle võnkeringi resonantsisagedusega, nimetatakse *pingeresonantsiks,* sest võnkeringi elementidel (kondensaatoril ja poolil) arenevad resonantsipinged on tavaliselt ergutuspingest märksa suuremad.

Raadiotehnikas kasutatakse pingeresonantsi nähtust väga sageli, sest see võimaldab «välja filtreerida» paljudest erineva sagedusega komponentidest koosnevast liitpingest üht teatud sagedusega pinget.

§ 5. VOOLURESONANTS

Resonantsinähtus võib induktiivsuse, mahtuvuse ja sageduse sobiva vahekorra puhul tekkida ka võnkeringis, mille moodustab vooluallikaga rööbiti ühendatud induktsioonipool ja kondensaator.



Joonis 14.8. Voolud rööbitises võnkeringis.

Siingi esineb paratamatult aktiivtakistus, kuid vooluresonantsi nähtuse hõlpsamaks käsitlemiseks eeldame algul, et võnkeringis kaod puuduvad. Niisugust «ideaalset» rööbitist võnkeringi kujutab joonis 14.8. Näeme, et see erineb järjestikusest võnkeringist ainult vooluallika ühendusviisilt. Viimane on siin ühendatud lülituselementidega rööbiti, mitte järjestikku. Vooluallika pinge mõjub võrdselt võnkeringi kummalegi harule ja tekitab neis voolud, mis on võrdelised pingega ja püsiva pinge juures pöördvõrdelised vastava haru takistusega.

Vool kondensaatorit sisaldavas harus $I_C = \frac{U_G}{X_C}$ ja vool indukt-

sioonipooli sisaldavas harus $I_L = \frac{U_G}{X_L}$ sõltuvad sagedusest. I_C muutub püsiva pinge juures võrdeliselt sagedusega ja I_L — pöördvõrdeliselt sagedusega.

Nagu teada, on mahtuvuslikku takistust läbiv vool ergutavast pingest veerandperioodi võrra ees, induktiivset takistust läbiv vool aga veerandperioodi võrra järel. Niisiis ongi voolud rööbitise võnkeringi harudes faasis nihutatud poolperioodi võrra, kujunedes omavahel vastupidisteks. Vooluallikast võetav vool I_G pole niisugusel juhul võrdne haruvoolude summaga, vaid vahega $I_G = I_L - I_C$, kui I_L on suurem, või $I_G = I_C - I_L$, kui I_C on suurem.

Resonantsinähtus ilmneb siin, nagu järjestikuseski võnkeringis, induktiivse ja mahtuvusliku takistuse võrdsuse korral. Siis osutuvad haruvoolud I_L ja I_C võrdseteks ning vooluallikast võetav vool kujuneks kadudeta võnkeringi puhul nulliks: $I_G = I_L - I_C = 0$.

Kuna ideaalne rööbitine võnkering vooluallikast resonantsisagedusega voolu ei võta, siis ilmselt avaldab see vooluring kui tervik niisuguse sagedusega voolule lõpmatult suurt takistust. Resonantsisagedusest väiksema sagedusega voolule avaldab rööbitine võnkering kui tervik tunduvalt väiksemat induktiivse iseloomuga näivtakistust ja suurema sagedusega voolule — mahtuvusliku iseloomuga näivtakistust, sest kummalgi juhul kaob «tasakaal» induktiivse ja mahtuvusliku haru voolude vahel ja see nendest vooludest, mis osutub ülekaalukamaks, hakkab vooluallikat läbima.

Rööbitises võnkeringis ilmneb resonantsi korral tugev vooluvõnkumine, mis on tegelikult selle võnkeringi vabavõnkumine: kondensaatori laeng tekitab perioodiliselt voolu poolis ning selle tagajärjel ilmuv endainduktsiooni elektromotoorne jõud laeb uuesti kondensaatori jne., ilma et välise vooluallika energiat tarbitaks. Võnkeringi sisemine vool (mis ringleb kondensaatori ja pooli vahel) on resonantsi korral märksa suurem vooluallikast saadavast ergutusvoolust. Seepärast nimetatakse resonantsinähtust rööbitises võnkeringis *vooluresonantsiks*.

Siiani vaatlesime ideaalset kaovaba rööbitist võnkeringi. Tegelikus võnkeringis ilmnevad siiski energiakaod. Näiteks eraldub juhtme aktiivtakistusel igal poolperioodil osa võnkeenergiast soojusena. Võnkumine oleks sumbuv, kui puuduks kõiki energiakadusid kattev vool I_G. Selle voolu olemasolu näitab, et kadude tõttu rööbitine võnkering resonantsisagedusel siiski lõpmatult suurt takistust ei oma. Rööbitise võnkeringi takistus resonantsi puhul, ehk lühemalt: *resonantsitakistus* on seda suurem, mida väiksemad on energiakaod selles võnkeringis, seega mida väiksem on aktiiv-

takistus. Resonantsitakistus omab alati aktiivtakistuslikku iseloomu, sest võnkeringi ergutava resonantsisagedusliku pinge ja temas tarbitava voolu vahel faasinihet ei ole. Rööbitise võnkeringi resonantsitakistust väljendab valem

$$Z_{res} = \frac{L}{CR},$$

kus kõik suurused on põhiühikutes.

Raadiotehnikas kasutatakse vooluresonantsi nähtust erinevate sagedustega komponentidest koosnevast liitvoolust ühe teatud sagedusega voolu väljafiltreerimiseks. Kõik teised voolud pääsevad rööbitisest võnkeringist hõlpsalt läbi, ainult resonantsisagedusega vool kohtab seal suurt resonantsitakistust.

§ 6. ENERGIAKAOD VÕNKERINGIS

Võnkeringi omadusi mõjutab tema sumbuvus, mis väljendab kõikide temas tekkivate energiakadude kogumõju. Alalisvooluringides ilmnevad energiakaod soojuse eraldumisena juhtmete takistusel ja isoleermaterjalis. Vahelduvvoolu ja kõrgsagedusvoolu puhul tulevad arvesse ka mitmed lisakaod, mida siin lähemalt käsitleme.

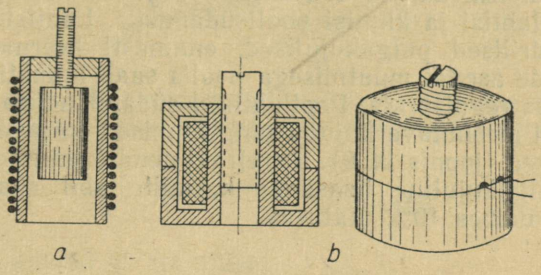
Kõrgsagedusvoolude puhul suurendab energiakadusid *pinnaefekt,* mille tõttu voolujuhe avaldab alalisvoolu takistusest suuremat aktiivtakistust. Pinnaefekti põhjustab voolu ebaühtlane jagunemine juhtme ristlõikepinna ulatuses: juhet läbiva vahelduvvoolu muutumise taktis muutub ka seda ümbritsev magnetväli, kuid see indutseerib sama juhtme materjalis põhivoolule vastassuunalise pöörisvoolu. Juhtme keskosas on pöörisvool suurim ja see nagu «suruks» põhivoolu rohkem pinnale lähemale. Seega kulgeb kõrgsagedusvool juhtme õhukeses pinnakihis. Mida kõrgem on sagedus, seda õhemaks jääb juhtiv kiht ja ühtlasi ka tegelikult kasutatav ristlõikepind — juhtme aktiivtakistus suureneb. See aga omakorda põhjustab energiakadude suurenemist.

Induktsioonipoolides avaldub pinnaefekt keerdude magnetväljade vastastikuse mõju tõttu veelgi intensiivsemalt kui sirgjuhtme korral.

Pinnaefekti kahjuliku mõju vähendamiseks kasutatakse kõrgsagedusjuhtmete hõbetamist või kuldamist, millega hoitakse ära vaskjuhtme pinna oksüdeerumine ning parandatakse pealmise kihi juhtivust. Võimsate raadiosaatjate võnkeringide juhtmete ja poolide hõbetamine on isegi vältimatu seal esinevate suurte voolude tõttu, sest energiakadu aktiivtakistusel suureneb võrdeliselt voolu ruuduga. Otstarbekas on ka kõrgsagedust kandvad juhtmed ning poolid valmistada traadi asemel torust. See väldib pöörisvoolust

tingitud kadude tekkimise (toru-«juhtme» keskosa on nüüd mittejuhtiv keskkond!).

Keskmistel raadiosagedustel (kuni 2,5 megahertsi) on kasulik mähkida poolid *litsetraadist* — elektrijuhtmest, mis koosneb paljudest omavahel isoleeritud 0,05- kuni 0,1-millimeetrise läbimõõduga kiududest. Niisuguse juhtme kasutamisel mähisetraadina ühendatakse pooli kummaski otsas kõik kiud kokku ja saadaksegi juhe, mille kõrgsagedusvoolu juhtiv pind on palju kordi suurem kui tavalisel traadil.



Joonis 14. 9. Magnet-dielektrikust toodetavaid poolisüdamikke.

Kõrgsageduslikes vooluringides ilmneb ka energiakadu isolatsioonis ehk *dielektrikuskadu* [1]. Kõrgsageduspinge all olevas dielektrikus tekib kiiresti muutuva elektrivälja mõjul molekulide vahelduv polarisatsioon. Dielektrikuskaod ilmnevad peaasjalikult kondensaatoris ja poolisüdamikus, kus isoleermaterjalile mõjub suhteliselt tugevam elektriväli. Dielektrikuskadude vähendamiseks kasutatakse kõrgsagedustehnikas spetsiaalseid keraamilisi isoleermaterjale, mis omavad väikeste kadude kõrval ka väikest dielektrikukonstanti (pooli kahjuliku sisemahtuvuse vähendamiseks).

Mõnikord tuleb möödapääsematult arvesse võtta lisakadusid, mida põhjustavad kõrgsagedusliku vooluringi mõjupiirkonnas olevates esemetes tekkivad pöörisvoolud. Need ilmnevad näiteks raadiovastuvõtjate võnkeringide poole ümbritsevates metallist varjetes.

Kõrgsageduslike vooluringide omaduste parandamiseks kasutatakse magnet-dielektrikust valmistatud poolisüdamikke. Praegusel ajal kasutatakse palju liike kõrgsagedustehnilisi magnet-dielektrikuid: karbonüülrauda, magnetiiti, alsiferit ning ferriite. Viimased on eriti kõrge kvaliteediga magnetilised materjalid, mis oma elektrilistelt omadustelt kuuluvad pooljuhtide hulka. Ferriidid omavad teiste magnet-dielektrikutega võrreldes suuremat mag-

[1] Lisaks alalisvoolugi puhul esinevale läbijuhtivusest tingitud lekkimisvoolule.

netilist läbitavust ja väiksemaid kadusid kõrgematel sagedustel. Kõige enam kasutatakse nikkel-tsink-ferriite.

Magnet-dielektrikud omavad suurt elektrilist eritakistust ning seetõttu ei ilmu nendes isegi kõrgete sageduste juures kuigi märgatavaid pöörisvoolust põhjustatud kadusid. Magnet-dielektrikust poolisüdamiku kasutamine suurendab mähise induktiivsust. See võimaldab vajaliku induktiivsuse saamiseks tunduvalt vähendada keerdude arvu ja traadi pikkust. Seoses sellega väheneb ka kaotakistus ja võnkeringi sumbuvus väheneb.

Magnet-dielektrikutest toodetakse väga mitmesuguse kujuga lahtisi, poollahtisi ja kinnisi poolisüdamikke. Lahtiste hulka kuuluvad silindrilised pulgakujulised, enamasti keermetatud südamikud. Nende asendi muutmisega poolis saab induktiivsust teatavates piirides reguleerida. Poollahtised südamikud on sageli seent või niidirulli meenutava kujuga ning kinnised on pealt kaetud niidirulli taolised (joonis 14. 9). Sageli on nendel poolidel väike keermetatud pulgakujuline lisasüdamik, mille abil saab induktiivsust muuta umbes 10% ulatuses.

§ 7. VÕNKERINGI HÜVETEGUR

Resonantsi olukorras ei saavuta üksnes vool järjestikuses võnkeringis maksimaalse suuruse, vaid ka pingeamplituudid kondensaatoril ja endainduktsioonipoolil osutuvad suurimateks. Sealjuures on need pinged suuremad võnkeringile mõjuva ergutuspinge amplituudist. Resonantsipinge amplituudid poolil ja kondensaatoril kujunevad seda suuremaks, mida väiksem on energiakadu võnkeringis. Arvu, mis näitab, mitu korda on resonantsisagedusega pinge järjestikuse võnkeringi kondensaatoril või poolil suurem võnkeringi toitva vooluallika pingest U_G, nimetatakse hüveteguriks (*hindeteguriks*) (tähis valemites Q). Niisiis

$$Q = \frac{U_{C\,res}}{U_G} \text{ ja } Q = \frac{U_{L\,res}}{U_G}.$$

Järjestikuse võnkeringi kondensaatoril ilmub resonantsi puhul pinge

$$U_{C\,res} = I_{res} X_{C\,res}.$$

Resonantsivoolu määrab teatavasti ainult võnkeringi kaotakistus ning vooluallika pinge:

$$I_{res} = \frac{U_G}{R}.$$

Seega resonantsipinge kondensaatoril

$$U_{C\,res} = \frac{U_G}{R} \cdot X_{Cres};$$

kui asetada saadud avaldis esimesse valemisse, saame:

$$Q = \frac{\frac{U_G}{R} \cdot X_{C\,res}}{U_G} = \frac{X_{C\,res}}{R} \quad \text{või ka} \quad Q = \frac{X_{L\,res}}{R},$$

sest $X_{C\,res} = X_{L\,res}$. Siit selgub, et võnkeringi hüvetegur on pöördvõrdeline kaotakistusega.

Võnkeringi hüveteguri määramise valemile saab anda praktiliseks kasutamiseks käepärasema kuju:

$$Q = \frac{0{,}00628 f_{0\,(\mathrm{kHz})} \cdot L_{(\mu\mathrm{H})}}{R_{(\Omega)}}.$$

Näide. Juhul, kui võnkeringi resonantsisagedus on 1,2 megahertsi, induktiivsus 150 mikrohenrit ja aktiivtakistus 9 oomi, on hüvetegur

$$Q = \frac{0{,}00628 \cdot 1200 \cdot 150}{9} \approx 125,$$

kui muid kadusid ei arvestata.

Näide. Järjestikuses võnkeringis, mille omasagedus on 300 kilohertsi, on pooli induktiivsus 300 millihenrit ja aktiivtakistus 5 oomi. Võnkeringile mõjuv resonantsisagedusega pinge on 10 millivolti. Määrata pinge kondensaatoril. Vooluallika sisetakistust ei arvestata.

Esmalt leiame selle võnkeringi hüveteguri, arvestades kadude põhjustajana ainult pooli aktiivtakistust:

$$Q = \frac{0{,}00628 f_0 L}{R} = \frac{0{,}00628 \cdot 300 \cdot 300}{5} = 113.$$

Seejärel leiame resonantsipinge kondensaatoril:

$$U_{C\,res} = QU_G = 113 \cdot 0{,}01 = 1{,}13 \text{ volti.}$$

Rööbitise võnkeringi juures iseloomustab hüvetegur võnkeringi harudes tekkiva voolu ja vooluallikast võetava voolu suhet resonantsi korral:

$$Q = \frac{I_{C\,res}}{I_G} = \frac{I_{L\,res}}{I_G}.$$

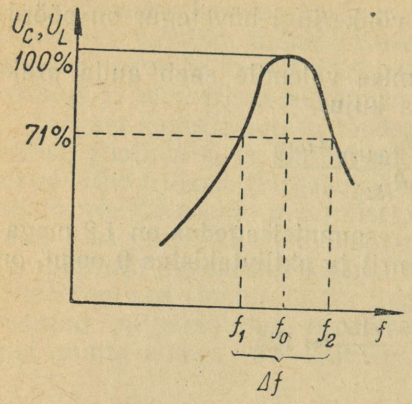
Raadiotehnikas kasutatavate võnkeringide hüvetegurid on üldiselt suurusjärgus mõnekümnest kuni paarisajani.

§ 8. VÕNKERINGI ERALDUSVÕIME JA RIBALAIUS

Võnkering eraldab paljudest erineva sagedusega vahelduvvooludest koosnevast liitvoolust mitte üksnes omasageduslikku voolu, vaid ka sellest pisut erinevate sagedustega voole teatava

laiusega sagedusribas. Seepärast on kasutusele võetud võnkeringi *eraldusvõime* (*selektiivsuse*) ja *ribalaiuse* mõisted.

Üksiku võnkeringi ribalaiusena mõistetakse seda sagedusriba $\Delta f = f_2 - f_1$, mille ulatuses pinge kondensaatoril on suurem kui 71 protsenti maksimaalsest väärtusest täpsel resonantsisagedusel f_0 (joonis 14. 10). Mida kitsam on võnkeringi resonantskõver, seda väiksem on tema ribalaius ja seda suurem on eraldusvõime.



Joonis 14. 10. Võnkeringi ribalaiuse mõiste selgitamine.

Võnkeringi ribalaius oleneb resonantsisagedusest ja hüvetegurist ning on esimesega võrdeline ja viimasega pöördvõrdeline:

$$\Delta f = \frac{f_0}{Q}.$$

Näide. Resonantsisagedusel $f_0 = 1$ MHz peab võnkeringi ribalaius olema $\Delta f = 10$ kHz. Määrata selleks vajalik hüvetegur.

Hüvetegur avaldub ülaltoodud valemist pärast mõõtühikute ühtseks muutmist:

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f} = \frac{1000}{10} = 100.$$

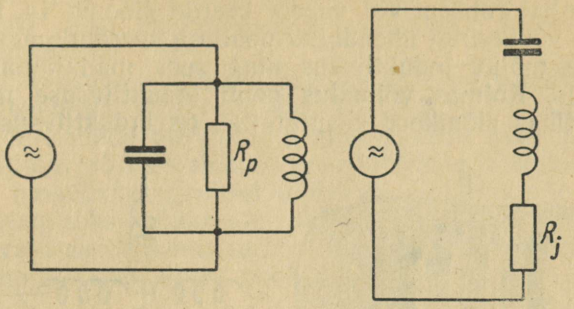
Niisiis täidab esitatud nõuded võnkering, mille hüvetegur on 100.

Väikese ribalaiuse ehk nn. kitsa riba saamiseks tuleb kasutada kõrge hüveteguriga võnkeringi või mitut omavahel sidestatud võnkeringi. Üldiselt on aga suurematel resonantsisagedustel töötavatel võnkeringidel (lühilaine- ja ultralühilaineseadmed) ribalaius suurem ja seega ka selektiivsus halvem.

Vajaduse korral (näiteks kujutisesignaalide võimendajates televisioonitehnikas) saab ribalaiust suurendada võnkeringile aktiivtakisti juurdelülitamise ja seega võnkeringi hüveteguri vastava vähendamise teel. Kui ühendada võnkeringi suur aktiivtakistus R_p rööbiti (joonis 14. 11-*a*) või väike aktiivtakistus R_j järjestikku (joonis 14. 11-*b*), siis väheneb eraldusvõime ja suureneb ribalaius. See takistus lisandub kaotakistusele ning tarbib osa võnkumisenergiast, millega suureneb võnkumise sumbuvus. Lisatakistuse suuruse valikuga saab energiakadusid muuta ka nii suureks, et võnkering kaotab resonantsiomadused ja muutub aperioodiliseks vooluringiks. Mida väiksem on sama resonantsisageduse juures rööbitine lisatakistus R_p või mida suurem on järjestikune

lisatakistus R_j, seda halvem on võnkeringi eraldusvõime ja seda suurem ribalaius.

Siinkohal tuleb märkida, et ribalaiust mõjutab ka võnkeringi ergutava vooluallika sisetakistus. Rööbitise võnkeringi puhul mõjub toitva vooluallika sisetakistus nagu R_p ja järjestikuse võn-

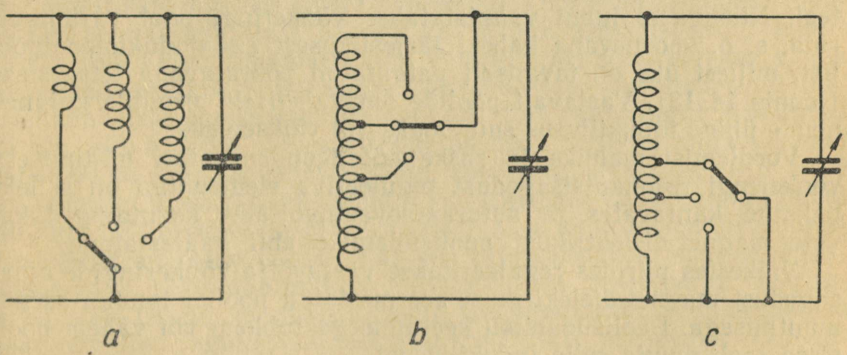


Joonis 14. 11. Võnkeringi ribalaiuse suurendamine lisatakisti abil.

keringi puhul nagu R_j (joonis 14. 11). Niisiis peab eraldusvõime halvenemise vältimiseks rööbitist võnkeringi toitva vooluallika sisetakistus olema võimalikult suur ja järjestikust võnkeringi toitva sisetakistus võimalikult väike.

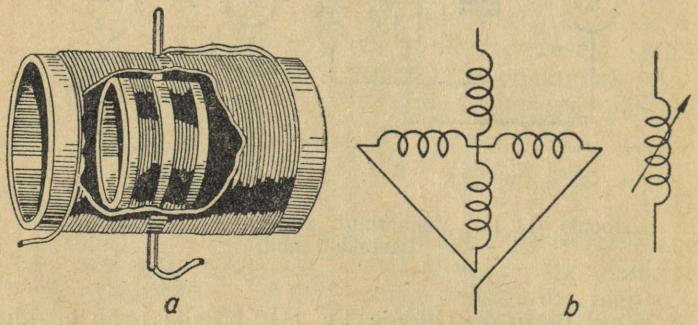
§ 9. VÕNKERINGI HÄÄLESTAMINE

Raadioseadmetes kasutatakse püsiva või pidevalt muudetava resonantsisagedusega võnkeringe. Viimaste omasagedust muudetakse *häälestamisega* — kondensaatori mahtuvuse või pooli induk-



Joonis 14. 12. Võnkeringi astmeline ümberhäälestamine induktiivsuse muutmise teel.

tiivsuse muutmisega. Sujuvaks omasageduse muutmiseks kasutatakse muudetava mahtuvusega kondensaatoreid, nn. pöördkondensaatoreid. Omasageduse astmeline muutmine saavutatakse ümberlülitite kaasabil, millega saab võnkeringi ühendada kas erineva induktiivsusega poole (joonis 14. 12-*a*) või siis ühest ja samast poolist rohkem või vähem keerde (joonis 14. 12-*b*). Mida suurem on võnkeringi ühendatud pooliosa keerdude arv, seda suurem on ka mõjuv induktiivsus ning seda madalamaks kujuneb omasagedus. Kolmas võimalus pooli induktiivsuse muutmiseks, mida praktikas mõnikord kasutatakse, on induktiivsuse vähenda-



Joonis 14. 13. Pidevalt muudetava induktiivsusega pooli — variomeetri ehitus (*a*) ja skeemitähised (*b*).

mine pooli suurema või väiksema osa lühistamise teel (joonis 14. 12-*c*). Sellel juhul halveneb pisut pooli hüvetegur, kuna lühistatud osa aktiivtakistusel tekivad mõnevõrra suuremad energiakaod.

Võnkeringi omasageduse astmeline muutmine poolide või nende osade ümberlülitamisega pole alati kohane. Mõnikord on tarvis muuta omasagedust sujuvalt pooli induktiivsuse muutmise teel. Niisugusel juhul valmistatakse võnkeringi pool variomeetrina, s. o. koosnevana kahest järjestikusest endainduktsioonipoolist, millest üks on tavaliselt paigutatud pööratavana teise sisse (joonis 14. 13). Vastavalt poolide omavahelisele asendile kujuneb nende ühine induktiivsus suuremaks või väiksemaks.

Võrdlemisi mahuka ja raske pöördkondensaatori vältimiseks võnkeringi resonantsisagedust reguleeriva elemendina on selleks hakatud kantavates ja autoraadiovastuvõtjates kasutama liikuvate magnet-dielektrikust poolisüdamike abil häälestamist.

Väikestes piirides reguleeritakse vastuvõtja võnkeringide omasagedust magnet-dielektrikust keermestatud poolisüdamiku asendi muutmisega. Poolisüdamiku keeramisega rohkem või vähem pooli sisse saab muuta selle induktiivsust.

Lühilainetel töötava võnkeringi pooli induktiivsust muudetakse mõnikord väikestes piirides metallrõnga või -ketta abil, mis viiakse

pooli kõrgsagedusliku magnetvälja piirkonda. Heast elektrijuhist (vasest või alumiiniumist) kettas ilmub kõrgsageduslik pöörisvool, mis tekitab ketta ümber magnetvälja. See magnetväli on Lenzi reegli põhjal suunatud põhi-magnetväljale vastu, üldine väli nõrgeneb pisut ning järelikult väheneb ka pooli induktiivsus. Ketta asendist pooli suhtes oleneb pöörisvoolu tugevus ja pooli lõplik induktiivsus.

Muidugi kaasneb niisuguse reguleerimisega võnkeringi hüveteguri halvenemine, sest pöörisvoolud tekitavad metallis lisakadusid. Nende kadude piiramiseks tulebki ketta materjaliks kasutada võimalikult väikese elektrilise eritakistusega metalli.

Püsival omavõnkesagedusel töötavate võnkeringide esialgseks väljahäälestamiseks nõutavale sagedusele kasutatakse väikesi reguleeritavaid seadekondensaatoreid — nn. trimmereid või nihutatavat magnet-dielektrikust poolisüdamikku.

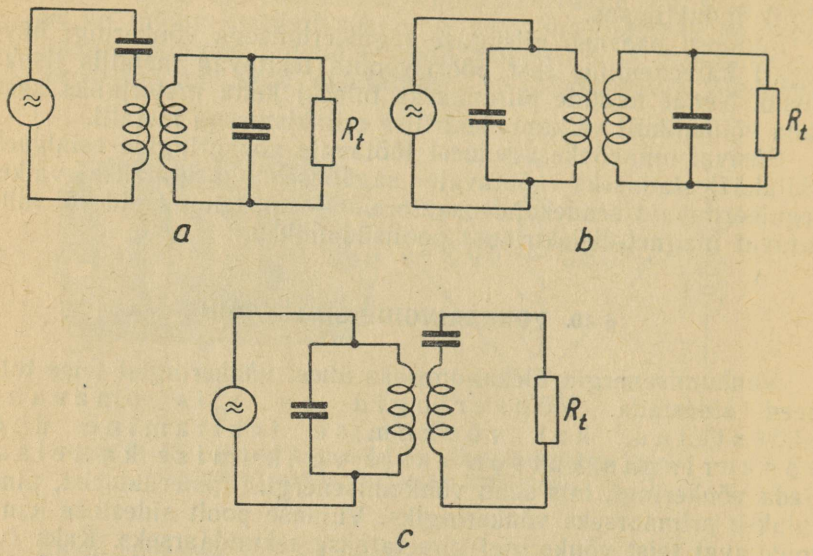
§ 10. VÕNKERINGIDE SIDESTAMINE

Võnkumisenergia ülekandmiseks ühest võnkeringist teise tuleb need sidestada. Võnkeringid on siis omavahel sidestatud, kui võnkumise tekitamine ühes võnkeringis kutsub esile võnkumise ka teises. Seda võnkeringi, mis saab võnkumisenergiat generaatorist, nimetatakse primaarseks võnkeringiks. Viimase poolt sidestuse kaudu toidetavat teist võnkeringi nimetatakse sekundaarseks. Kaks (või enam) võnkeringi võivad sidestuda ühise magnet- või elektrivälja kaudu või ka vahetu elektrilise ühenduse teel.

Raadiopraktikas leiab väga sagedast kasutamist võnkeringide *induktiivne* ehk *transformatoorne sidestamine* ühise magnetvälja kaudu. Skeemides kujutatakse induktiivsidestuses vooluringide poolid alati kõrvuti või ülestikku. Ka tegelikult asuvad need poolid lähestikku, näiteks ühisel poolikehal. Osa primaarmähist ümbritsevast magnetväljast haarab ka sekundaarmähist ning indutseerib selles elektromotoorse jõu. Vooluringide *sidestustegur k,* mis tavaliselt antakse protsentides, iseloomustab sekundaarringi ülekantava elektromotoorse jõu suurust. Kui vooluringid sidestatud ei ole, siis $k = 0\%$. Sidestustegur on seda suurem, mida lähemal teineteisele asuvad sidestatavate vooluringide poolid. Kui need on mähitud ülestikku, siis küünib sidestustegur õhksüdamiku puhul 40 kuni 50 protsendini. Maksimaalset, s. o. sajaprotsendilist sidestustegurit on raske saada, kuna osa primaarmähise magnetväljast moodustab sekundaarmähist mittemõjutava *puisteväljа.* Selgituseks võib lisada, et sidestustegur iseloomustabki primaarmähise magnetvälja jagunemist sekundaarmähisele mõjuvaks «kasulikuks» osaks ja puisteväljaks. Sidestustegurit ei tule vahetada transformaatori ülekandeteguriga, mis on sekundaar- ja primaarmähise keerdude arvude ja (elektromotoorsete jõudude) suhe.

Kõrgsageduse vooluringe sidestavad mähised moodustavad *kõrgsagedustrafo*.

Muudetava induktiivse sidestuse saamiseks kõrgsagedustrafos, näiteks vastuvõtja eraldusvõime muutmiseks, tuleb muuta mähiste vastastikust kaugust või asendit.

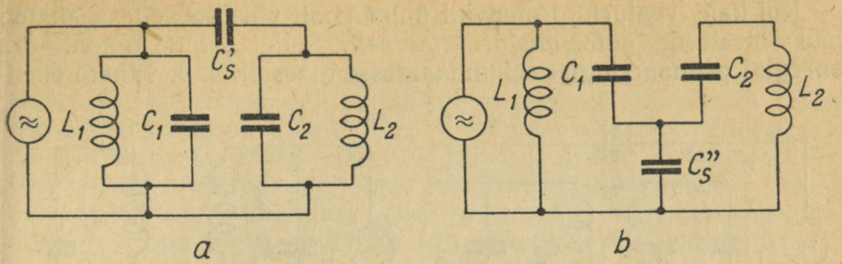


Joonis 14. 14. Võnkeringide transformatoorse sidestamise võimalusi.

Induktiivsel sidestusel võib primaarses võnkeringis aset leida nii pinge- kui ka vooluresonants, olenevalt vooluallika lülitamise viisist (joonis 14. 14). Sekundaarses võnkeringis saab tekkida ainult pingeresonants, sest «vooluallikaks» on siin mähis ise, milles tekib indutseeritav pinge. Ühel juhul (*a* ja *b*) mõjub sekundaarringi ühendatud tarbijale (kujutatud takistina R_t) resonantsi puhul võnkeringi elementidel ilmuv kõrge pinge ja teisel juhul (*c*) läbib tarbijat tugev vool.

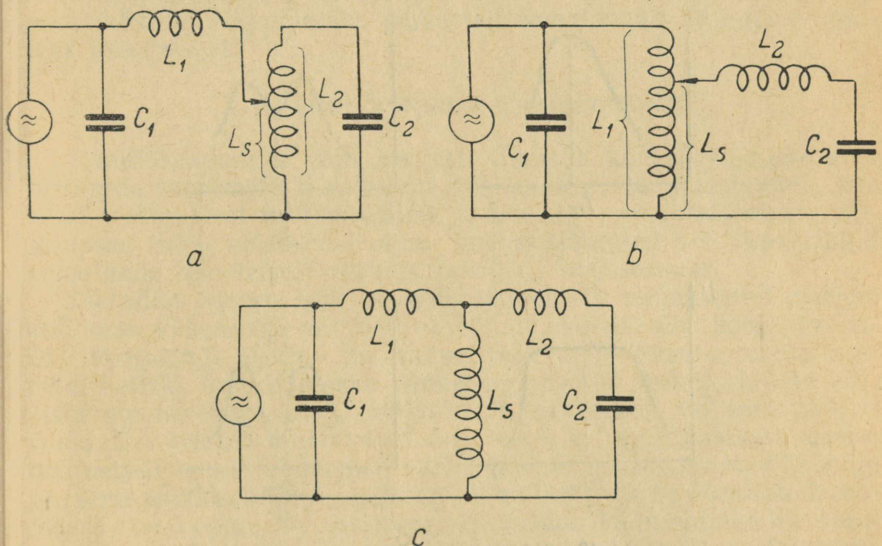
Induktiivsidestusest mõnevõrra harvemini kasutatakse *mahtuvussidestust* (joonis 14. 15) nn. *sidestuskondensaatori* C_s kaudu. Olenevalt selle kondensaatori lülitamise viisist tehakse vahet välise ja sisemise mahtuvussidestuse vahel. Esimesel juhul (joonis 14. 15-*a*) ei kuulu sidestuskondensaator C_s' kummassegi võnkeringi. Võnkeringide C_1-L_1 ja C_2-L_2 sidestustegur on seda suurem, mida suurema mahtuvusega sidestuskondensaatorit kasutatakse. Primaarpinge mõjub siin kondensaatori C_s' kaudu sekundaarringile ja põhjustab seal voolu. Selliseks sidestamiseks piisab väikesest (1 . . . 20 pF) sidestuskondensaatorist.

Sisemise mahtuvusliku sidestuse puhul (joonis 14. 15-*b*) on



Joonis 14. 15. Võnkeringide L_1-C_1 ja L_2-C_2 mahtuvusliku sidestamise võimalusi.

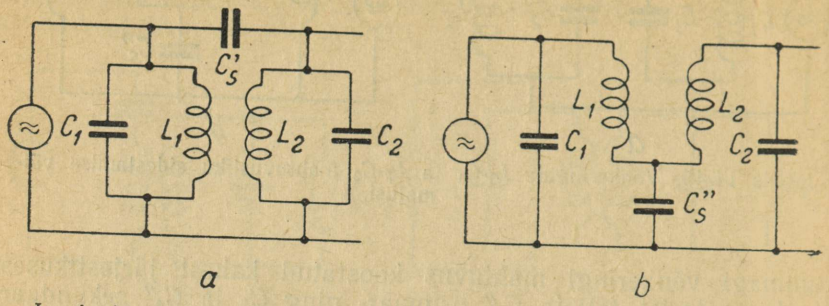
kummagi võnkeringi mahtuvus koostatud kahest järjestikusest kondensaatorist (C_1 ja C_s'' primaar- ning C_2 ja C_s'' sekundaarringil), kusjuures üks nendest — nimelt sidestuskondensaator — kuulub korraga kummassegi võnkeringi. Primaarvoolu poolt sidestuskondensaatoril tekitatav osapinge kutsub esile võnkumise



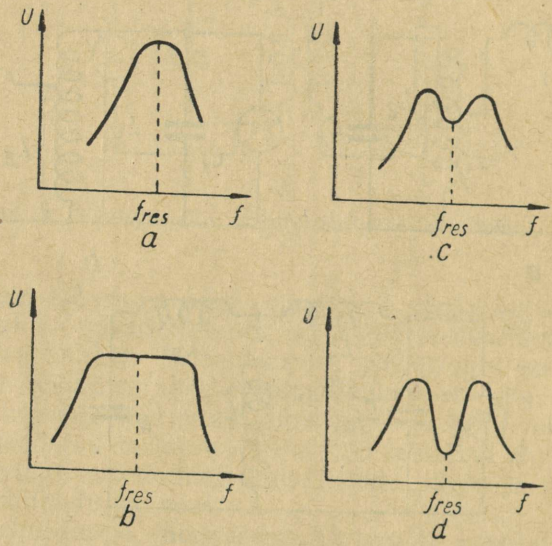
Joonis 14. 16. Võnkeringide L_1-C_1 ja L_2-C_2 autotransformatoorse sidestamise võimalusi.

sekundaarringis. Siin on võnkeringide sidestus seda tugevam, mida suurem osapinge langeb sidestuskondensaatorile, s. t. mida suurem on kondensaatori C_s'' reaktiivtakistus ehk mida väiksem on tema mahtuvus. Nõrga sidestuse loomiseks kasutatakse sellel juhul üsna suure mahtuvusega (kuni 0,1 mikrofaradit) sidestuskondensaatorit.

Kui kaks vooluringi omavad ühise pooli või osa sellest, siis on nad sidestatud *autotransformatoorselt*. Sellel juhul kandub osa energiat primaarringist sekundaarsesse otseselt, s. o. vahetu elekt-



Joonis 14. 17. Võnkeringide L_1-C_1 ja L_2-C_2 segasidestamise võimalusi.



Joonis 14. 18. Sidestatud võnkeringide ühise resonantsikõvera kuju sõltuvus sidestustugevusest.

rilise ühenduse kaudu, teine osa aga magnetvälja kaudu. Joonisel 14. 16 on kujutatud mõned autotransformatoorse sidestuse viisid. Võnkeringid on sidestatud seda tugevamini, mida suurem on nende ühine osa poolist (L_s).

Mõnikord kasutatakse vastuvõtuantenni sidestamiseks vastuvõtja sisendvõnkeringiga nn. *segasidestust*, mille puhul kandub

energia üle osaliselt induktiivsel ja osaliselt mahtuvuslikul teel (joonis 14. 17).

Sidestatud võnkeringide ühised resonantsiomadused sõltuvad sidestuse tugevusest. Mida väiksem on samale sagedusele häälestatud võnkeringide sidestustegur, seda teravamini avaldub resonants (joonis 14. 18-*a*). Sidestuse järkjärgulisel tugevdamisel, näiteks poolide lähendamise teel induktiivsidestuse puhul, muutub resonantsikõver tõmbimaks (*b*), edasi tekib resonantsisagedusel nõgu (*c*), mis veelgi suureneb (*d*). Nõo tekkimist sidestatud võnkeringide resonantsikõverasse põhjustab sekundaarringi tagasimõju primaarringile.

Sidestustugevust, mille puhul resonantsikõver hakkab muutuma kaheharjaliseks, nimetatakse *kriitiliseks sidestuseks*. Kui võnkeringid on omavahel sarnased, siis kriitilise sidestuse puhul sekundaarringi kanduv võimsus ning selles tekkiv vool ja pinge on maksimaalsed.

Kriitilisest nõrgema sidestuse puhul on võnkeringide ühine resonantsikõver peaaegu sama kujuga kui üksikul võnkeringil. Sidestuse suurendamisel üle kriitilise väärtuse muutub lohk resonantsikõveral sügavamaks ja harjad eemalduvad (sageduse mõttes) teineteisest.

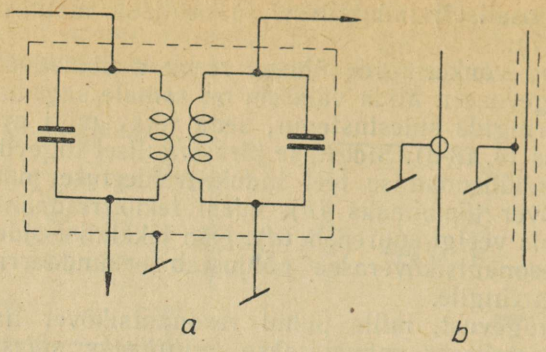
§ 11. VOOLURINGIDE VARJESTAMINE

Raadioseadmetes võib kergesti ilmneda kõrgsageduslike vooluringide soovimatu induktiivne või mahtuvuslik sidestumine, mis rikub normaalset talitlusrežiimi. Nende nn. *parasiitsidestuste* vältimiseks tuleb võimaluse piires ühendusjuhtmed või võnkeringid eemaldada teineteisest või siis kasutada *varjestamist*.

Metallist (vask- ehk alumiiniumplekist) valmistatud varjete abil saab vähendada või isegi täielikult kaotada ühe kõrgsagedusliku vooluringi elektri- ja magnetvälja mõju teistele vooluringidele. Selleks ümbritsetakse võnkeringi poolid peekrikujuliste varjestavate katetega. Pooli magnetväli indutseerib varjesse pööris-voolu. See tekitab omakorda Lenzi reegli kohaselt vastassuunalise magnetvälja, mis väljaspool varjet kaotab põhi-magnetvälja mõju peaaegu täielikult. Kui varje on maandatud (s. o. ühendatud raadioseadme kerega — šassiiga), kõrvaldub ka mahtuvuslik parasiitsidestus. Lülituse varjestatud osad eraldatakse skeemidel punktiirjoonega (joonis 14. 19).

Induktiivse parasiitsidestuse kõrvaldamiseks madalatel sagedustel (näiteks helisagedusvõimendajates) on sobivamad hea magnetilise läbitavusega materjalist varjed. Pooli madalsageduslik magnetväli ei pääse varjest läbi tänu selle headele magnetilistele omadustele.

Mahtuvusliku parasiitsidestuse väldivad madalatel sagedustel samalaadsed metallvarjed kui kõrgetelgi sagedustel. Eriti vajavad varjestamist helisagedusvõimendajate esimesed astmed ja



Joonis 14. 19. Maandatud varjega eraldatud osa kujutamine lülitusskeemil (*a*) ning maandatud varjega ühendusjuhtme skeemitähised (*b*).

sisendringid, kus helisageduspinged on väikesed ja iga kõrvaline elektriline mõjutus võib esile kutsuda samasse suurusjärku kuuluva häirepinge. Muidugi võimendatakse koos helisageduspingega niisugusel juhul ka häirepinget, mis lõpuks valjuhääldajas avaldub tugeva urinana või mürana. Helisagedusvõimendajate sisendringides kasutatakse — näiteks mikrofonide juhtmetena — erilisi varjestatud kaableid, mis koosnevad sukataolise metallkiududest koega ümbritsetud ühest või mitmest isoleeritud juhtmest.

Hästi toimiv varjestus peab igakülgselt ümbritsema varjestatavat juhet, lülituse detaili või tervet seadist ja peab olema korralikult maandatud.

15. PEATÜKK

ANTENNID

§ 1. JAOTATUD PARAMEETRITEGA VÕNKERING

Tavalisi kondensaatorist ja poolist koosnevaid võnkeringe nimetatakse keskendatud parameetritega ehk kinnisteks võnkeringideks, sest nendes on elektriväli keskendunud kondensaatori plaatide vahele ja magnetväli — pooli keerdude ümbrusse, hõlmates sealjuures võrdlemisi väikest ruumi. Muutused niisuguse võnkeringi elektri- ja magnetvälja suunas ning tugevuses, mis üheskoos põhjustavadki elektromagnetilise ehk raadiolaine, pole seega suutelised kaugemale levima.

Ulatusliku raadiolaine tekitamiseks, mida saaks kasutada traadita sideks, tuleb suurendada ruumala, mida «täidab» võnkeringi elektri- ja magnetväli. Selleks kasutatakse antenni.

Antenniks nimetatakse elektrijuhet või juhtmete süsteemi, mis muundab elektrivoolu energia elektromagnetilise laine kiirgus-

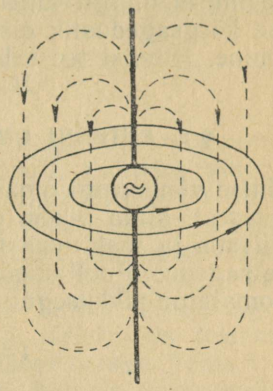
energiaks (raadiosaatjas) või muundab elektromagnetilise laine energia taas elektrivooluks (raadiovastuvõtjas). Raadioantennid on võnkeringide liik.

Iga elektrijuhe omab induktiivsust ja mahtuvust, mis on jagunenud selle tervele pikkusele. Seepärast kõneldaksegi antennist kui jaotatud parameetritega võnkeringist. Nii osutubki iga juhe (näiteks sirge metalltraat või -varras) omapäraseks võnkeringiks, milles võib esineda energia kiirgumine ja resonantsinähtus, samuti ka sundvõnkumine, kui võnkeringile mõjub kõrvaline kõrgsageduslik väli.

Kui moodustada kahest sirgjuhtmest *A* ning *B* ja kõrgsage-



Joonis 15. 1. Võnkumise tekitamine kahest sirgjuhtmest koosnevas jaotatud parameetritega võnkeringis.



Joonis 15. 2. Antenni ümbritseva elektrivälja (punktiir) ja magnetvälja (pidev joon) tinglik kujutamine.

dusvoolu allikast *G* koosnev lülitus (joonis 15. 1), siis laetakse ja tühjendatakse perioodiliselt kumbki sirgjuhe kui kondensaatori «plaadid» teatava potentsiaalini, mille tagajärjel nende vahel mõjub vahelduv elektriväli. Laadimis- ja tühjenemisvooluga kaasneb aga vahelduva magnetvälja ilmumine, mis on kõige tugevam juhtme keskosa ümbruses, sest seal on vool kõige tugevam [1]. Juhtme otstes voolu pole, kuid pinge ja seega ka elektriväli nende vahel on suurim. Vaadeldavat kahest võrdsest sirgjuhtme-lõigust koosnevat võnkeringi nimetatakse *sümmeetriliseks vibraatoriks* ehk *dipooliks*.

Kõrgsagedusgeneraatori sidestamist saateantenniga võib teostada mitmeti, näiteks induktiivselt — vastava kõrgsagedustrafo abil, mille sekundaarmähis ühendatakse dipooli kummagi poole vahele. Antenn kiirgab siis elektromagnetilist lainet, mille pikkus vastab generaatorist saadavale ergutussagedusele:

$$\lambda_{(m)} = \frac{300\,000}{f_{(kHz)}},$$

järelikult töötab ta *saateantennina*.

[1] Juhtme keskosa läbib juhtmepoolte kui kondensaatori kogulaeng; mõnda teist kohta juhtmes läbib ainult sellest punktist kaugema osa laeng. Magnetvälja tugevus on aga igal juhul võrdeline vooluga.

Lahtisest võnkeringist kiirgunud elektromagnetilist välja võib ruumi igas punktis jagada kaheks komponendiks — elektriväljaks, mis mõjub risti laine levimissuunaga ja rööbiti saateantenniga, ning magnetväljaks, mis mõjub samuti risti laine levimissuunaga, kuid ühtlasi risti ka saateantenniga (ning elektriväljaga samas punktis). Seda kujutab joonis 15. 2.

Kui saateantennist väljunud elektromagnetiline väli lõikab oma levimisel mingit juhet — vastuvõtuantenni, siis indutseerub sellesse kõrgsageduslik elektromotoorne jõud ning vastav vooluvõnkumine. Niiviisi teostubki raadiosignaalide traaditu ülekanne.

§ 2. ANTENNI OMASAGEDUS JA LAINEPIKKUS

Lahtise võnkeringi omasagedus sõltub tema induktiivsusest ja mahtuvusest. Mida pikem on antenni juhe, seda suurem on selle induktiivsus ja mahtuvus ning seda väiksemaks osutub omavõnkumise sagedus. Poollainedipooli juhtme pikkus võetakse võrdseks poole omalaine pikkusega:

$$l = \frac{\lambda}{2} \text{ ehk } \lambda = 2l.$$

Kui siin lainepikkus asendada sagedusega, siis saame:

$$\lambda_{(m)} = \frac{300\,000}{f_{(kHz)}} = 2l_{(m)} \text{ ehk } f_{(kHz)} = \frac{150\,000}{l_{(m)}}.$$

Näide. Määrata 20 meetri pikkuse sümmeetrilise vibraatori omasagedus ja lainepikkus.

Poollainedipooli omasagedus

$$f = \frac{150\,000}{20} = 7500 \text{ kilohertsi}$$

ja omalaine

$$\lambda = 2 \cdot 20 = 40 \text{ meetrit.}$$

Tegelikult on dipooli omalaine arvutatust pisut pikem, sest juhtme mahtuvusele lisandub veel tema ja maapinna vahelise mahtuvuse mõju.

Saateantennist kiirgab välja kõige tugevam elektromagnetiline laine siis, kui võnkumine toimub antenni omasagedusel, sest taolisel juhul on I_A ja U_A suurimad ja vastavad väljad tugevaimad. Sellise elektrilise olukorra saavutamiseks on tarvis saateantenni *häälestada* (näiteks dipooli pikkuse muutmise teel).

Antenni omalainet saab muuta lisainduktiivsuste ja -mahtuvuste juurdelülitamisega. Omalaine pikendamiseks kasutatakse järjestikust induktsioonipooli, millega suureneb antenni kui võnkeringi koguinduktiivsus. Omalaine lühendamine on võimalik jär-

jestikuse kondensaatori abil, mis vähendab antenni kogumahtuvust (kaks järjestikust mahtuvust!).

Raadiosaatjate antennidena kasutatakse ka seadist ühestainsast juhtmest. Teine pooljuhe, kui tuua võrdlus dipooliga, on asendatud maandusega. Sellise antenni omalaine on sümmeetrilise dipooli omalainest kaks korda lühem — vool «läbib» juhtme ühe veerandperioodi vältel. Ühest otsast maandatud saateantenni nimetatakse *veerandlaineantenniks*.

Veerandlaineantenni juhtme pikkus on võrdne neljandiku omalainega:

$$l = \frac{\lambda}{4} \text{ ehk } \lambda = 4l.$$

Harilikus võnkeringis on praktiliselt kogu mahtuvus koondatud kondensaatorisse ja induktiivsus — pooli. Lahtises võnkeringis on need aga jaotunud juhtme tervele ulatusele. Selle tõttu võib viimases tekkida — erinevalt kinnisest võnkeringist — resonants ja omasageduslik võnkumine veel mitmel kõrgemal sagedusel. Kõik need sagedused on omavahel kindlas täisarvulises vahekorras. Vähimat omasagedust nimetatakse lahtise võnkeringi *põhisageduseks* ja kõrgemaid omasagedusi järjekorras teiseks, kolmandaks jne. *harmooniliseks* ehk *ülemsageduseks*. Teine harmooniline omab kahekordset põhisagedust, kolmas harmooniline — kolmekordset jne.

Resonantsi puhul ühel harmoonilistest sagedustest võngub lahtine võnkering osade kaupa ja moodustab nagu mitu kõrvuti asuvat ning omavahel sidestatud juhtmelõiku kui iseseisvat võnkeringi.

§ 3. VASTUVÕTUANTENNID

Saate- ja vastuvõtuantennide vahel põhimõttelist erinevust ei ole, sest iga saateantenn on kasutatav ka vastuvõtuantennina.

Saateantenn häälestatakse alati resonantsi väljakiiratava sagedusega, et saada suure amplituudiga võnkumist, kuid vastuvõtuantenni tavaliselt ei häälestata. Seetõttu ei ole ka viimase pikkus eriti oluline. Ringhäälinguvastuvõtjate antennidena (skeemitähis joonisel 15. 3) kasutatakse peamiselt L- ja T-kujulisi ühejuhtmelisi välisantenne (joonis 15. 4) või katusele asetatud ritvantenni. Niisuguste antennide elektriliste andmete ligikaudseks määramiseks võib kasutada järgmisi orienteerivaid väärtusi. Ühejuhtmelise välisantenni iga meeter omab umbes 5-pikofaradist mahtuvust ja 2-mikrohenrist induktiivsust. Nii on tavaliste antennide mahtuvus umbes 200 pikofaradit ja induktiivsus 80 mikrohenrit.

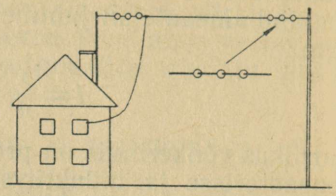
Televisiooniseadmete saate- ja vastuvõtuantennidena kasutatakse signaalisagedusega resonantsis olevat üksikut sümmeetrilist vibraatorit või ka keerukamaid süsteeme mitmest kokkuühendatud

vibraatorist ning erilistest suunajatest ja peegeldajatest. Viimased on antenni dipooliga rööbiti asetatud elektriliselt isoleeritud lisadipoolid, mis suurendavad vastuvõetavat energiat ning parandavad antenni suunamõju.

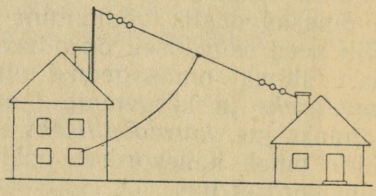
Antenni *suunamõjuna* tunneme nähtust, mille puhul saateantenn kiirgab energiat elektromagnetilise lainena mitte ühtlaselt igasse suunda, vaid ainult mõnda eelistatud suunda, mis oleneb antenni ehitusest. Samuti ka vastuvõtuantenni puhul esineda võiv suunamõju avaldub mingist suunast saabuva elektromagnetilise laine ehk raadiosignaali «eelistamises» — see signaal annab antennis suurema elektromotoorse jõu kui mõnest teisest suunast saabuv sama tugevusega signaal. Näitena võib tuua, et dipool omab nii saate- kui vastuvõtuantennina kasutamisel üsna teravalt avalduvat suunamõju: eelistatud suund ehk maksimum on täpselt risti dipooli juhtmetega ja miinimum — piki juhtmeid.



Joonis 15. 3. Vastuvõtuantenni skeemitähis.



a



b

Joonis 15. 4. L-kujuline (*a*) ja T-kujuline (*b*) vastuvõtuantenn.

Antennide suunamõju oleneb nende ehitusest ja tüübist. Eriti efektseid suundantenne kasutatakse raadio-releeliinide juures. Need antennid koosnevad metallist nõguspeeglitest, mis koondavad antennist kiirguva energia üheks kitsalt piiritletud kimbuks, mis suunatakse järgmise vastuvõtujaama antenni samalaadsele nõguspeeglile.

Raadiolaine lõikumisel antennijuhtmega indutseerub selles kõrgsageduslik elektromotoorne jõud. Selle poolt vastuvõtuantennis põhjustatud vool sõltub laine elektrivälja tugevusest.

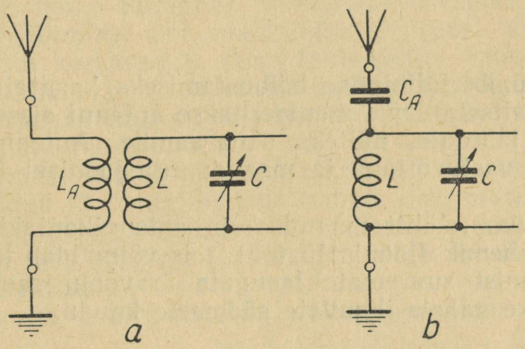
Kauged saatjad tekitavad vastuvõtupunktis väga nõrga välja, seevastu aga võimsa saatja läheduses on väli nii tugev, et võib põhjustada metallesemete kuumenemist pöörisvoolude tagajärjel. Elektromagnetilise välja poolt antennis indutseeritava elektromotoorse jõu suurus sõltub peale väljatugevuse veel antenni pikkusest, kõrgusest ja rõhtsa osa suunast.

Parimaid tulemusi annavad välised vastuvõtuantennid, mis on asetatud võimalikult eemale majadest, puudest ja teistest varjavatest esemetest.

Maja katusele asetatud vastuvõtuantenn peab olema sellest vähemalt 3 meetrit kõrgemal; majade, puude või spetsiaalsete mastide vahele ehitatud antenni kõrgus maast peab samuti olema võimalikult suur. Antenni juhe peab olema hästi isoleeritud. Selleks asetatakse antenni tegelikult töötava horisontaalosa otste ja tõmbitsana töötavate traatide vahele kahest või enamast portselanisolaatorist koosnev «ketike» (joonis 15. 4).

§ 4. MAANDUS; VASTUKAAL

Tavalise ringhäälinguvastuvõtja antenniks kasutatakse mittehäälestatavat, maast isoleeritud juhet, mis maandatakse läbi vastuvõtja antennisidestuspooli — antennimähise (joonis 15. 5-*a*). Antenn on sellel juhul induktiivselt sidestatud vastuvõtja sisendvõnkeringiga *L-C*, kuid teda võib sidestada ka mahtuvuslikult väikese mahtuvusega kondensaatori C_A abil (joonis 15. 5-*b*). Sellelgi juhul on tarvilik maandus.



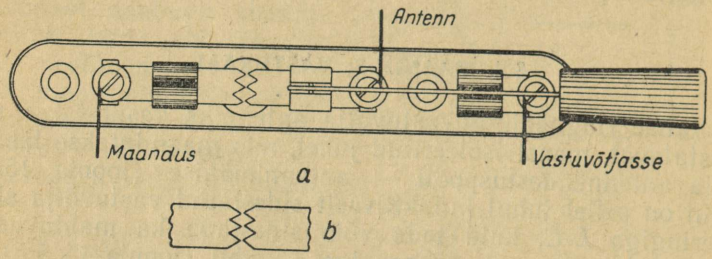
Joonis 15. 5. Antenni induktiivne (*a*) ja mahtuvuslik (*b*) sidestamine.

Maandust võib asendada maast isoleeritud teine antennitaoline juhe, *vastukaal*, mis on paigutatud maapinna lähedale antenni alla. Vastukaalu kasutatakse liikuvates raadiojaamades maanduse asemel, kus pole igakord võimalik ehitada korralikku maandust. Tihti töötab vastukaaluna ainuüksi raadioseadme metallšassii või lennuki (auto) puhul nende liiklusvahendite kere.

Maanduse ehitamiseks tuleb kaevata maapinna niisketesse kihtidesse — kuni põhjaveeni — mingi suurepinnaline metallese, mille külge on keevitatud või joodetud ühendustraat. Maanduseks võib

kasutada ka veevärgi ja keskkütte torustikke, viimaseid küll ainult halvema eduga. Liivase või kaljuse pinnase puhul on vastukaalu kasutamine maanduse asemel vältimatu.

Maast isoleeritud välisantenni võivad koguneda — eriti äikese ajal — suured elektrilaengud, mis võivad muuta antenniga ühendatud vastuvõtja kõlbmatuks või halvemal juhul põhjustada isegi tulekahju. Seetõttu on hädavajalik äikese puhul ja raadioseadme mittekasutamisel ühendada välisantenn raadioaparaadi küljest ära ja maandada.



Joonis 15.6. Antenni ümberlüliti ühendamisviis (*a*) ja tema liigpingekaitse (*b*).

Antenni ümberlülitamise hõlbustamiseks kasutatakse erilülitit (nn. «piksekaitset»), mis monteeritakse antenni sissetoomiskohale võimalikult lähedale, näiteks aknaraamile. Antenni ümberlüliti ühendatakse vastuvõtjaga ja maandusega joonisel 15.6-*a* toodud skeemi järgi.

Antenni ümberlüliti maandus- ja antennikontaktide vahel on väike sädevahemik (joonis 15.6-*b*), mis võimaldab ka mittemaandatud antennist suuremate laengute äravoolu saehambataoliste metallteravike vahele ilmuvate sädemete kaudu.

§ 5. RAADIOLAINETE LEVIMINE

Saateantennist kiirguv kõrgsageduslik energia levib ruumis sirgjooneliselt nagu valguski. Osa sellest levib rööbiti maakera pinnaga ning kannab nimetust pinnalaine; üleskiirguv osa moodustab ruumilaine.

Pinnalaine levib mööda maapinda ning kaldub maakera kumeruse tõttu kõrvale esialgsest sirgjoonelisest teest. *Ruumilaine* levik oleneb Maad ümbritsevate kõrgemate hõrendatud õhukihtide elektrilisest olekust. Päikesekiirgus ja kosmilised kiired ioniseerivad kõrgemates õhukihtides gaasimolekule. Kiirgusenergia «lööb» molekulidest välja elektrone, muutes need molekulid niiviisi positiivseteks ioonideks. Ioniseeritud gaas võib põhjustada raadiolaine

levimissuuna muutumist peegeldumise ning murdumise näol. Samaaegselt ioniseerimisprotsessiga toimub kõrgemates õhukihtides ka vastupidine nähtus — ioonide taasühinemine elektronidega ning neutraalsete aatomite ja molekulide moodustumine. Olenevalt päikese kiirguse intensiivsusest on ka ioonide tihedus kõrgemates õhukihtides väga muutuv — see sõltub aastaajast, kellaajast ja muudest teguritest.

Maa atmosfääri kõrgemaid ioniseeritud kihte nimetatakse *ionosfääriks*. Ionosfääri elektriline olek mõjutab suurel määral ruumilainete levikut ja raadiosidet üldse.

Raadiolainete levikut mingis keskkonnas saadab rida nähtusi, mida vaatleme siinkohal üksikult.

Energia hajumine. Saateantennist eemaldumisel kahaneb elektromagnetilise välja tugevus kiiresti, sest kaugemal peab väli «täitma» üha suurema ruumala.

Ainsaks vastuabinõuks energia hajumisele on suundantennide kasutamine saatjates. Nende abil saab koondada kogu antennist väljakiirguvat energiat kitsaks kimbuks. Suundantenne kasutatakse raadiolokatsioonis, raadiomajakates ja vähesel määral ka lühilainelises ringhäälingutehnikas. Linnadevahelised ultralühilainelised raadioreleeliinid töötavad suundsaatmise ja -vastuvõtu põhimõttel, mis hoiab tunduvalt kokku saateenergiat.

Energia neeldumine. Osa raadiolaine energiast läheb kaduma neeldumise tõttu keskkonnas, mida laine läbib. Tahketes dielektrikutes, pooljuhtides ja juhtides on neeldumine võrdlemisi märgatav. Ioniseerimata õhus on neeldumine võrdlemisi väike ja õhutühjas ruumis puudub hoopis.

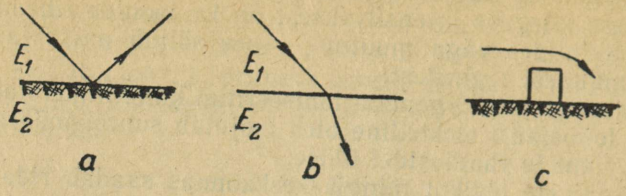
Kui raadiolaine kohtab mõnda elektrijuhti, siis suur osa tema energiast neeldub ja paneb liikuma vabad elektronid juhi materjalis — tekitab pinge. Dielektrikud neelavad elektromagnetilise välja energiat, sest kõrgsagedusväli põhjustab nende materjalide molekulides elektronide ümberpaigutumise — sageduse rütmis muutuva suunaga polarisatsiooni, millega kaasneb dielektrikuskadu.

Laine peegeldumine ja murdumine. Ühesuguses keskkonnas levib laine sirgjooneliselt, kuid kahe erinevate dielektriliste omadustega keskkonna lahutuspinnal muutub laine levikusuund. Seal võib tekkida kas peegeldumine või murdumine (joonis 15.7-*a* ja -*b*). Väga hästi peegeldavad raadiolaineid elektrijuhid. Murdumisnähtus esineb laine liikumisel ühest dielektrikust teise.

Laine difraktsioon on selle levimise joone kõverdumine — laine paindumine mõne takistava eseme või maapinna kumeruse taha (joonis 15.7-*c*). Difraktsiooninähtus avaldub pikematel lainetel suuremal määral kui lühematel lainetel.

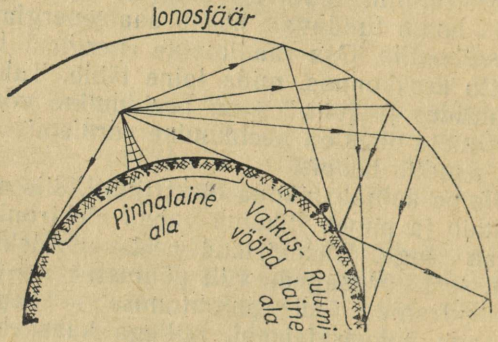
Lainete interferents on mitme sama sagedusega (või lähedaste sagedustega) laine liitumine ruumi mingis punktis, mis annab uue senisest erineva sagedusega või amplituudiga laine. Sageli interfereeruvad vastuvõtuantennis kahe või enama raadiosaatja lai-

ned, kuid võib tekkida ka interferents ühest ja samast saatjast kiirgunud ruumilainete vahel, kui need on läbinud erineva pikkusega tee (joonis 15. 8). Erinevate saatjate signaalide vahel ilmuv



Joonis. 15. 7. Raadiolaine peegeldumine (*a*), murdumine (*b*) ja difraktsioon ehk paindumine (*c*).

interferents avaldub vastuvõttu segavate vilede tekkimisena. Ühe ja sama saatja lainete interferents avaldub nn. *vaibumisena* (feedinguna): vastuvõetava saatja kuuldavus muutub järsku või aega-



Joonis 15. 8. Lühilaine levimine peegeldumisega ning murdumisega ionosfääris ja maapinnal.

mööda nõrgemaks ning saade kõlab moonutatult. Nähtus võib areneda kuni saatja täieliku «kadumiseni» lühemaks ajaks. Vaibumise olemus peitub selles, et mitme erineva tee läbinud laine üheaegsel mõjumisel võivad nad sattuda vastasfaasi ja üksteise mõju kas täielikult või osaliselt hävitada, koosfaasis aga tugevdada.

Raadiolainete levimises võib tähele panna olenevalt lainepikkusest järgmisi erinevusi:

Tugevad pikklainesaatjad evivad suhteliselt ulatusliku pinnalaine, kuid tähtsusetu ruumilaine. Kuna pikklaine-side toimub ainuüksi pinnalaine vahendusel, siis vaibumisnähtus ning

kella- ja aastaaja mõju on vähe märgatavad. Vastuvõtt on väga stabiilne, kuid ühenduskaugused on võrdlemisi piiratud. Kasutada tuleb suuri saatevõimsusi.

Ringhäälingutehnikas kasutatavatel *kesklainetel* on pinnalaine osatähtsus suhteliselt väiksem, sest see neeldub õhus, maapinnas ning esemetes suurema sageduse tõttu kiiremini. Vastuvõtt päeval toimub kesklainetel pinnalaine abil, öösel aga põhiliselt ionosfääris peegeldunud ja murdunud ruumilaine abil. Seetõttu on kesklaine levimiskaugus pimedas palju suurem kui valges. Vaibumisnähtus võib siin — eriti laineastmiku lühemas osas — muutuda juba üsna segavaks. Talvel saab kesklainetel ületada suuremaid kaugusi kui suvel.

Kõigi *lühilainete* puhul on pinnalaine ulatus tähtsusetu (mõnedkümned kilomeetrid ka võimsatel saatjatel). Kogu raadioside lühilainetel toimub ionosfääris peegeldunud ja murdunud ruumilaine abil. Ioniseeritud õhukihtide mittepüsiva oleku tõttu on lühilaine levikul rida iseärasusi. Vaibumisnähtus mõjub siin kohati väga intensiivselt; aasta- ja kellaaja mõju on väga tunduv. Öösel levivad üldiselt paremini astmiku pikemad lained ja päeval lühemad. Soodsates tingimustes on lühilainetel võimalik väga kaugete ühenduste loomine väikeste saatevõimsustega (mõned vatid).

Lühilainesaatjate ümber tekib niinimetatud *vaikusvöönd*. Saatjast eemaldumisel on korralik vastuvõtt võimalik kuni teatava kauguseni, kus ilmub kitsam või laiem ala, milles vastuvõtt puudub või on raskendatud. Veelgi kaugemal ilmuvad saatja lained taas. Vaikusvööndi tekkimist põhjustab asjaolu, et pinnalaine mõjupiirkonna lõppemisel ei alga veel ionosfäärist tagasipeegelduva ruumilaine mõjupiirkond (joonis 15.8).

Ultralühilained levivad sirgjooneliselt ega allu märgatavalt difraktsiooninähtele. Nad läbivad ka ionosfääri ega peegeldu sellest üldiselt tagasi maapinnale. Seetõttu ultralühilaine ruumilained sidetehnika kaasaegse seisundi juures veel ei sobi usaldatava kaugside loomiseks. Seda laineastmikku kasutatakse pinnalainena peamiselt lähimaasideks 50 kuni 100 kilomeetri ulatuses (näiteks dispetšerisideks, raadioreleeliinides, televisioonis ja ultralühilaine-ringhäälingus).

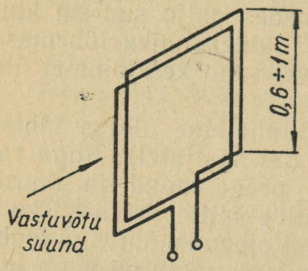
§ 6. RAAM- JA MAGNETANTENNID

Raamantenn on eritüüpi vastuvõtuantenn, mis oma ehituselt kujutab suuremõõtmelist induktsioonipooli (joonis 15.9). Kui senikirjeldatud vastuvõtuantennides indutseerub vool raadiolaine elektrivälja mõjul, siis raamantennile mõjub just laine magnetväli.

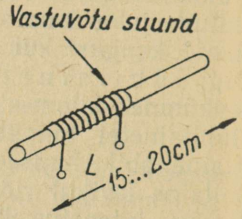
Raamantennile on omane kaunis teravalt avalduv suunamõju: tugevaim vool indutseerub sellesse saatjatest, mis asuvad raami külgede sihis (raami tasapinnas). Raami pinda risti tabav

laine mähisesse voolu ei indutseeri. Raamantenni pööramisega ümber püsttelje on võimalik saavutada vajaliku saatja parimat vastuvõttu ning vabaneda segava saatja mõjust (näiteks interferentsist). Võrreldes tavaliste antennidega annab raamantenn väiksema elektromotoorse jõu.

Uuemates raadiovastuvõtjates kasutatakse magnetantenne. *Magnetantenni* moodustab võrdlemisi pikale magnet-dielekt-



Joonis 15. 9. Raamantenn. Mähis kuulub vastuvõtja sisendvõnkeringi.



Joonis 15. 10. Ferriit- (magnet-) antenn. Mähis kuulub vastuvõtja sisendvõnkeringi.

rikust (ferriidist) valmistatud südamikule keritud pool (joonis 15. 10). Suure magnetilise läbitavusega südamik kontsentreerib raadiolainete magnetvälja, mistõttu poolis indutseerub antenni väikeste mõõtmete juures küllaltki suur elektromotoorne jõud.

Magnetantenni pool on ühtaegu vastuvõtja sisendvõnkeringi induktiivsuseks. Elektromotoorne jõud E_A magnetantennis, mille indutseerib raadiosignaal, on seda suurem, mida kõrgem on magnetantenni sisaldava võnkeringi hüvetegur Q.

§ 7. RAADIOHÄIRED

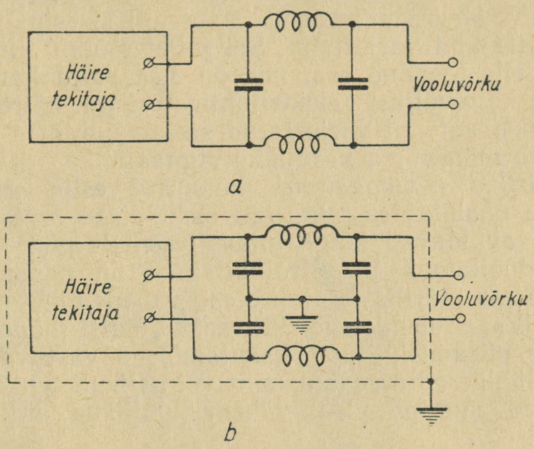
Raadiohäired on mitmesuguse päritoluga parasiitsed elektrilised võnkumised, mis satuvad antenni või toitejuhtmestiku kaudu vastuvõtjasse või tekivad selles. Häired avalduvad vastuvõtja valjuhääldajas normaalset vastuvõttu segavate helidena (viled, kahinad, raginad). Nende põhjused on mitmesugused: mittevajalikud raadiosaatjad, tööstuslikud elektriseadmed, atmosfäärilised nähted ja vastuvõtjas eneses ilmnevad protsessid.

Häired kõrvalisest raadiosaatjast tekivad peaasjalikult siis, kui selle sagedus enam-vähem ühtib vastuvõetava saatja sagedusega. Sellisel juhul tekib mitme programmi läbikostvus ja pidev interferentsivile, mille sagedus võrdub kummagi saatja kandesageduse vahega. Seda liiki häiretest saab vabaneda suundantenni (näiteks magnetantenni või raamantenni) kasutamisega, kui segav saatja asub küllalt erinevas suunas. Lähedase häiriva saatja

puhul ei aita ka see abinõu, sest vastuvõtja sisendile mõjuv häirepinge on siis palju kordi suurem kaugema saatja kasulikust signaalist.

Kui häiriva saatja sagedus erineb vastuvõetavast sagedusest rohkem kui nelja-viie kilohertsi võrra, siis saab häirest vabaneda ringhäälingu-vastuvõtja selektiivsuse suurendamise teel.

Omaette liigi raadiohäireid moodustavad *tööstuslikud häired*, mis mõjuvad peaasjalikult linnades. Nende häirete teke on seotud voolude ja pingete järskude muutustega või sädemete tekkimisega



Joonis 15. 11. Tööstuslike raadiohäirete levikut takistavad filtrid elektrivõrgu ja häiretekitaja vahel.

elektriseadmetes. Elektrivoolu lülitamisega ja katkestamisega kaasneb — eriti just kõrgemate pingete puhul — sädeme tekkimine lülitis. Iga elektrisädet saadab sumbuv kõrgsageduslik võnkeprotsess, mis osalt kiirgub voolujuhtmetest kui antennist elektromagnetilise väljana laiali, osalt aga levib mööda juhtmeid. Niiviisi tekkiv häireväli võib vastuvõtuantenni sattumisel indutseerida selles saatja signaalidega võrreldes palju kordi kõrgema pinge. Pealegi iseloomustab seda liiki häireid äärmiselt lai sagedusriba, mille ulatuses üheaegselt tekib liitvõnkumine. Tööstuslikud raadiohäired on eriti märgatavad kesklaineastmikus.

Tööstuslike raadiohäiretega võitlemine annab rahuldavaid tulemusi vaid abinõude kasutamisel nende tekkimise kohas, mis summutaksid kõrgsageduslikud võnkumised või vähemalt takistaksid nende levikut elektrivõrgu juhtmetes. Lihtsaim võimalus sädelemisest tingitud häirete vähendamiseks on sädevahemiku — lüliti, elektrimootori harjade, elektrikõlisti katkestikontaktide jms. — sildamine kondensaatoriga ja mitmesuguste kõrgsagedusfiltrite kasutamine häiretekitajate võrkulülitamisel (joonis 15. 11). Fil-

ter peab vabalt läbi laskma elektriseadme talitlusvoolu (alalisvoolu või tehnilise vahelduvvoolu) ja tõkestama kõiki kõrgsagedusliikke parasiitvõnkumisi. Niisuguse filtriga võib varustada ka elektrivõrgust toidetavaid vastuvõtjaid, et vältida häirete pääsu nendesse toitejuhtmete kaudu.

Lihtsaimal juhul täidab filtri ülesannet häireallika sädelevat kontakti sildav kondensaator, mis moodustab tekkivale kõrgsagedusvoolule lühise. Häid tulemusi annab ka häireallikate täielik varjestamine ühes varjestuse maandamisega.

Antenni kaudu vastuvõtjasse tungivate tööstuslike häirete vähendamiseks on otstarbekas välisantenni sisestusjuhe maandatud metallkatte abil varjestada. Sel juhul töötab antennina tegelikult vaid selle ülemine osa, mis on aga palju kaugemal maju ümbritsevast häireväljast (elektrijuhtmetest jm. häirelevitajatest). Kahjuks esineb antenni varjestatud sisestusjuhtmes energiakadu, mis vähendab mõnevõrra kasulikku signaali.

Atmosfäärilisi raadiohäireid kutsuvad esile mitmesugused madalamates õhukihtides toimuvad elektrilised protsessid (äike). Need häired avalduvad kõige intensiivsemalt pikk- ja kesklaine piirkonnas; lühilaineil ja ultralühilaineil on nende mõju vähe märgatav. Atmosfäärilistest häiretest vabanemine pole muidugi mõeldav. Küll saab nende subjektiivset tajumist mõnevõrra vähendada eriliste piiramislülituste kasutamisega vastuvõtjas. Suundantennid ja lühikesed madalad (s. o. võimalikult väikese omamahtuvusega) antennid on pisut vähem tundlikud atmosfäärilistele häiretele.

Raadioseadmete tööd häirib ka nendes enestes tekkiv parasiitne müra, mis avaldub nõrgema või tugevama pideva kahinana, millele vahelduvvoolu võrgust toidetavas aparaadis võib lisanduda ka madalatooniline urin (*«võrgumüra»*).

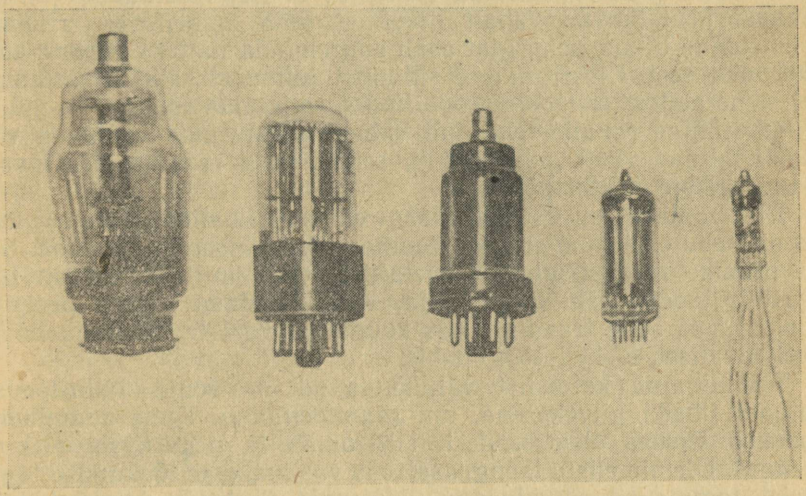
Häirekahinad ilmuvad suure võimendusega vastuvõtjate ja helivõimendajate vooluringides (takistitel) ja elektronlampides. Elektronid asuvad elektrijuhtides pidevas korrapäratus soojuslikus liikumises, mis on seda intensiivsem, mida kõrgem on temperatuur. Seepärast on üksikutel momentidel ka pingestamata juhtme või takisti mõnes osas elektrone pisut rohkem kui teises osas, mistõttu ilmuvadki nn. *soojuslikud häirepinged*. Need elektrilaengute paiknemise ebaühtlused avalduvadki pideva kahinana vastuvõtja valjuhääldajas. Samalaadse häire annab ka «lampide kahin», mida põhjustab elektronide liikumise ebaühtlus elektronlambis. Häire on seda tugevam, mida suuremat võimendust kasutatakse, sest koos kasuliku signaaliga võimendatakse ka kahinaid. Lähedaste tugevate saatjate signaalide vastuvõtul ei rakendata vastuvõtja võimendustagavara kuigi täielikult, mistõttu siis ka häirekahinad avaldavad vähe mõju. Kaugete saatjate vastuvõtul, millede signaalide tugevus satub samasse suurusjärku vastuvõtja häirekahinatega, võimendatakse needki koos kasuliku signaaliga ja nende tugevuse vahekord pärast võimendamist jääb endiseks.

16. PEATÜKK

ELEKTRON- JA IOONSEADISED

§ 1. ÜLDKÜSIMUSED

Peaaegu kunagi ei piisa elektromagnetiliste lainete poolt vastuvõtuantennis indutseeritud kõrgsagedusvooludest selleks, et panna normaalselt tööle raadiovastuvõtja valjuhääldajat. Seetõttu tekibki tarvidus nende võnkumiste võimendamiseks. *Võimendamine* on protsess, kus olemasolevaid nõrku vahelduvvoole või vooluimpulsse kasutatakse suuremate elektrienergia hulkade tüürimiseks.



Joonis 16. 1. Elektronlampe.

Inertsivaba võimendusseadme puudumine takistas omal ajal tunduvalt raadiotehnika arengut. Raskustest saadi üle alles elektronlambi (raadiolambi ehk elektrontoru) kasutuselevõtmisega võimendamisseadmena. Elektronlampi läbivat voolu on võimalik praktiliselt inertsivabalt tüürida tühise energiahulgaga või isegi energiat kulutamata. Peale selle on elektronlampidel veel teisigi väärtuslikke omadusi. Nende abil võib näiteks muundada alalisvoolu energiat vahelduvvoolu energiaks ning vastupidi jne. Mõnede kaasaegsete elektronlampide vaateid kujutab joonis 16. 1.

Viimasel aastakümnel on hakatud ka mõningate pooljuhtide (germaaniumi, räni) erilisi füüsikalisi omadusi kasutama elektronlampidele vastavate, kuid viimastest tunduvalt ökonoomsemate seadmete valmistamiseks (pooljuhtdioodid ja -trioodid).

Praegu pole enam ühtki teaduse või tehnika ala, kus ei rakendataks mingil viisil elektroonika mitmekülgseid vahendeid automatiseerimisel, tööprotsesside juhtimisel, signaliseerimisel, kontroll-mõõteriistades ja mujal.

Käesolevas peatükis vaadeldakse elektronlampe ja teisi raadiotehnikas kasutatavaid elektronseadiseid, nende ehitust ja talitluspõhimõtteid. Pooljuhtseadistele on pühendatud käesoleva õpiku 17. peatüki 5. paragrahv ning 22. peatükk.

§ 2. TERMOELEKTROONILINE EMISSIOON; KATOOD

Elektrijuhis sisalduvate vabade elektronide liikumisenergia võib mõnel juhul suureneda seevõrra, et nad eralduvad juhtme pinnast ja jätkavad vabalt liikumist seda ümbritsevas ruumis. Elektronide liikumisenergiat saab suurendada näiteks juhtme kuumutamise teel. Elektronide eraldumist juhtmest selle kuumutamisel nimetatakse *termoelektrooniliseks emissiooniks*.

Õhutühjas ruumis tekitatud vabade elektronide voolu on võimalik mitmel viisil mõjutada ja sellele ongi rajatud elektrovaakuumseadiste talitluspõhimõte.

Elektronlamp on õhutühi klaas- või metallballoon (-kolb), milles on vabu elektrone eraldav (emiteeriv) elektrood — *katood*. See on peenike raskestisulavast metallist traat, mille otsad on isoleeritult toodud läbi kolvi välja. Kui ühendada sobiva pingega vooluallikas selle traadiga, siis kuumutab vool traati nagu hõõgniiti tavalises elektri-hõõglambis.

Kuumutatud katoodist väljalennanud elektronid ümbritsevad katoodi tiheda pilvekesena, nn. *ruumlaenguna*. Kuna ruumlaeng koosneb üksnes elektronidest, siis omab ta negatiivset elektrilaengut. Ühenimeliste laenguosakeste vastastikuse tõukumise tagajärjel jagunevad ruumlaengu elektronid ühtlaselt lambi kolvis. Ruumlaengu teatava tiheduse juures katkeb emissioon, sest ruumlaeng tõrjub hiljem emiteeruvad elektronid katoodile tagasi.

Mida kõrgem on katoodi temperatuur, seda suurem hulk elektrone saab teatud aja jooksul väljuda emiteerivast pinnast. Väga kõrgetel temperatuuridel võib emiteeruvate elektronide hulk muutuda isegi selliseks, et nad moodustavad kümnetesse milliampritesse või suure katoodi pinna juures isegi ampritesse ulatuva tugevusega emissioonivoolu.

Elektronlampides kasutatakse otsese ja kaudse küttega katoode. *Otsese küttega katoodi* moodustab elektrone emiteeriv hõõgniit ise. Raadiotehnika algpäevil valmistati otsese (vahetu) küttega katoodid puhtast volframist, mis sulab alles 3400° temperatuuril, kuid hiljem hakati neid katma — aktiveerima — mõne teise metalli või oksüüdi kihiga.

Aktiveeritud katoodid emiteerivad küllaldaselt elektrone tunduvalt madalamate temperatuuride juures kui aktiveerimata

katoodid. See aga omab küttevõimsuse kokkuhoiu seisukohalt suurt tähtsust.

Praegusel ajal kasutatakse kolme tüüpi aktiveeritud katoode: oksüüd-, baarium- ja karbiiditud katoodi.

Oksüüdkatood on valmistatud niklist, mis kaetakse õhukese baarium- ja strontsiumoksüüdide kihiga. Kuna tema talitlustemperatuur on 600 kuni 800° C, siis on ka küttevõimsuse tarvidus võrdlemisi väike.

Baariumkatoodi aluseks on volframtraat, mis kaetakse baariumiga. Ta on väga ökonoomne ning omab püsivat emissiooni. Selle katoodi talitlustemperatuur on umbes 600° C.

Karbiiditud katood on volfram- või molübdeenniit, mis on töödeldud atsetüleenis ja kaetud seejärel õhukese tooriumiaatomite kihiga. Niisugune katood töötab temperatuuril mitte üle 2000° C (tavaliselt umbes 1700° C juures) ning anoodpingetel kuni 1500 volti.

Aktiveeritud katoodid taluvad võrdlemisi hästi lühiajalist «ülekütmist» (selle all mõistetakse kütteniidi kuumutamist üle normaalse talitlustemperatuuri ettenähtust kõrgema küttepingega). Tuleb pidada silmas, et aktiveeritud katood võib ülekütmise või lihtsalt vananemise tõttu kaotada emiteerimisvõime, ilma et kütteniit «läbi põleks», s. o. katkeks.

Väliselt on aktiveeritud katoode võimalik eraldada hõõgumise intensiivsuse poolest normaalse küttepinge juures. Karbiiditud katood hõõgub helekollaselt, oksüüdkatood punaselt ja baariumkatood — vaevumärgatavalt tumepunaselt.

Otsese küttega aktiveeritud katoodidega lampe kasutatakse nende ökonoomsuse tõttu patareidest toidetavates raadioseadmetes.

Otsese küttega raadiolampe on raske kütta valgustusvõrgust saadava madalapingeliseks transformeeritud vahelduvvooluga, sest siis hakkaks kütteniidi temperatuur ning emissioonivool muutuma kahekordse voolusageduse taktis. Samuti pole alati soovitav, et küttevooluallikas on vahetus ühenduses katoodiga. Need kaalutlused viisid teise katooditüübi loomisele.

Kaudse kütte puhul on elektronlambi katood (emiteeriv elektrood) elektriliselt isoleeritud teda kuumutavast kütteniidist. Kuna niisuguse katoodi küttekeha on võrdlemisi suure soojusmahutavusega, siis ei avalda kütva vahelduvvoolu hetkväärtuse muutumine enam segavat mõju katoodi temperatuurile. Kaudse küttega katoodi volframist valmistatud kütteniit on isoleeritult paigutatud nikkeltorukesse enamasti bifilaarse (silmusekujulise) spiraalina, et kaotada küttevoolu magnetvälja mõju emissioonile (võrdsete ja vastupidiselt suunatud lähestikuste voolude ümber tekkivad magnetväljad hävivad). Nikkeltorukese välispind aktiveeritakse ja ainuüksi see mõjub katoodina.

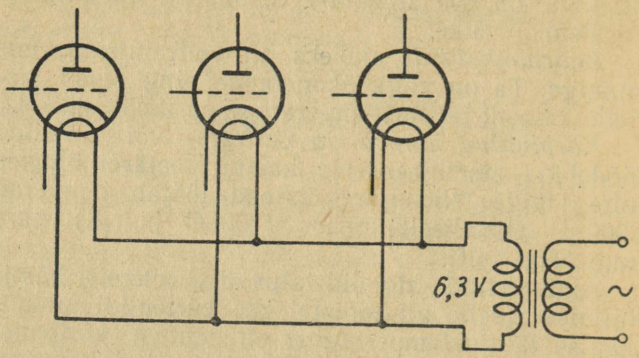
Lihtsaima kaudselt köetava katoodiga elektronlambi — dioodi skeemitähise leiame jooniselt 16. 2. Nikkeltorukese-katoodi kül-

jest tuleb muidugi läbi lambi ballooni viia veel üks ühendustraat. Sageli ei märgitagi lülitusskeemides kaudse küttega lambi kütteniidi vooluringi.

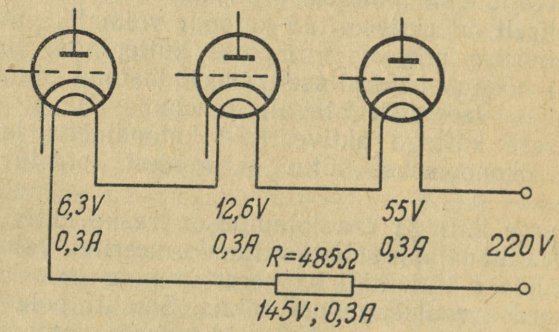
Elektroodide ühendused moodustavad ballooni küljes nn. *sokli*, milles pisteharud paiknevad ebasümmeetriliselt või mis on varustatud nn. võtmega, et vältida elektronlambi ebaõiget paigutamist



Joonis 16. 2. Kaudse küttega dioodi skeemitähis ja elektroodide tähised.



Joonis. 16. 3. Elektronlampide kütmine rööbiti-lülituses.



Joonis 16. 4. Elektronlampide kütmine järjestikku-lülituses.

pesasse. Elektronlampide tabelites on antud ka nende *soklilülitused*, s. o. skeemid, mis määravad üksikute elektroodide ühenduskontaktide asendid soklil ja ka pesal. Kõik soklilülitused antakse vaatega soklile või pesale altpoolt.

Tavalised kaudse küttega elektronlambid on konstrueeritud niiviisi, et kütteniidi ja katoodi vahel võib mõjuda kuni sajavoldine pinge, ilma et kütteniidi isoleermaterjal rikneks. Eriotstarbeliste elektronlampide maksimaalne lubatav pinge kütteniidi ja katoodi vahel on antud tabelites.

Raadioseadmetes võib kaudse küttega lampe kütta rööbiti- või järjestikku-lülituses. Rööbiti-lülituses kütteniitidega lampide

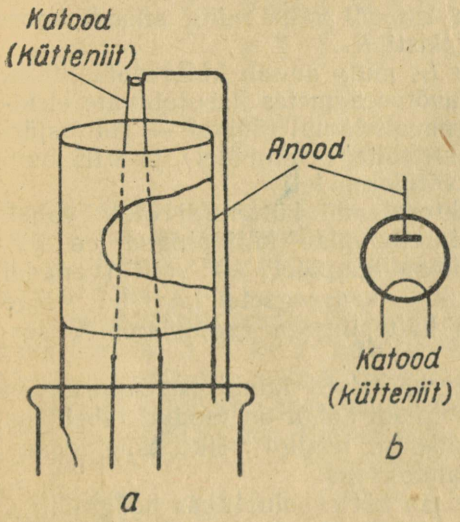
küttepinged peavad muidugi omavahel võrduma (joonis 16. 3), kuid küttevoolud võivad erineda. Rööbiti-lülitust toidetakse sobiva pingega trafost, akust või kuivelemendist.

Kaudselt köetavate raadiolampide kütteniitide järjestikku lülitamist kasutatakse mõnedes odavamates vastuvõtjates, et vältida küttepinge trafot. Selles lülituses peavad kõigi lampide küttevoolud olema ühesuurused, et vältida mõne lambi pidevat üle- või allakütmist. Küttepinged ei tarvitse siin võrduda, kuid võrgupinge võimalik «ülejääk» tuleb muuta pingelanguks lisatakistil (joonis 16. 4).

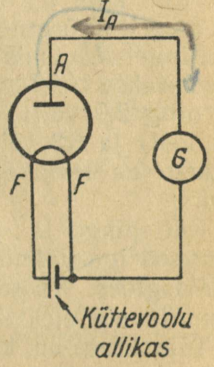
§ 3. DIOOD

Kui elektronlambi õhutühja ballooni paigutada katoodile lisaks veel teine elektrood — *anood* (lihtne metallplaat) ühes väljatoodud ühendusjuhtmega, siis saame lihtsaima elektronlambi, nn. *dioodi* ehk kahe elektroodiga lambi (joonised 16. 2 ja 16. 5). Selle elektronlambi balloonist väljub otsese kütte puhul kolm ja kaudse kütte puhul neli ühendusjuhet — hõõgniidi kaks otsa ja anood ning teisel juhul lisaks nendele veel katood.

Katoodist emiteeruvatest elektronidest langeb osa anoodile. Viimase ühendamisel katoodiga (näiteks läbi tundliku galvanomeetri *G*, nagu skeemis joonisel 16. 6), ilmub selles vooluringis — *anoodringis* — nõrk elektronide vool suunaga anoodilt läbi galvanomeetri katoodile.



Joonis 16. 5. Otsese küttega dioodi ehitus (*a*) ja skeemitähis (*b*).

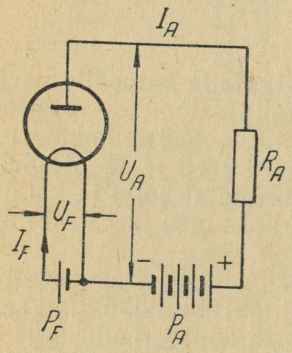


Joonis 16. 6. Kuumutatud katoodist eralduvad elektronid langevad anoodile ja moodustavad anoodvoolu I_A.

Tunduvalt suuremaks kujuneb vool anoodringis — *anoodvool* (tähis I_A), kui välise alalispingeallikaga, näiteks anoodpatareiga anda anoodile katoodi suhtes positiivne potentsiaal. Niisugusel juhul on katoodi ja anoodi vahel elektriväli, mis suunab emiteerunud elektronid anoodile.

Kui anood on katoodi suhtes negatiivse potentsiaaliga, siis puudub vool anoodringis, sest elektronid tõukuvad anoodist eemale ega lange sellele.

Dioodi anoodvool sõltub anoodi positiivse pinge suurusest, katoodi materjalist, pindalast ning temperatuurist. Mida kõrgem on viimane, seda rohkem emiteerub elektrone ja seda suuremaks kujuneb anoodvool. Katoodi kuumutamist piirab kütteniidi sulamistemperatuur.



Joonis 16.7. Pinged ja voolud dioodi vooluringides.

Dioodiga ühendatakse alati kaks täiesti iseseisvat vooluringi: küttering ning anoodring (joonis 16.7). Kütteringi kuulub hõõgniidi ja ühendusjuhtmete kõrval küttevooluallikas (joonisel patarei P_F), mille ainus ülesanne on anda kütteniidi kuumutamiseks voolu. Anoodringi moodustab vooluallikas (näiteks anoodpatarei P_A), ühendusjuhtmed, õhutühi vahemik dioodi anoodi ja katoodi vahel ning anoodi koormustakisti R_A.

Katoodi kuumendavat voolu I_F, mida annab küttevooluallikas, nimetatakse *küttevooluks*. Vastuvõtuseadmetes kasutatavate elektronlampide küttevool on — olenevalt lambi tüübist — suurusjärgus 0,03 kuni 0,2 amprit (patareitoitega lampidel) ja 0,05 kuni 2,0 amprit (võrgutoitega vastuvõtulampidel).

Pinget U_F, mis mõjub elektronlambi kütteniidi otste vahel, nimetatakse *küttepingeks*. Patareilampide küttepinged on 0,6, 1,2 ning 2,0 volti [1] ja võrgutoitega lampidel 4,0 volti (vanadel tüüpidel) ja 6,3 volti ning enam — kaasaegsetel tüüpidel. Kõige rohkem on levinud 6,3-voldise küttepingega raadiolampide seeriad.

Küttepinge ja -vool, samuti ka teised lampi iseloomustavad suurused iga valmistatava lambitüübi kohta on toodud tabelitena kataloogides. Käesolevale õpikule on lisatud väike tabel enamkasutatavate elektronlampide andmetega.

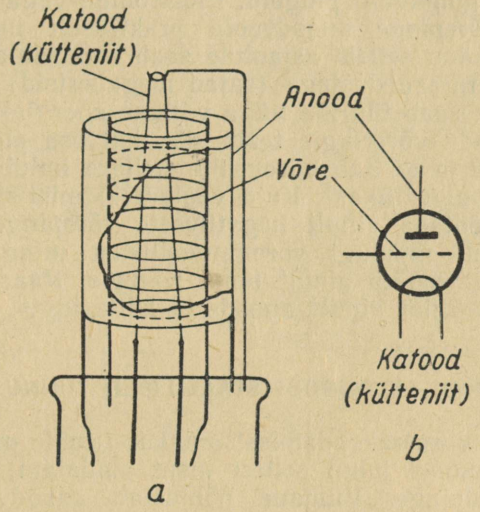
Tähtsusetu on, kuidas ühendada küttevooluallikas hõõgniidiga, sest olenemata voolusuunast kütteringis kuumeneb katood ja

[1] Vastavalt leelisaku või happeaku keskmisele pingele.

tekib elektronide emissioon. Veelgi enam — emissioon tekiks ka siis, kui elektrivoolu asemel saaks mingil muul viisil kuumutada katoodi.

§ 4. TRIOOD

Dioodi kõrval on elektronlampide teiseks põhitüübiks *triood* ehk kolme elektroodiga lamp. See koosneb, nagu dioodki, katoodist ja anoodist, millede vahel tekitatakse õhutühjas ruumis elektronide vool. Trioodi erinevuseks on kolmanda elektroodi — võrgukujulise või spiraalse traadist *võre* lisamine elektronide liiku-



Joonis 16.8. Otsese küttega trioodi ehitus (*a*) ja skeemitähis (*b*).

mise teele anoodi ning katoodi vahele (joonis 16.8). Võre potentsiaali saab muuta kolvist väljatoodud juhtme kaudu. Niisiis on kolme elektroodiga otsese küttega lambil lülitustesse ühendamiseks neli pisteharu.

Võre abil saab muuta katoodilt anoodile kulgevat vabade elektronide voolu, s. t. t ü ü r i d a v o o l u a n o o d r i n g i s. Sellepärast nimetatakse trioodi võret ka *tüürvõreks*.

Trioodi katoodist emiteeruvad elektronid peavad anoodile pääsemiseks läbima võre. Kui võre pole katoodi suhtes pingestatud (on näiteks ühendatud katoodiga), siis ta anoodvoolu ei mõjuta. Võrele positiivse pinge andmisel [1] anoodvool tugevneb, sest võre-

[1] Elektronlambi elektroodide pingeid mõõdetakse tavaliselt katoodi suhtes. Kui kõneldakse lihtsalt anood- või võrepingest, siis mõistetakse sellena vastava elektroodi potentsiaali katoodi suhtes.

pinge toetab anoodpinge mõju emiteeruvatele elektronidele. Positiivse võre puhul langeb osa anoodi poole suunduvatest elektronidest ka võrele ja tekitab selles vooluringis *võrevoolu* (tähis I_G). Võrepinge muutmisel negatiivsemaks nõrgeneb anoodvool ja võib küllalt suure negatiivse võrepinge juures muutuda nulliks. Negatiivne võre takistab elektronide liikumist anoodile, neid tagasi tõrjudes katoodile, millega vähenebki anoodvool ega ole ka võimalust võrevoolu tekkimiseks.

Kuna trioodi võre asetseb katoodi lähedal, siis isegi väikesed pingekõikumised võrel kutsuvad esile suhteliselt suuri anoodvoolu kõikumisi. Selles avaldub trioodi põhiline omadus — võimendada võrele juhitavaid pingeid. Elektronide väga väikese massi tõttu tüürib võrepinge anoodvoolu praktiliselt inertsivabalt — hilinemiseta. Tänu sellele asjaolule saab elektronlampe kasutada ka väga kõrgete sagedustega (sajad megahertsid) vooluringides.

Anoodvoolu saab tüürida väga väikese energiakuluga võreringis. Energiakadu võreringis tekib siis, kui osa elektrone langeb võre traatidele ja tekitab võrevoolu. Selleks kulub energiat, mis võetakse võrepingeallikast. Kuid voolu tekkimist võreringis saab vältida, kui töötada ainult negatiivsete võrepingete piirkonnas. Niisugusel juhul muidugi võrepingeallikast mingit energiat ei võeta — võrele mõjub ainult tema pinge. Raadiolambis kulutatakse siis energiat ainult anood- ja kütteringis.

§ 5. DIOODI JA TRIOODI STAATILISED TUNNUSJOONED

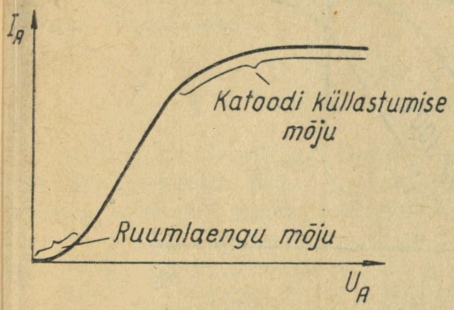
Dioodi tegevusserakendamisel antakse temale muutumatu normaalne (või mõnel juhul sellest pisut madalam) küttepinge ja muutlik anoodpinge. Viimane põhjustab anoodvoolu muutusi, kuid need ei tarvitse olla seoses pingega Ohmi seaduse kohaselt. Anoodpinge tõusmisel neutraliseerub ruumlaengu mõju katoodi ümbruses täielikumalt, mistõttu ka anoodvool kujuneb suuremate pingete puhul mõnevõrra suuremaks oodatust. Positiivne anood nagu «imeb» endasse katoodist väljunud elektrone.

Madalate anoodpingete puhul ei jõua kõik katoodist emiteeruvad elektronid kohe anoodile, vaid moodustavad ruumlaengu, mis segab elektronide vaba pääsu anoodile. Ainult katoodist suure kiirusega väljunud elektronid suudavad oma hooga läbi tungida pidurdavast ruumlaengust ning jõuda anoodile. Seepärast ongi madalate anoodpingete puhul dioodi anoodvool oodatust väiksem. Sama kehtib ka trioodi kohta, kui selle võrepinge (katoodi suhtes) on null või pisut negatiivne.

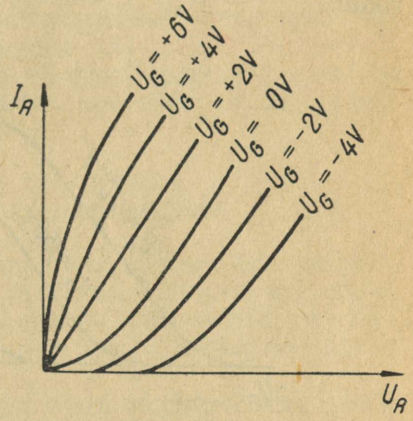
Küllalt kõrgete anoodpingete juures ei suuda katood enam emiteerida piisavat hulka elektrone — on saavutatud nn. *küllastuspiir*. Edasine anoodpinge tõstmine enam anoodvoolu ei suurenda. Küllastusvool on sisuliselt katoodi maksimaalne emissioonivool antud temperatuuril. Ainult küttepinge tõstmisega saab

suurendada küllastunud elektronlambi anoodvoolu, kuid see pole kuigi otstarbekas üleköetava katoodi eluea lühenemise tõttu.

Elektronlambi anoodvoolu sõltuvust anoodpingest kujutab graafiliselt vastav *tunnusjoon* (joonis 16. 9). Rõhtteljele on kantud anoodpinge ja püstteljele — anoodvoolu väärtused. Anoodpinge-anoodvoolu tunnusjoone (lühemalt: anoodi tunnusjoone) ehitamiseks tuleb mõõta antud elektronlambi anoodvool anoodpinge mitmesuguste väärtuste juures, kusjuures kõik ülejäänud elektrilised suurused (küttepinge ja -vool, võrepinge) jäävad muutumatuks.



Joonis 16. 9. Elektronlambi anoodpinge-anoodvoolu tunnusjoon.



Joonis 16. 10. Trioodi anoodi tunnusjoonte sari.

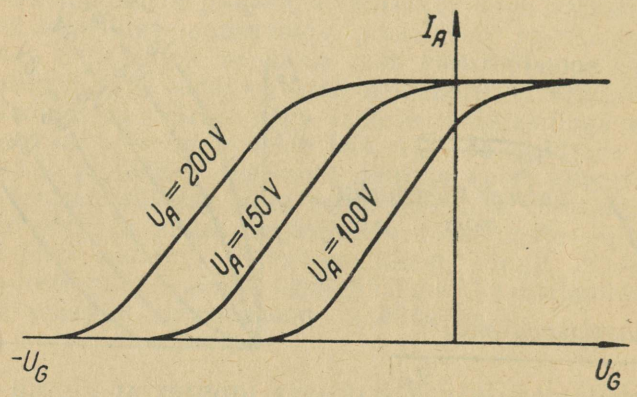
Kui anoodvool sõltuks anoodpingest Ohmi seaduse kohaselt, siis kujuneks elektronlambi tunnusjoon sirgeks (voolu sirgjooneline ehk lineaarne sõltuvus pingest). Tegelikult esineb tunnusjoone alguses ruumlaengu mõjul ülespidine kõverus ja ülaosas küllastumise tõttu järsk kaldumine rõhtsaks.

Trioodi anoodvool oleneb muutumatu küttepinge juures kahest välisest tegurist — anoodpingest ja võrepingest. Kui ehitada trioodi anoodpinge-anoodvoolu sõltuvuse graafikut, siis tuleb seda teha mitme erineva võrepinge juures. Niiviisi saadakse kolme elektroodiga elektronlambi *anoodi tunnusjoonte sari*, kus iga joon vastab ühele kindlale võrepingele ja määrab selle juures anoodvoolu sõltuvuse anoodpingest (joonis 16. 10) [1]. Nendest joon, mis vastab võrepingele $U_G = 0$ volti, on põhimõtteliselt sama kujuga kui dioodi anoodi tunnusjoon. Ta algab anoodpinge ja -voolu nullpunktist, sest anoodpinge puudumisel anoodvoolu

[1] Joonisel kujutatud tunnusjooned ei ulatu nii suurte anoodvooludeni, kus hakkaks mõju avaldama küllastusvool.

praktiliselt ei ole. Positiivsetele võrepingetele vastavad jooned asuvad kõrgemal, sest võrdse anoodpinge puhul on anoodvool positiivsema võre korral tugevam.

Negatiivsetele võrepingetele vastavad anoodi tunnusjooned on muidugi madalamal, kuid need ei alga nullpunktist, vaid punktidest, mis väljendavad teatavaid anoodpingeid. Tunnusjoon algab seda kaugemal nullpunktist, mida kõrgem on negatiivne võrepinge, sest viimane ei lase liiga madala anoodpinge juures veel tekkida anoodvoolu. Alles küllalt kõrge anoodpinge võib ületada võre negatiivse potentsiaali pidurdava mõju ja tekitada anoodvoolu.



Joonis 16. 11. Trioodi anoodvoolu-võrepinge tunnusjoonte sari.

Elektronlambi anoodi tunnusjoonte abil võib määrata tema talitlustingimusi — näiteks mingile anoodpingele vastavat anoodvoolu teatava võrepinge juures jne.

Trioodi iseloomustavad veel staatilised anoodvoolu-võrepinge tunnusjooned, mis näitavad anoodvoolu sõltuvust võrepingest mingi kindla anoodpinge juures, kui anoodringis puudub koormustakistus. Nendegi tunnusjoonte ehitamisel saadakse terve sari, kus iga joon vastab ühele kindlale anoodpingele.

Elektronlambi omaduste täielikuks tundmiseks piisab vaid ühest tunnusjoonte sarjast; teist on selle alusel alati võimalik koostada (mõlemad tunnusjoonte sarjad seovad samu suurusi — anoodpinget, -voolu ja võrepinget).

Anoodvoolu-võrepinge staatilised tunnusjooned ehitatakse graafikuna, mille püsttelg väljendab anoodvoolu ja rõhttelg — võrepinget. Hariliku trioodi anoodvoolu-võrepinge tunnusjoonte (lühemalt: võre tunnusjoonte) sarja kujutab joonis 16. 11. Kuna kasutusel on ka negatiivne võrepingete piirkond, siis tuleb graafiku teljestikku laiendada nullist vasakule. Kõrgematele anood-

pingetele vastavad tunnusjooned paiknevad muidugi rohkem vasakul ja algavad teatavale negatiivsele võrepingele vastavast punktist, sest anoodvool tekib seda negatiivsema võrepinge juures, mida kõrgem on anoodpinge.

Sõltuvalt trioodi elektroodide ehitusest (näiteks võre tihedusest) võivad võrepinge-anoodvoolu tunnusjooned asetuda kas vasakule, s. o. peamiselt negatiivsete võrepingete alasse, või paremale, s. o. peamiselt positiivsete võrepingete alasse. Selle poolest eristatakse vasakpoolsete või parempoolsete tunnusjoontega elektronlampe. Tiheda võrega lambi anoodvool lakkab üsna väikese negatiivse võrepinge juures ning vastupidi — harva võre puhul on selleks tarvis tunduvalt suuremat negatiivset võrepinget. Niiviisi määrabki võre ehitus tunnusjoonte paiknemise. Parempoolsete tunnusjoontega lampides tekib võrevool kergemini, mistõttu neid kasutatakse niisugustes lülitustes, kus võrevool ebasoodsat toimet ei avalda.

§ 6. TRIOODI STAATILISED PARAMEETRID

Mitme elektroodiga elektronlampe iseloomustab rida suurusi, nn. *parameetrid:* tõus, sisetakistus ja võimendustegur, mis esmajoones sõltuvad lambi ehitusest. *Staatilised parameetrid* vastavad juhule, kui elektronlambi anoodringis pole koormustakistust.

Tõus (S) näitab, mitme milliampri võrra muutub elektronlambi anoodvool, kui püsiva anoodpinge puhul muuta tüürvõre pinget ühe voldi võrra. Kui trioodi staatiline tõus $S = 1{,}5$ mA/V, siis võrepinge muutumisel kahe voldi võrra negatiivsemaks väheneb anoodvool $2 \cdot 1{,}5 = 3$ milliampri võrra (kui anoodpinge sealjuures ei muutu!).

Trioodi tõus oleneb lambi ehitusest. Tõus on seda suurem, mida tihedam on võre ja mida lähemal on ta katoodile. Tõus on üldiselt suurusjärgus 0,5 kuni 20 mA/V.

Sisetakistus (R_i) on anoodpinge muutuse ja selle poolt põhjustatud anoodvoolu muutuse suhe püsiva võrepinge juures. Elektronlambi sisetakistus näitab, mitme voldi võrra tuleb muuta anoodpinget, et kutsuda esile anoodvoolu muutumist ühe milliampri võrra. Mida väiksem on anoodpinge mõju anoodvoolule, seda suurem on lambi sisetakistus.

Elektronlambi sisetakistus antakse enamasti kilo-oomides. Trioodide sisetakistused on suurusjärgus 1 kuni 100 kilo-oomi.

Võimendustegur (μ) iseloomustab anoodpinge ja võrepinge muutuste suhtelist mõju anoodvoolule. Ta näitab, mitu korda tugevamini mõjutab võrepinge muutumine anoodvoolu kui niisama suur anoodpinge muutumine. Kui näiteks anoodvoolu muutmiseks ühe milliampri võrra tuleks püsiva võrepinge juures anoodpinget muuta 50 voldi võrra ja sama anoodvoolu muutuse

põhjustaks püsiva anoodpinge juures ka võrepinge muutmine näiteks 2 voldi võrra, siis võrepinge mõjub ilmselt anoodvoolule $50 : 2 = 25$ korda tugevamini võrepingest ja lambi võimendustegur $\mu = 25$.

Võimendusteguri suurus sõltub lambi võre ehitusest. Vastuvõtutehnikas kasutatavate trioodide võimendustegurid on suurusjärgus 4 kuni 100.

Siinkohal tuleb eriti rõhutada, et elektronlampide parameetrid on kehtivad voolude ja pingete väikeste muutuste kohta, mitte aga voolude ja pingete kohta üldse. Väär oleks samastada näiteks lambi sisetakistust R_i tema takistusega alalisvoolu mõttes, s. o. mingi anoodpinge ja selle poolt esilekutsutava anoodvoolu jagatisega. Sisetakistus R_i näitab, kui palju tuleb m u u t a anoodpinget teatava anoodvoolu muutuse esilekutsumiseks, kuid ta ei määra, kui s u u r on anoodvool mingi anoodpinge juures.

§ 7. TRIOODI PARAMEETRITE MÄÄRAMINE

Trioodi tõusu, sisetakistust ja võimendustegurit saab määrata tema kummastki tunnusjoonte sarjast. Joonisel 16. 12 on toodud kaks võrepinge-anoodvoolu tunnusjoont ühe trioodi vastavate tunnusjoonte sarjast. Nendest alumine vastab anoodpingele $U_A' = 100$ volti ja ülemine anoodpinge $U_A'' = 150$ volti. Tunnusjoonte sirgjoonelises osas nende vahele ehitatud kolmnurk, mille täisnurkne tipp A asub madalamale anoodpingele vastaval tunnusjoonel ning kaatetid on rööpsed graafiku vastavate telgedega, võimaldab määrata trioodi parameetreid. Selle kolmnurga, nn. *tunnuskolmnurga* rõhtne kaatet AB iseloomustab võrepinge muutust ja püstkaatet AC — anoodvoolu muutust. Jooniselt näeme, et võrepinge muutumisel —3 voldist nullini, s. t. kolme voldi võrra, kasvab anoodvool 10 milliamprilt 16 milliamprile, s. t. 6 milliampri võrra. Kuna tõus iseloomustabki anoodvoolu muutumise sõltuvust võrepinge muutumisest kindla anoodpinge juures, siis käesoleval juhul $S = 6 : 3 = 2$ mA/V, ehk üldise valemina:

$$S = \frac{\Delta I_A}{\Delta U_G} \text{ (kui } U_A = \text{const)}^1.$$

Samast tunnuskolmnurgast saab leida ka trioodi sisetakistuse, mis teatavasti on anoodvoolu muutumise suhe seda põhjustavasse anoodpinge juurdekasvu püsiva võrepinge juures. Antud juhul 50-voldine anoodpinge juurdekasv alumise tunnusjoone punktist A ülemise tunnusjoone punkti C (mööda püsivale võrepingele vas-

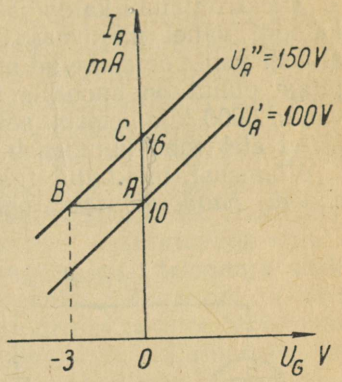
[1] Kreeka tähega Δ (suur delta) märgitakse mingi suuruse muutumist, nii tuleb ΔI_A all mõista anoodvoolu juurdekasvu ja ΔU_G all — võrepinge juurdekasvu. Tähisega «const» (lühendus ladinakeelsest sõnast constant) märgitakse vastava suuruse püsivust kui tingimust, mille puhul esitatav valem kehtib.

tavat püstjoont) kutsub esile anoodvoolu 6-milliamprise juurdekasvu. Vastav sisetakistus $R_i = 50 : 6 = 8{,}33$ kilo-oomi. Üldiselt avaldub elektronlambi sisetakistus valemist:

$$R_i = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A} \text{ (kui } U_G = \text{const)}.$$

Samalt tunnuskolmnurgalt elektronlambi võimendusteguri leidmise selgitamiseks kasutame järgmist mõttekäiku. Oletame, et muudame anoodpinget püsiva võrepinge juures 100 voldilt (punkt A) 150 voldile (punkt C), millega kaasub vastav anoodvoolu juurdekasv. Selleks et viia anoodvool taas endiseks, tuleb muuta võrepinget teataval määral negatiivsemaks (punktist C punkti B). Anoodpinge muutuse suhe võrepinge muutusse võrdub niisugusel juhul lambi võimendusteguriga: $\mu = 50 : 3 = 16{,}67$. Üldine valem trioodi võimendusteguri määramiseks on

$$\mu = \frac{\Delta U_A}{\Delta U_G} \text{ (kui } I_A = \text{const)}.$$



Joonis 16. 12. Trioodi parameetrite määramine tunnuskolmnurgast.

Muidugi ei tarvitse elektronlambi parameetreid tingimata määrata just nendel võrepingetel, nagu eelnenud näites toodud.

Trioodi kolme parameetrit seob lihtne sõltuvus:

$$\mu = R_i S,$$

kui sisetakistus on antud kilo-oomides ja tõus milliamprites voldi kohta.

Näide. Määrata trioodi sisetakistus, kui tema tõus $S = 4$ mA/V ja võimendustegur $\mu = 80$.

Vastavast valemist $R_i = \mu : S = 80 : 4 = 20$ kilo-oomi.

Vajab märkimist, et tabelites antud elektronlampide parameetrid kehtivad ainult selle elektronlambi tunnusjoonte sirgjoonelise osa piirides. Seejuures on tabelites märgitud ka vastavad anoodpinge, võrepinge ja anoodvoolu väärtused, mis antud piirkonda iseloomustavad.

Loomulikult võib kõnelda ka tõusust või mõnest muust parameetrist tunnusjoone mittesirgjoonelises osas. Seal on aga parameetrite väärtused tunnusjoone iga punkti kohta erinevad.

Staatiline tõus ja võimendustegur pole kasutatavad juhul, kui elektronlambi anoodringis on koormustakistus. Sellel juhul kasutatakse *dünaamilisi parameetreid*, mis on arvuliselt staatilistest parameetritest seda rohkem erinevad, mida suurem on anoodi koor-

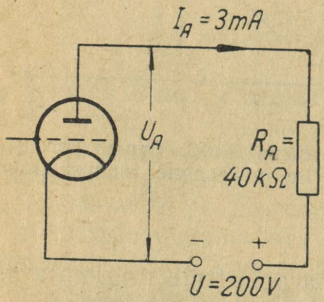
mustakistus. Dünaamilised parameetrid määratakse analoogiliselt staatilistega lambi dünaamiliselt tunnusjoonelt (vt. 18. peatüki 2. paragrahv).

§ 8. ELEKTRONLAMBI ANOODI KAOVÕIMSUS

Elektronlambi katoodist väljuvad elektronid satuvad anoodi ja katoodi vahel mõjuvasse tugevasse elektrivälja ning liikumisel anoodi poole omandavad suure kiiruse. Näiteks 100-voldise anoodpinge puhul on anoodile jõudmise hetkeks elektroni kiirus kasvanud 6000 kilomeetrini sekundis! Niisuguse «pommitamise» tagajärjel elektrood kuumeneb.

Võimsust, mis kulutatakse anoodi kuumutamiseks, nimetatakse *anoodi kaovõimsuseks* ehk *anoodkaoks* ning tähistatakse P_A. Anoodkadu võrdub anoodvoolu ja katoodi ning anoodi vahel mõjuva pinge korrutisega:

$$P_A = I_A U_A.$$



Joonis 16. 13. Näite juurde anoodkao määramisest.

Näide. Määrata anoodi kaovõimsus joonisel 16. 13 toodud andmetega skeemis.

Kuna selles on järjestikku elektronlambiga veel anoodi koormustakisti R_A, siis anoodpinge U_A ei võrdu anoodvooluallika pingega U. Ohmi seaduse kohaselt langeb elektronlambi katoodi ja anoodi vahele pinge

$$U_A = U - I_A R_A,$$

seega antud juhul $U_A = 200 - 3 \cdot 40 = 80$ volti [1] ja anoodkadu

$$P_A = U_A I_A = 80 \cdot 3 = 240 \text{ millivatti.}$$

Elektronlambi anoodkadu ei tohi ületada lampide parameetrite tabelites antud suurust $P_{A\,max}$ — maksimaalset lubatavat anoodkadu, et vältida anoodi liigset kuumenemist ja elektronlambi riknemist. Maksimaalne lubatav anoodkadu sõltub anoodi suurusest, ehitusest ja materjalist ning on suurusjärgus vati murdosadest kuni kümnete vattideni vastuvõtulampides ja isegi kümnete kilovattideni võimsates saatelampides. Viimasel juhul kasutatakse elektronlampide jahutamiseks õhk- või vesijahutussüsteemi. Keskmise võimsusega võimenduslampides on anood valmistatud raskestisulavast metallist ja varustatud suurepinnaliste jahutusribidega, mis kiirguse teel eemaldavad anoodilt liigse soojuse.

[1] Milliamprites mõõdetud anoodvoolu paigutamisel valemisse tuleb koormustakistus anda tingimata kilo-oomides, et nende korrutis annaks sellel takistusel tekkiva pingelangu voltides.

§ 9. MITME VÕREGA ELEKTRONLAMBID

Trioodidel on kaks põhilist puudust — mitteküllaldane võimendustegur ja suur mahtuvus anoodi ning tüürvõre vahel. Võimendustegurit saaks suurendada tihedama võre kasutamise teel, kuid niisugusel lambil on parempoolsed tunnusjooned, mis pole alati vastuvõetavad hõlpsasti tekkiva võrevoolu tõttu. Samuti tuleks sellise lambi ehitamisel ületada suured konstruktiivsed raskused.

Anood ja tüürvõre moodustavad omavahel nagu kondensaatori, mille mahtuvus (tähis: C_{AG}) võib trioodil ulatuda kümne pikofaradini. Kuna trioodi võreringis mõjub võimendatav vahelduvpinge ja anoodringis — võimendatud vahelduvpinge, siis eriti kõrgsageduse puhul ilmneb kahjulik tagasimõju läbi mahtuvuse C_{AG}, mis halvab lambi kui võimendusseadme normaalset tööd. Seepärast ei sobi triood üldiselt kõrgsagedusvõnkumiste võimendamiseks, kui mitte arvestada ultralühilainetel kasutatavaid erilülitusi. Madalate sagedustega vahelduvpingeid saab trioodiga siiski võimendada, sest näiteks helisageduste puhul on anoodi ja võre vaheline mahtuvustakistus võrreldes anoodringi ja võreringi takistusega suur ega avalda märgatavat mõju lambi talitlusrežiimile.

Kõrgsagedusvoolude ja -pingete võimendamiseks kasutatakse mitmevõrelisi elektronlampe, milledes on anoodi ja tüürvõre vahelise mahtuvuse mõju kunstlikult kõrvaldatud. Niisugused on nelja elektroodiga elektronlamp ehk *tetrood* ja viie elektroodiga elektronlamp ehk *pentood*. Eriotstarbeks kasutatakse ka kuue, seitsme või isegi kaheksa elektroodiga lampe, kus on rohkem kui üks tüüriv elektrood; nimetused vastavalt: *heksood*, *heptood* (*pentagrid*) ja *oktood*. Kõik need koosnevad katoodist, anoodist ja vastavast arvust nende vahele asetatud võredest. Tetroodil on niisiis kaks ja pentoodil kolm võret, ülejäänud lambitüüpidel aga vastavalt rohkem.

§ 10. TETROOD

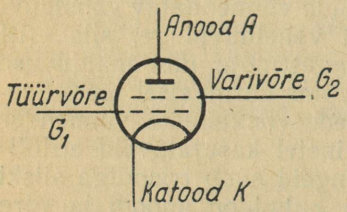
Tetrood on elektronlamp, mille tüürvõre ja anoodi vahele on asetatud veel teine võre — *varivõre*. Tetroodi kujutatakse joonisel 16. 14 toodud skeemitähisega. Võrreldes trioodiga on tetroodiga lülitustes veel üks vooluring — varivõrering. Tüürvõre ja varivõre vooluringides esinevaid suurusi tähistatakse vastavate indeksitega. Nii on tüürvõrepinge tähis U_{G_1} ja varivõrepinge tähis U_{G_2}.

Tetroodi varivõrele antakse peaaegu alati püsiv positiivne pinge, mis moodustab umbes ühe kolmandiku anoodil mõjuvast pingest (joonis 16. 15). Varivõret võib pingestada üldisest anoodvooluallikast ka läbi sobiva eeltakisti või potentsiomeeterlülituse.

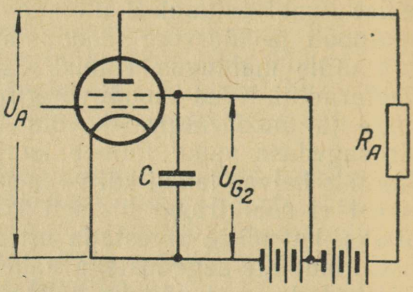
Tetroodide võimendustegurid on tunduvalt suuremad ja sisemahtuvused C_{AG_1} palju kordi väiksemad kui trioodidel. Tetroodide

staatilised võimendustegurid küünivad tuhandeni ja anoodi-tüürvõre vahelised mahtuvused pikofaradi murdosadeni.

Anoodi ja tüürvõre vaheline sisemahtuvus on tetroodis jagunenud kaheks järjestikuseks mahtuvuseks — anoodi ja varivõre vaheliseks osamahtuvuseks C_{AG_2} ning varivõre ja tüürvõre vaheliseks osamahtuvuseks $C_{G_2G_1}$. Need mõlemad on suhteliselt



Joonis 16. 14. Tetroodi skeemitähis. Kaudselt kõetava elektronlambi puhul sageli ei joonestata välja kütteniiti ega selle vooluringi.



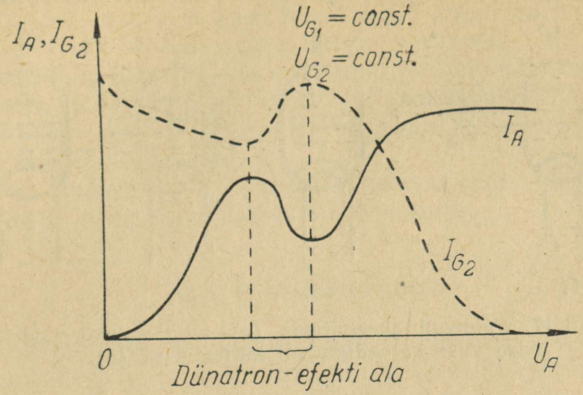
Joonis 16. 15. Varivõre pingestamine.

suured, kuid varivõre ja katoodi vahele ühendatud suuremahtuvuselise kondensaatori C tõttu, mis leidub peaaegu igas skeemis, omandab varivõre vahelduvpinge mõttes katoodi potentsiaali. Seega jaguneb kahjulik anoodi ja tüürvõre vaheline mahtuvus anoodi ja katoodi (varivõre) vaheliseks ning katoodi (varivõre) ja tüürvõre vaheliseks kahjutuks mahtuvuseks. Varivõre mõjub sellises elektronlambis nagu varjestusena anoodi ja tüürvõre vahel. Tetroodis on seega välditud trioodi iseloomulikud puudused, kuid selles esineb omapärase ebasoovitava nähtuse — tugeva *sekundaaremissiooni* (dünatron-efekti) ilmumise oht.

Elektrone, mis on läbinud tüürvõre ning sattunud tüürvõre ja varivõre vahelisse alasse, sunnib edasi liikuma nende hoog ja varivõre ning anoodi positiivne pinge. Osa väiksema kiirusega elektrone langeb kohe varivõrele ja moodustab varivõrevoolu I_{G_2}, teine osa, mis on omandanud suurema kiiruse ja suundub läbi varivõre anoodile, tekitab seal sekundaaremissiooni — «lööb» anoodi pinnalt välja uusi elektrone. Arvukad sekundaarelektronid omavad teatavat algkiirust, eemalduvad anoodist ja varivõre mõjupiirkonda sattudes langevad sellele, suurendades varivõrevoolu. Anoodvool väheneb muidugi siis sama suuruse võrra.

Sekundaaremissiooni nähtus muutub segavaks, kui tetroodi varivõrepinge on liiga suur — ligikaudu võrdne või suurem anoodpingest. Väikeste varivõrepingete puhul liiguvad sekundaarelektronid anoodile tagasi ega suurenda varivõrevoolu — segavat dünatron-efekti siis ei teki.

Dünatron-efekti tõttu on tetroodi anoodi tunnusjooned[1] moonutatud. Joonisel 16. 16 on kujutatud täisjoonega tetroodide tüüpiline anoodtunnusjoon ja punktiirjoonega varivõrevoolu sõltuvus anoodpingest püsiva varivõrepinge juures.



Joonis 16. 16. Dünatron-efekti väljendumine tetroodi anoodi tunnusjoonte kujus.

Anoodpinge puudumisel langeb kogu tüürvõret läbinud elektronide hulk ainsale positiivsele elektroodile — varivõrele. Seega on varivõrevool siis maksimaalne. Anoodpinge kasvamisel hakkab üha rohkem elektrone langema ka anoodile; anoodvool suureneb ja varivõrevool väheneb. Edasi ilmub anoodilt lähtuv sekundaaremissiooni vool, mis vähendab anoodvoolu (anoodi tunnusjoonele ilmub nõgu) ja suurendab varivõrevoolu (varivõre tunnusjoonele ilmub kõrgendik). Anoodpinge edasisel tõstmisel ületab ta varivõrepinge ning sekundaaremissiooni vool anoodilt varivõrele väheneb ja lõpuks kaob.

Dünatron-efekt on üldiselt kahjulik nähtus, mis sageli takistab nelja elektroodiga elektronlambi kasutamist võimendajana. Leidub ka erilülitusi, mis just kasutavad tetroodi dünatron-efekti.

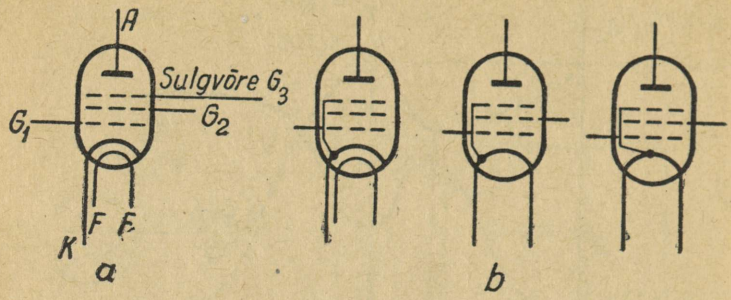
§ 11. PENTOOD

Dünatron-efekti saab vältida kolmanda võre lisamisega tetroodile. Niisugust kolme võrega elektronlampi nimetatakse *pentoodiks*.

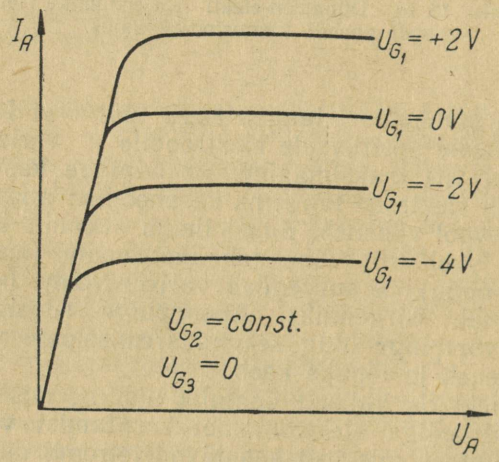
---

[1] Tetroodi anoodi tunnusjoonteks nimetatakse graafikut, mis väljendab anoodvoolu sõltuvust anoodpingest ning on ehitatud püsivate tüürvõre- ja varivõrepingete juures.

Pentoodi kolmas võre, mis asub varivõre ja anoodi vahel, on *sulgvõre* ehk *summutusvõre* ning ta ühendatakse peaaegu alati katoodiga või anoodpingeallika miinuspoolusega. Sulgvõret tähistatakse G_3. Anoodi suhtes on sulgvõrel kõrge negatiivne potentsiaal, mis sulgeb anoodist väljuvate sekundaarelektronide pääsu



Joonis 16. 17. Pentoodi skeemitähis (*a*) ning sulgvõre ühendamise viise katoodiga või kütteniidiga (*b*).



Joonis 16. 18. Pentoodi anoodi tunnusjoonte sari.

varivõrele ja väldib niiviisi nende elektroodide vahelise sekundaaremissioonivoolu tekkimise võimaluse (anoodvoolu kahanemise varivõrele suunduvate sekundaarelektronide arvel).

Paljudes pentoodides on sulgvõre juba kolvi sees ühendatud katoodiga, otsese kütte puhul aga kütteniidi ühe otsa või keskpunktiga (joonis 16. 17).

Pentoodide võimendustegurid on üldiselt veelgi suuremad kui tetroodidel ja sisetakistused väga suured (suurusjärgus 0,1 kuni 3 megaoomi).

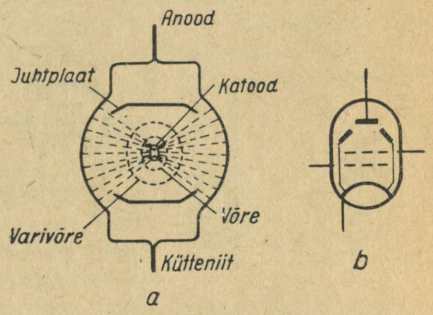
Joonisel 16. 18 on toodud pentoodi anoodi tunnusjooned, mis vastavad püsivale varivõrepingele. Tunnusjoone esimene osa, mis vastab madalatele anoodpingetele, on väga järsu kallakuga, sest selles piirkonnas toimub anoodpinge kasvu saatev varivõrevoolu nõrgenemine ja anoodvoolu vastav tugevnemine. Kõrgematel anoodpingetel suureneb anoodvool mitte enam varivõrevoolu nõrgenemise arvel, vaid suurema hulga elektronide «läbitõmbamise» teel läbi kolme võre. Kuna aga need võred vähendavad tunduvalt anoodi mõju katoodi ümbruses asuvale ruumlaengule, siis ka anoodpinge edasine suurenemine nimetamisväärset anoodvoolu juurdekasvu ei põhjusta.

Anoodi tunnusjoonte ülemises, rõhtsas osas on pentoodi võimendustegur ning sisetakistus väga suured.

§ 12. JUGATETROOD

Pentoodide kõrval kasutatakse helisagedusvõimenduslampidena *jugatetroode*. Nendes on dünatron-efekt välditud elektroodide erilise ehitusega ja paigutusega.

Võrreldes tavaliste tetroodidega on jugatetroodi anood asetatud palju kaugemale teistest elektroodidest (joonis 16. 19) ning mõlemad võred omavad ühepalju keerde, mis on asetatud üksteise «varju». Seepärast lendavad elektronid katoodilt anoodile võresid läbivate jugadena. Elektronide langemist võresid kandvatele tugedele väldivad anoodi ja varivõre vahele asetatud kaks katoodipotentsiaali kandvat metallplaadikest. See vähendab kasutut varivõrevoolu.



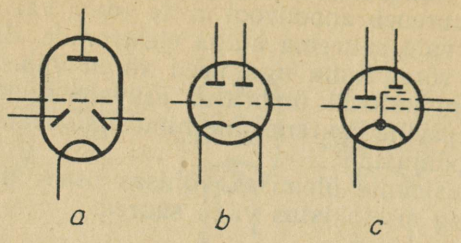
Joonis 16. 19. Jugatetroodi ehitus (*a*) ning skeemitähis (*b*).

Jugatetroodide tõus on suurem kui võimsatel madalsageduspentoodidel ja nende tunnusjooned on kujult väga sarnased harilike pentoodide tunnusjoontega.

Tihedate elektronijugade tõttu, mis lendavad anoodile, on sekundaarelektronide pääs varivõrele raskendatud — jugade negatiivne laeng mõjub jugatetroodis sekundaarsetele elektronidele tagasitõukavalt nagu sulgvõre negatiivne potentsiaal pentoodis.

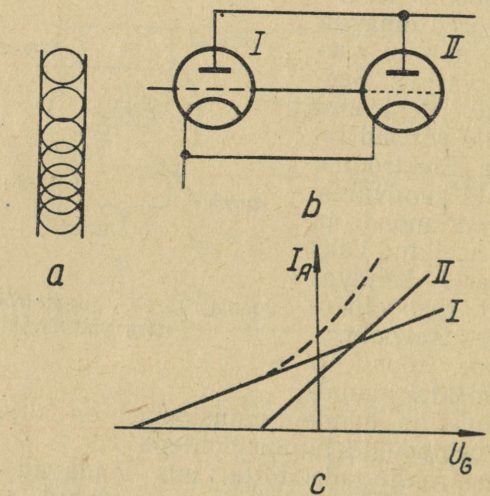
Jugatetroodi märgitakse skeemides enamasti tavalise tetroodina; tema tegelik tähis on toodud joonisel 16. 19.

Dioodide, trioodide, tetroodide ja pentoodide kõrval kasutatakse helivõimendus- ja raadioseadmetes paljuvõrelisi ning liitlampe. Paljuvõreliste elektronlampide omapära seisab mitme tüürvõre



Joonis 16. 20. Kaksikdiood-trioodi (*a*), kaksiktrioodi (*b*) ning triood-pentoodi (*c*) skeemitähised.

olemasolus; *liitlambid* on aga ühisesse kolbi ehitatud kombinatsioonid üksikutest elektronlampidest. Sageli ehitatakse pentoodid või trioodid kokku ühe või kahe dioodiga ja valmistatakse kaksiktrioode ning triood-pentoode (joonis 16. 20).



Joonis 16. 21. Muudetava tõusuga elektronlambi tüürvõre ehitus (*a*), tema tinglik kujutamine kahe rööbiti ühendatud elektronlambi kaudu (*b*), mis omavad erinevaid tunnusjooni (*c*).

Pikendatud tunnusjoonega tetroodi või pentoodi parameetreid saab muuta negatiivse võrepinge abil. Sellest siis ka nende nimetus — muudetava tõusuga ehk reguleeritavad lambid.

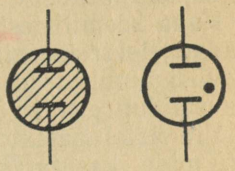
Muudetava tõusuga elektronlambi tüürvõre on ebaühtlase ehitusega: osa temast on valmistatud suurte vahedega, osa on aga väga tihe (joonis 16. 21-*a*). Sellise tüürvõrega elektronlampi võib vaadelda kui kahte paralleelselt lülitatud elektronlampi (joonis 16. 21-*b*), millest üks omaks harva võre (väike tõus, lame võrepinge-anoodvoolu tunnusjoon) ja teine omaks tiheda võre (suur tõus, järsk ning lühike võrepinge-anoodvoolu tunnusjoon). Üht osa kogu anoodvoolust tüüritakse esimese ja teist osa — teise ehitusega võre kaudu. Joonis 16. 21-*c* kujutab, kuidas võre kummagi osa koosmõjul tekib vasakus osas pikenenud tunnusjoon. Kuna niisugune joon sarnaneb matemaatikast tuntud nn. eksponentjoonega, siis nimetatakse pikendatud tunnusjoontega lampe ka *eksponentlampideks.*

Suurte negatiivsete tüürvõrepingete juures on niisuguse lambi tõus väike ja vastupidi. Võrele mõjuva negatiivse alalispinge — *võre-eelpinge* valikuga saab vastavalt tarvidusele muuta pikendatud tunnusjoonega elektronlambi võimendusomadusi.

§ 14. GAASLAHENDUSSEADISED

Elektronlampide kõrval kasutatakse raadiotehnikas ka gaaslahendusseadiseid. Lihtsaim gaaslahenduslamp on *huumlamp*, mis koosneb madalal rõhul neooni, argooni või elavhõbeda auruga täidetud gaasballoonist ühes kahe või enama külma elektroodiga (skeemitähis joonisel 16. 22).

Teatava küllalt kõrge pinge — *süttimispinge* puhul tekib järsult emissioon ja gaaslahenduslambi katoodilt anoodile liikuvad elektronid põrkuvad kokku täitegaasi aatomitega. Küllaldase kiiruse puhul löövad elektronid gaasi aatomitest välja sekundaarelektrone, mis alustavad samuti liikumist positiivsele elektroodile.



Joonis 16. 22. Gaaslahenduslambi (huumlambi) skeemitähised.

Elektrone kaotanud gaasiaatom muutub positiivselt laetud iooniks ja liigub katoodile, kus saab juurde puuduvad elektronid, muutudes taas elektriliselt neutraalseks. Ioonide liikumine suurendab gaaslahenduslambi elektrijuhtivust, seega vähendab sisetakistust. Gaasi ioniseerumist ja voolu läbimist gaaslahenduslambist saadab valguse tekkimine, mille värvus oleneb kasutatavast täitegaasist. Elavhõbeda aur annab lillakassinise, neoon — punase ja argoon — sinise valguse. Huumlambi elektrijuhtivus katkeb järsult pinge langemisel alla teatava piiri — *kustumispinge.* Kustumispinge on mõnevõrra madalam süttimispingest.

Huumlampe kasutatakse raadiotehnikas signaallampidena ja pingestabilisaatoritena.

Elavhõbeda auruga täidetud ja hõõgkatoodi omavaid ioonsea-

diseid — *gasotrone* ja *tiratrone* — kasutatakse tugevate vahelduvvoolude alaldamiseks, s. o. muutmiseks pulseerivaks alalisvooluks. Nende ioonseadmete eeliseks on väga väike sisetakistus, seega ka väike pingelang sellel ja väike kaovõimsus.

Hõõgkatoodi omavad võrega varustatud gaaslahenduslambid on leidnud ulatuslikku kasutamist automaatse reguleerimise seadistes ja mitmesugustes generaatorlülitustes.

17. PEATÜKK

RAADIOSEADMETE TOITMINE

§ 1. TOITEPINGED; PATAREITOIDE

Raadioseadmete töölerakendamiseks vajatakse elektrienergiat, mis toidaks elektronlampide kütte-, anood- ja teisi vooluringe. Sealjuures kasutatavad pinged ja voolud on väga erinevad. Üldiselt vajatakse kaht vooluallikat: madalapingelist — elektronlampide kütteniitide kuumutamiseks ning kõrgemapingelist — anoodide, varivõrede ja muude positiivset potentsiaali vajavate elektroodide toiteks.

Lihtsaim viis raadioseadme toitmiseks on keemiliste vooluallikate kasutamine. Küttevool võetakse kas akust või suure mahutavusega kuivelemendist ning anoodvool — nn. anoodpatareist, mis koosneb paljudest väiksema mahutavusega kuivelementidest järjestikku-lülituses.

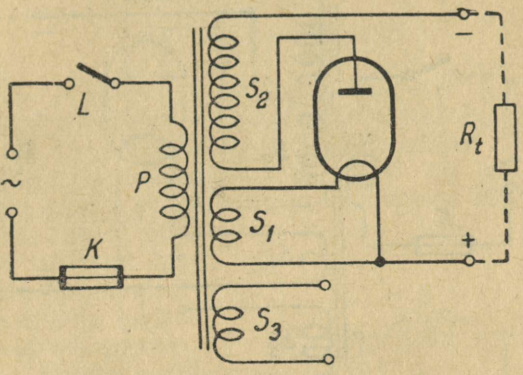
Kuna keemilistest vooluallikatest ja eriti just kuivelementidest saadav elektrienergia osutub kalliks, siis kasutatakse seda toitmisviisi ainult transporditavates raadioseadmetes ning kohtades, kus puudub elektrivõrk.

Viimastel aastatel on hakanud levima *termoelektrigeneraatorid*, mida kasutatakse raadiovastuvõtjate toitevoolu saamiseks otseselt petrooleumilambi soojusenergiast. Selline generaator sisaldab arvukaid kahest erinevast metallist või pooljuhtide kombinatsioonist koosnevaid termoelemente, mida kuumutab petrooleumilambi leek. Vajalik arv järjestikuseid termoelemente annab küttevoolu umbes 0,5 amprit pingel 2 või 1,4 volti ja teine termoelementide patarei — anoodvoolu kuni 10 milliamprit pingel kuni 120 volti, millest piisab keskmise patareivastuvõtja toiteks.

Termoelektrigeneraatori kasutamisel saadakse raadiovastuvõtja toitevool nii-öelda petrooleumvalgustuse «kõrvalproduktina», ilma lisakuludeta. Ka on sellise generaatori eluiga ja töökindlus küllalt head.

§ 2. TOIDE VAHELDUVVOOLUVÕRGUST

Kõige odavam on raadioseadmete toitmine vahelduvvooluvõrgust. Selleks kasutatavaid kaudse küttega lampe saab kütta vahelduvvooluga, mida saadakse väikesest trafost, nn. võrgutrafost. Samast trafost või otseselt võrgust võetakse üheaegselt ka kõrgemat vahelduvpinget, mis alaldatakse pulseerivaks vooluks ning juhitakse läbi vastava filtri juba puhta alalispingena elektronlampide anoodidele ja varivõredele.



Joonis 17. 1. Raadioseadme toitmine vahelduvvooluvõrgust: anoodpinge alaldamine dioodiga (poolperioodalaldaja).

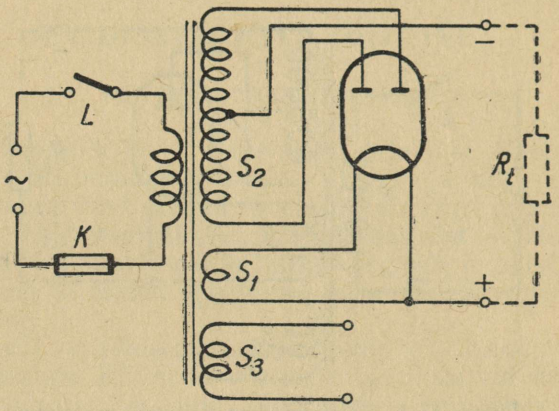
Anoodpinge alaldamiseks kasutatakse iseseisvat elektronlampi — suure emiteerimisvõimega dioodi (kenotroni) või pooljuhtseadiseid (seleen-, vaskoksüüd- või germaaniumalaldajaid).

Esmalt vaatleme võrgutrafo kõrgemapingelisest sekundaarmähisest S_2 saadava vahelduvpinge alaldamist dioodi abil (joonis 17. 1). Trafo primaarmähis P on ühendatud vahelduvvooluvõrku sulavkaitsme K ja lüliti L kaudu. Madalapingeline sekundaarmähis S_1 toidab alaldajalambi kütteniiti, sekundaarmähis S_2 on aga ühendatud anoodringi, kuhu kuulub ka alalisvoolu tarbija (kujutatud takistina R_t). Iseseisvat küttemähist S_3 kasutatakse raadioseadme teiste elektronlampide ja signaallampide kütmiseks.

Dioodi anoodil mõjub katoodi suhtes vahelduv pinge — voolusageduse rütmis on anood vaheldumisi kord positiivne, kord negatiivne. Vool dioodis saab tekkida ainult positiivse anoodpinge korral; seega töötab lamp taolises lülituses elektrilise ventiilina. Anoodringis ilmub tõukeline ühesuunaline elektronide liikumine — pulseeriv alalisvool. Positiivseks osutub tarbija see klemm, mis on ühendatud alaldajalambi katoodiga.

Kirjeldatud lülitust nimetatakse *poolperioodalaldajaks*, sest siin kasutatakse voolu tekitamiseks tarbijas ainult vahelduvpinge ühesuunalisi poolperioode.

Täiuslikum alaldajalülitus kaksikdioodiga (või kahe ühekordse dioodiga) võimaldab kasutada vahelduvvoolu mõlemasuunalisi poolperioode (joonis 17. 2). Taolise *täisperioodalaldaja* võrgutrafo kõrgemapingeline sekundaarmähis, mis toidab anoode, omab väljavõtet keskelt ning peab andma kaks korda kõrgema kogupinge kui poolperioodalaldajal. Niisuguses lülituses töötab vaheldumisi kumbki diood või kaksikdioodi kumbki anood. Hetkel, mil üks anood omab (mähise keskväljavõtte suhtes) positiivse



Joonis 17. 2. Täisperioodalaldaja lülitus.

potentsiaali, on teine anood negatiivne. Vool tekib muidugi selles dioodis, mille anood parajasti on positiivne. Järgmisel poolperioodil on pinged vastupidised ja vool jätkub teise anoodi kaudu. Kummalgi poolperioodil tekkivad voolud läbivad katoodi vooluringi ja sellesse ühendatud tarbijat ühes suunas. Tarbija positiivne poolus on ühendatud katoodiga ja negatiivne — sekundaarmähise keskväljavõttega.

Kuigi täisperioodalaldajast saadava voolu pulseerimine on väiksem kui poolperioodalaldamisel, pole seegi veel otseselt kasutatav raadioseadme vooluringide toiteks, vaid tuleb enne vastavas filtris vabastada vahelduvkomponendist.

Raadio vastuvõtuseadmetes kasutatakse alaldajalampidena õhutühje dioode või kaksikdioode, millede anoodid on suurema lubatava kaovõimsuse saamiseks valmistatud hea jahutamise mõttes suurepinnalistena. Kuna tarbijale antavat maksimaalset alaldatud voolu piirab lambi emiteerimisvõime, siis on alaldajalampide katoodid emiteeriva pinna suurendamiseks sageli valmistatud kaudselt kõetavatena. Mõnikord polegi oluline, et kaudselt kõetava alaldajalambi katood peaks olema elektriliselt isoleeritud kütteniidist. Siis ühendatakse juba lambi sees katood kütteniidi ühe otsaga. Alaldajalampi toitev küttemähis on sellise lambi puhul

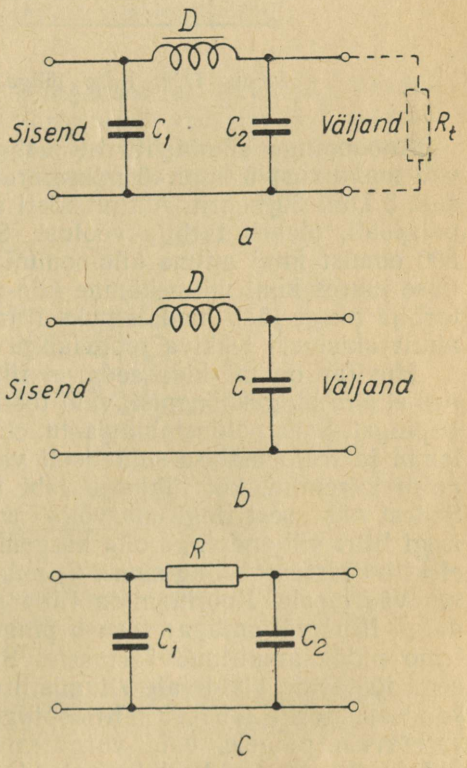
kõrge alalispinge all ja peab olema hästi isoleeritud trafo teistest mähistest. Samasugune olukord esineb ka otsese küttega alaldajalambi kasutamisel.

Õhutühje dioode kasutatakse peamiselt väiksemate voolude alaldamiseks (mõnesaja milliamprini lambi kohta). Võimsamate tarbijate toitmiseks kasutatakse gaastäitega alaldajalampe — gasotrone, kusjuures alaldaja lülituse põhimõte jääb samaks, või ka võrega tüüritavaid tiratrone.

§ 3. SILUMISFILTRID

Pool- või täisperioodalaldajast saadava pulseeriva voolu vabastamiseks vahelduvkomponendist kasutatakse induktiiv-mahtuvuslikku (*L-C-*) või takistus-mahtuvuslikku (*R-C-*) anoodvoolu silumisfiltrit. *Silumisfiltri* ülesanne on muuta alaldatud vooluimpulsid püsiva pingega (s. o. «puhtaks») alalisvooluks. Selleks peab ta katma vooluimpulsside vaheajal tarbija vajaduse ja impulssside ajal salvestama endasse uut elektritagavara. Alaldajates kasutatavaid silumisfiltrite skeeme kujutab joonis 17. 3.

Silumisfiltrites kasutatakse suuremahtuvuselisi elektrolüütkondensaatoreid ja raudsüdamikule keritud suure induktiivsusega poole — paispoole, harvemini ka aktiivtakisteid. Iga poolperioodi saatva voolutõuke vältel laetakse kondensaatorsisendiga filtri esimene kondensaator C_1 suhteliselt kõrge pingeni (joonis 17. 3-*a*). Paispooli *D* suure induktiivtakistuse tõttu pääseb teise kondensaatorini C_2 juba praktiliselt «puhas», s. o. vahelduvkomponendita alalisvool. Esimest kondensaatorit laadivate voolupulsside vaheajal või hetkel, mil filterlülituse sisendpinge on madalam, annab

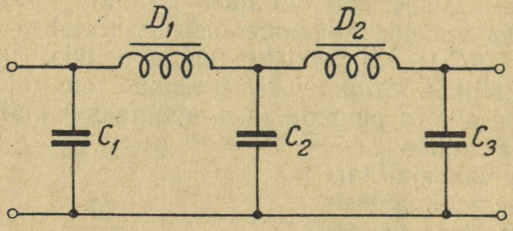


Joonis 17. 3. Alaldajates kasutatavate silumisfiltrite põhitüüpe.

see kondensaator osa oma laengust paispooli kaudu teisele kondensaatorile ja tarbijale. Paispoolis sel ajal tekkiv omainduktsiooni elektromotoorne jõud takistab samuti pinge alanemist teisel kondensaatoril.

Suurema võimsusega alaldajaseadistes on kasutusel paispoolsisendiga filterlülitused (joonis 17. 3-*b*), millede väljandpinge on vähem sõltuv koormusest.

Lihtsamates seadmetes võib paispooli asendada aktiivtakistiga *R* (joonis 17. 3-*c*). Eriti kõrgekvaliteediliste seadmete toitmisel alaldajast kasutatakse ka mitmekordseid silumisfiltreid (joonis 17. 4), mis koosnevad nagu mitmest järjestikusest filtrist ja tagavad täiuslikuma silumise.



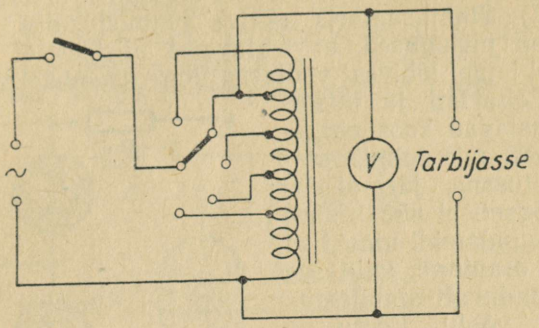
Joonis 17. 4. Kahe lüliga silumisfiltri skeem.

Anoodpinge silumisfiltrites kasutatavad kondensaatorid omavad mahtuvust 6 kuni 40 mikrofaradit ja paispoolid — induktiivsust 5 kuni 30 henrit. Aktiivtakisti suurus, millega võib asendada paispooli, oleneb tarbija voolust. Selle takistus valitakse alates 500 oomist kuni mitme kilo-oomini või eriti väikese voolu tarbimise juures kuni mitmekümne kilo-oomini. Arvesse tuleb võtta, et tarbija pinge jääb madalamaks filtri takistil või paispooli mähise aktiivtakistusel tekkiva pingelangu võrra.

Huvitav on märkida seda, et filtri esimene kondensaator üksnes ei silu pingekõikumisi, vaid tõstab ühtlasi filtrist väljuvat alalispinget. Seda põhjustab asjaolu, et kondensaator laadub alaldajalambi ja trafo mähise suhteliselt väiksemate sisetakistuste kaudu palju kiiremini, kui tühjeneb läbi tarbija suurema sisetakistuse. Sellest nähtusest tingituna võibki esimese kondensaatori pinge ja isegi filtri väljandpinge olla kõrgem trafo sekundaarmähise pinge efektiivväärtusest ning suure C_1 puhul läheneda selle pinge amplituudväärtusele. Koormamata filtri puhul (kui tarbija pole ühendatud filtri väljandiga) tõuseb pinge kondensaatoritel praktiliselt trafo pinge amplituudväärtuseni. Seega peab muutliku koormusega töötavate alaldajate silumisfiltrites kasutatavate elektrolüütkondensaatorite lubatav talitluspinge vastama mitte tarbija poolt vajatavale pingele, vaid võrgutrafo sekundaarpinge amplituudväärtusele, mis on harilike vahelduvvoolu voltmeetritega mõõdetavast efektiivväärtusest umbes 1,4 korda suurem.

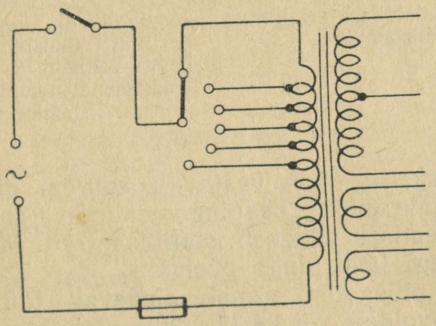
§ 4. PINGE STABILISEERIMINE

Kui raadioaparatuuri ja raadiotehnilisi mõõteseadmeid toitev pinge kõigub liiga suurtes piirides, siis tuleb kasutada toiteseadmetes pingestabilisaatoreid, mis hoiaksid nendest saadava pinge püsivana võrgupinge või koormusvoolu kõikumisel.



Joonis 17. 5. Autotrafo kasutamine tarbijasse juhitava pinge mitteautomaatseks reguleerimiseks.

Võrgupinge kõikumist saab kompenseerida autotrafo lisamisega lülitusse enne toiteseadet. Võrgupinge võimalikul muutumisel tuleb vastava lüliti abil reguleerida võrgutrafole antav pinge taas normaalseks (joonis 17. 5). Niisugune reguleerimine toimub



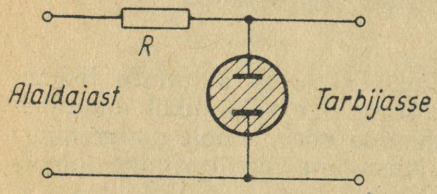
Joonis 17. 6. Võrgutrafo primaarmähise väljavõtete kasutamine pinge reguleerimiseks.

mitteautomaatselt voltmeetri näitude järgi. Autotrafo ülesande täidab ka mitme väljavõttega primaarmähis võrgutrafol (joonis 17. 6).

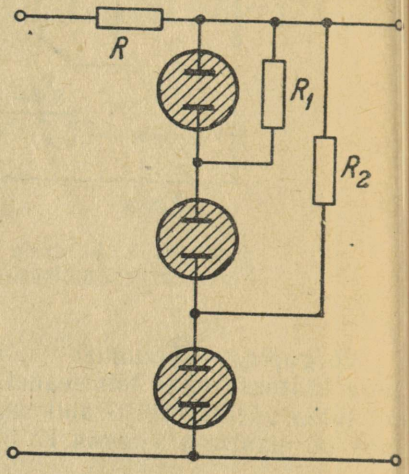
Mõnikord piisab üksnes anoodpinge stabiliseerimisest. Siis

kasutatakse alaldajas ioonstabilisaatoreid või erilülitusi elektronlambiga, mis hoiavad koormuse või võrgupinge muutumisel tarbijale rakendatava pinge nõutavates piirides.

Külma katoodiga ioonseadist (huumlampi), mida kasutatakse pinge stabiliseerijana, nimetatakse *huumstabilisaatoriks* ehk *stabilitroniks* («stabilovoldiks»). Taoline stabilisaator ühendatakse rööbiti tarbijaga ning seda toidetakse alaldajast eeltakisti R kaudu (joonis 17.7). Stabilisaatoris tekkiva huumlahenduse füüsikalised omadused on niisugused, et teatavates piirides ei olene pinge elektroodidel lampi läbivast voolust (pinge tõusmisel väheneb sisetakistus). Eeltakisti ja huumlamp moodustavad koos pingejagaja-lülituse, mis toimib stabilisaatorlülitusena järgmiselt: toitepinge tõusmisel püüab suureneda ka huumlambil ning tarbijal mõjuv osapinge, kuid see suurendab tunduvalt stabilisaatorit läbivat voolu. Koguvool



Joonis 17.7. Pingestabilisaatori lülitus gaaslahenduslambiga.



Joonis 17.8. Pingestabilisaatori lülitus järjestikuste gaaslahenduslampidega. Takistid R_1 ja R_2 soodustavad gaaslahenduslampide süttimist pingestamise momendil.

kasvab ja eeltakistil tekib vastavalt suurem pingelang; järelikult jääb tarbijale mõjuv osapinge endiseks. Tarbija voolu võimalikul suurenemisel väheneb stabilisaatorit läbiv vool samavõrra ning jällegi jääb pinge püsivaks.

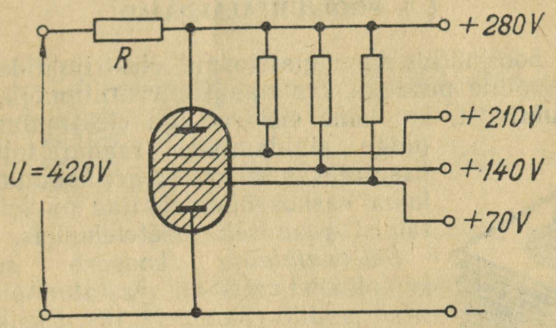
Üks huumstabilisaator annab olenevalt täitegaasist umbes 70-, 85- või 105-voldise või ka kõrgema stabiliseeritud pinge, mis vastab selle huumlambi talitluspingele. Kõrgemate pingete stabiliseerimiseks tuleb lülitada järjestikku mitu huumlampi (joonis 17.8) sellise arvestusega, et igale neist jääks nõutav talitluspinge. Vajaliku eeltakistuse saab määrata valemist:

$$R = \frac{U - U_t}{I_t + I_s},$$

kus U on stabilisaatorlülitust toitva mittestabiilse pinge kesk-

mine väärtus [1], U_t — stabilisaatorlülitusest saadav stabiliseeritud pinge [2], I_t — vähim tarbitav vool ja I_s — stabilisaatori suurim lubatav vool. Juhul kui tarbija vool kõigub suurtes piirides ($I_{t_{min}}$ ja $I_{t_{max}}$ vahel), siis peab $I_s = 1{,}25\ (I_{t_{max}} - I_{t_{min}})$.

Tegur 1,25 arvestab asjaolu, et huumstabilisaator vajab normaalseks gaaslahenduseks teatavat minimaalset voolu. Skeemi ühendatud suureoomilised lisatakistid R_1 ja R_2 (mis on suurusjärgus 0,5 megaoomi) soodustavad huumlampide «süttimist», s. o. täitegaasi ioniseerumist pingestamise algul.



Joonis 17. 9. Lülitus mitme elektroodiga gaaslahenduslamp-stabilisaatoriga.

Mitme elektroodiga huumstabilisaatorid ühendavad endas nii stabilisaatori kui ka pingejagaja omadused. Silindrilised elektroodid on sellel ioonseadisel paigutatud üksteise sisse ja moodustavad nagu mitu järjestikust huumlampi, millest igale langeb 70-voldine osapinge. Mitme elektroodiga huumlambilt (joonis 17.9) saab ühtlasi mitme suurusega stabiliseeritud pingeid.

Tuleb märkida, et huumstabilisaatorid sobivad ainult alalispinge stabiliseerimiseks. Suurema koormatavuse saamiseks tuleb kasutada vastavalt suuremaid (suurema elektroodide pinnaga) stabilisaatoreid. Mitme väikese stabilisaatori rööbiti lülitamine ei anna soovitud tulemusi, kuna niisugune lülitus ei hakka korralikult töötama — voolud ei jagune ühtlaselt kõigile paralleelsetele stabilisaatoritele.

Küttevoolu stabiliseerimiseks kasutatakse nii alalis- kui ka vahelduvvoolu puhul *raud-vesinik-takistit,* mis oma ehituselt sarnaneb tavalise hõõglambiga. Vesinikuga täidetud klaasballoonis asuvast raudtraadist juhitakse läbi kogu stabiliseeritav vool. Voo-

[1] U valitakse enamasti 50 protsendi võrra suurem tarbija poolt vajatavast pingest. Liigne pinge jääb pingelanguna eeltakistile R.

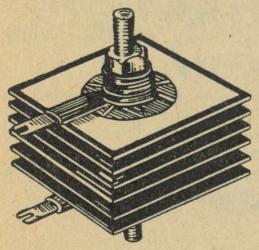
[2] U_t sõltub ainult stabilisaator-huumlambi tüübist.

luallika pinge tõusmisel ei muutu vool märgatavalt, sest sellega kaasneb raud-vesinik-takisti hõõgniidi temperatuuri tõusmine ja traadi takistuse kasv. See aga omakorda takistab voolu suurenemist. Takisti võtab enesele vaid suurema pingelangu, kuid vool jääb endiseks. Raud-vesinik-takistile rakendatud pinge kahekordistumisel suureneb vool näiteks vaid 5 protsendi võrra.

Raud-vesinik-takistite talitlusandmed on toodud vastavates tabelites. Nendeks on stabiliseeritav vool I_t (võrdub tarbija vooluga) ja minimaalne ning maksimaalne lubatav pingelang, vastavalt U_{min} ja U_{max}.

§ 5. POOLJUHTALALDAJAD

Mõnede pooljuhtide kombinatsioonid elektrijuhtidega avaldavad elektrivoolule peaaegu samalaadset ventiili-mõju, s. o. ühesuunalist juhtivust, kui kahe elektroodiga elektronlamp. Anoodpinge alaldamiseks raadio toiteseadmetes kasutatakse seleen- ja germaaniumalaldajaid, kuna vaskoksüüdalaldajad on leidnud tarvitamist peamiselt mõõtetehnikas.



Joonis 17. 10. Toiteseadistes kasutatav seleenketaste sammas.

Seleenalaldaja koosneb seleenketaste komplektist, mis on reastatud pikale isoleeritud poldile (joonis 17. 10). Üksiku alaldajaelemendi ehitus on järgmine. Ümmargusele või ruudukujulisele nikeldatud karedapinnalisele teraskettale sulatatakse ühtlane 0,1 millimeetri paksune seleenikiht, mis edasisel töötlemisel muudetakse pooljuhiks. Sellele kantakse kiht plii, kadmiumi ja vismuti sulamist, mis loob elektrilise kontakti seleeni pealispinnaga. Mõnikord nimetatakse seda metallisulami kihti katoodkihiks.

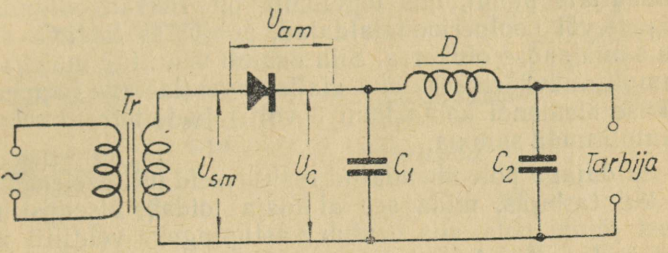
Katoodkihiga luuakse elektriline ühendus seibikujulise pronksvedrukese abil, mis mitme seleenketta järjestamisel «tulbaks» puutub vastu järgmist terasest alusketast.

Pärast seleenalaldaja formeerimist — esialgset töötlemist elektrivooluga — ilmub seleeni ja katoodkihi puutepinnale õhuke uue keemilise ühendi — kadmiumseleniidi kiht, mis koos seleeniga määrabki alaldajaketta elektrilised omadused. Formeeritud seleenketas avaldab unipolaarset (ühesuunalist) elektrijuhtivust — tema elektriline takistus on ühele voolusuunale tuhandeid kordi väiksem kui vastassuunalisele voolule. Vool läbib kergesti seleeni ja kadmiumseleniidi puutepinna (tõkkekihi) seleenilt (alusketalt) kadmiumseleniidi (pronksvedrukese) suunas. Unipolaarse juhtivuse tõttu saabki seleenkettaid edukalt rakendada alaldajates elektronlambi asemel.

Seleenketta kui elektrilise ventiili võrdlemisel elektronlambiga ilmneb siiski teatav erinevus. Iga elektronlamp juhib voolu a i n u l t

ühes suunas, ning vastupidisele avaldab praktiliselt lõpmatut takistust. Seleenventiil, nagu teisedki pooljuhtalaldajad, juhib voolu siiski mõlemas suunas, kuigi väga erineval määral.

Pooljuhtalaldajate elektrilisi omadusi iseloomustab kõige paremini tunnusjoon, mis näitab sõltuvust temale mõjuva alalispinge ja selle poolt põhjustatud voolu vahel (joonis 17. 12-*b*). Hea juhtivuse suunas — *avasuunas* (kui seleenventiili alusketas on vedruseibi suhtes positiivne) tekitab juba madal pinge küllaltki tugeva voolu. Vastupidisel juhul — *tõkkesuunas* (kui alusketas on vedruseibi suhtes negatiivne) on vool nõrk.



Joonis 17. 11. Vastupinge kujunemine alaldajal.

Alaldajate kasutamisel tuleb lülituses esinevatest elektrilistest olukordadest (pingeamplituudid, voolud) lähtudes valida sobiv alaldajaelemendi (ventiili) tüüp. Pooljuhtalaldajaid iseloomustavate põhiliste andmetena esitatakse tabelites suurim lubatav pingeamplituud ventiilil tõkkesuunas, maksimaalne lubatav alaldatud vool [1] ja alaldatava voolu maksimaalne lubatav amplituud ventiilis püsival koormusel.

Ekslik oleks arvata, et ventiilile mõjub tõkkesuunalisel poolperioodil ainult toitepinge amplituudväärtus U_{sm}. Tegelikult töötab peaaegu iga alaldaja koos filtriga, mis sisaldab reaktiivseid lülituselemente (näiteks kondensaatoreid); need aga muudavad elektrilist olukorda lülituses.

Alaldajates tekkivate nähtuste selgitamiseks kasutame tavalist poolperioodalaldaja skeemi jooniselt 17. 11. Siin on toitetrafo sekundaarmähisest saadava pinge amplituudväärtus U_{sm} ja filtri kondensaatoril tekkiva pulseeriva pinge alaliskomponent U_C. Alaldajaelemendil kujuneva vastupinge (tõkkesuunalise pingelangu) amplituudi tähistab U_{am}.

Nagu nähtub jooniselt, koosneb ventiilile mõjuv maksimaalne pinge U_{am} kahest osapingest: laetud kondensaatori enam-vähem

[1] Maksimaalse alaldatud vooluna mõistame voolu poolperioodlülituses alaldaja filtri väljandis; täisperioodlülituse puhul või mitme paralleelse alaldajaelemendi kasutamisel on ühele alaldajaelemendile langev koormus üldisest alaldatud voolust muidugi vastavalt väiksem.

püsivast alalispingest U_c ja trafost saadava vahelduvpinge amplituudväärtusest U_{sm}. Positiivsel (juhtival) poolperioodil mõjub ventiilile viimaste vahe, mittejuhtival poolperioodil aga nende summa. Just viimast peabki alaldajaelement taluma ja see antakse tabelites suurima lubatava tõkkesuunalise pingena või maksimaalse pingeamplituudina tõkkesuunas (lühidalt: vastupingena). Kuna mittekoormatud olukorras võib pinge filtri kondensaatoritel tõusta peaaegu toitepinge amplituudväärtuseni, siis vastupinge ventiilil võib küündida kahekordse toitepinge amplituudväärtuseni ehk 2,8-kordse efektiivväärtuseni.

Akulaadijate puhul, mis tegelikult on lihtsad silumisfiltrita täisperiood- või poolperioodalaldajad, põhjustab laetava aku alalispinge samalaadse olukorra. Siin osutub ventiilile mõjuva vastupinge amplituudväärtuseks aku alalispinge (laetava happeaku iga järjestikuse elemendi kohta kuni 3 volti) ja toitetrafo sekundaarpinge amplituudi summa.

Kui alaldajaga pole ühendatud reaktiivseid lülituselemente (filtrit) ja kui tarbijas, mida see alaldaja toidab, sisemist elektromotoorset jõudu pole, siis osutub vastupingeks ventiilil muidugi ainuüksi trafo sekundaarpinge negatiivne amplituud.

Pinge, mille puhul seleenventiili tõkkekiht läbilöögi tagajärjel hävib, on iga ketta kohta umbes 50 volti; seega ei tohi vastupinge amplituud küündida sellise väärtuseni. Sellest tulenebki nõue, et alaldatava vahelduvpinge efektiivväärtus võib olla kuni 18 volti iga järjestikku lülitatud seleenketta kohta.

Seleenketta talitlustemperatuur ei tohi ületada 70° C ning maksimaalne lubatav koormusvool on seda suurem, mida suurem on ketta pindala.

Suuremate pingete alaldamiseks lülitatakse vastav arv seleenkettaid järjestikku; tugevamate voolude puhul kasutatakse suurema läbimõõduga kettaid või mitut väiksemat ketast rööbiti-lülituses.

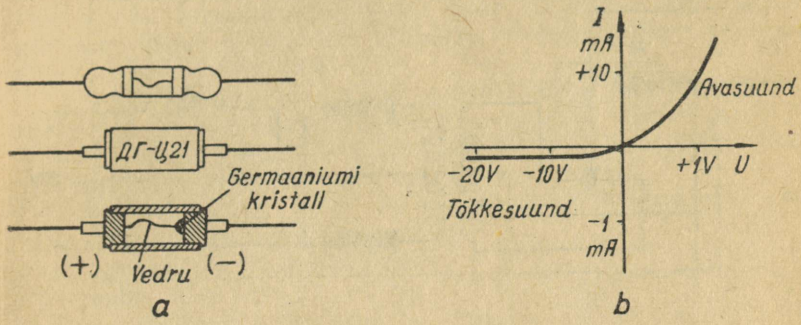
Vastavalt koormusvoolule tuleb tabelist 8 valida alaldajaketaste minimaalne vajalik läbimõõt.

Tabel 8

Seleenalaldaja koormatavus

Ketta läbimõõt mm	Suurim lubatav koormusvool mA	
	poolperioodalaldamisel	täisperioodalaldamisel
18	40	75
25	75	150
35	150	300
45	300	600
100	1600	3000

Germaaniumalaldaja (-diood) ületab tunduvalt kõigi teiste pooljuhtalaldajate elektrilised omadused. *Germaanium-punktdiood* koosneb väikesest metallalusele kinnitatud germaaniumikristallist ja selle pinnale toetuvast volframvedrukesest (joonis 17. 12-*a*). Dioodi kristallis kujuneb ümber teraviku puutekoha elektriline tõkkekiht, mis avaldab väga head unipolaarset elektrijuhtivust. Ühe taolise dioodi tunnusjoon — voolu sõltuvus pingest — on kujutatud joonisel 17. 12-*b*.



Joonis 17. 12. Germaaniumdioodi vaade ning ehitus (*a*) ja tunnusjoon (*b*).

Pooljuhtdioodide elektrilised iseloomustussuurused, nagu avasuunaline ja tõkkesuunaline sisetakistus, sõltuvad suurel määral talitlustemperatuurist. Selle tõusmisel halvenevad kõik elektrilised omadused: tõkkesuunalise ja avasuunalise sisetakistuse suhe väheneb, alaneb läbilöögipinge jne.

Tugevamate voolude alaldamiseks kasutatavad *germaaniumpinddioodid* erinevad kirjeldatud punktdioodidest ainult konstruktiivsest küljest. Punktdioodi nimetus on tuletatud metallteraviku ja germaaniumi kristalli puutekoha punktikujulisusest. Raadio toiteseadmetes kasutatavates pinddioodides luuakse ühendus germaaniumi kristalliga suurepinnaliste lamedate elektroodide abil. Niisuguste germaaniumalaldajate mõned tüübid taluvad mitmesaja-voldiseid vastupingeid ja väga suurt voolutihedust.

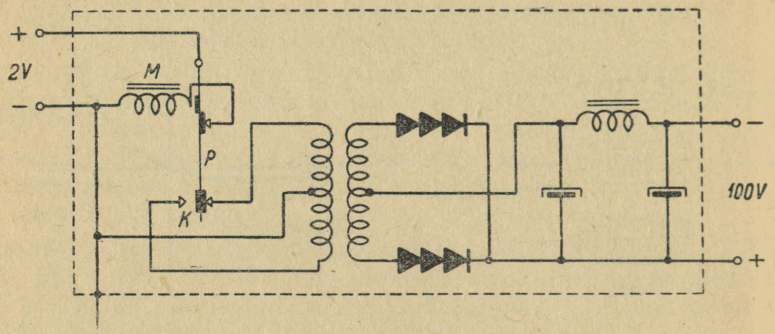
Kõik germaaniumdioodid on lampdioodidest mehaaniliselt palju vastupidavamad ja võrratult pikema talitluseaga.

Vastav tabel õpiku lõpus annab ülevaate mõnede kodumaiste germaaniumdioodide elektrilistest iseloomustussuurustest.

§ 6. MEHAANILISED MUUNDAJAD

Madalapingelist alalisvoolu on võimalik «transformeerida» kõrgemapingeliseks vibraatormuundaja või mootor-generaatori abil. Nendest esimene koosneb elektromagnetilisest katkestist, mis

vastavate kontaktide abil muudab alalisvoolu pulseerivaks vooluks. Katkestist saadava pulseeriva voolu vahelduvkomponent transformeeritakse kõrgemapingeliseks ja alaldatakse elektronlambi, pooljuhtalaldaja või sama elektromagnetilise katkesti teise kontaktidekomplekti abil. Alaldatud vool juhitakse läbi silumisfiltri tarbijatele, näiteks raadioseadme elektronlampide anoodringide toiteks.



Joonis 17. 13. Alalispinge suurendamine elektromagnetilist katkestit sisaldava lülitusega.

Elektromagnetiline katkesti (joonis 17. 13) koosneb väikesest elektromagnetist *M* ja selle pooluste läheduses liikuvast ühenduskontakte kandvast vetruvast terasplaadikesest *P*. Vedrukese ühes seisus on parempoolsed kontaktid ühendatud ja mähist läbiva voolu magnetväli viib vedrukese teise asendisse. Sellega katkeb vool elektromagnetis ja vedruke langeb tagasi esialgsesse seisu. Jällegi tekib vool ja protsess hakkab korduma enam-vähem püsiva sagedusega, mis valitakse 60 kuni 300 hertsi piires.

Vibraatori kontaktide komplekt *K* alaldaja skeemis joonisel 17. 13 jaotab akust saadava alalisvoolu vaheldumisi üksikute impulssidena trafo primaarmähise pooltesse. Sekundaarmähisest saadav kõrgem vahelduvpinge alaldatakse käesolevas skeemis kahe täisperioodlülituses pooljuhtalaldaja abil ja juhitakse läbi silumisfiltri tarbijasse.

Pöörlev masinmuundaja ehk *umformer* ühendab eneses väikest madalapingelist alalisvoolumootorit ja kõrgemapingelist alalisvoolu- (mõnikord ka vahelduvvoolu-) generaatorit, mis toidab tarbijaid.

Mehaanilisi muundajaid kasutatakse liikuvates raadioseadmetes (eriti transpordivahenditel, näiteks autodes) anoodpinge saamiseks 6- või 12-voldise pingega akupatareist. Samast vooluallikast toidetakse ka elektronlampide kütteniite.

HELISAGEDUSVÕIMENDAJAD

§ 1. VÕIMENDAJA ISELOOMUSTUSSUURUSED

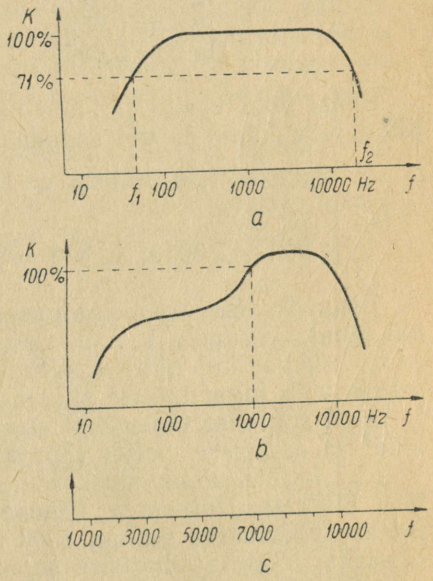
Raadiotehnikas ning elektroakustikas esineb vajadus võimendada helisagedusvoole, s. o. mikrofonist või mõnest muust sellelaadsest vooluallikast saadavaid helisageduste piirkonda kuuluvaid nõrku madalsagedusvoole. Seda tehakse elektronlampe või pooljuhttrioode sisaldavate lülituste — helisagedus- (madalsagedus-) võimendajate abil.

Iga võimendusseadis omab *sisendit,* kuhu juhitakse võimendatav pinge (vool), *väljandit,* millest saadakse võimendatud pinget (voolu), ning toiteallikaid. Helisagedusvõimendajaid iseloomustab rida suurusi, mida tuleb käsitleda lähemalt.

Võimendustegur (K) on võimendaja väljandist saadava helisageduspinge $U_v\sim$[1] ja sisendisse antava helisageduspinge $U_s\sim$ suhe: $k = U_v\sim : U_s\sim$. Sisendisse juhitavat helipinget nimetatakse tüürpingeks ja väljandist saadavat — väljandpingeks.

Väljandvõimsus ($P_v\sim$) on vahelduvvoolu võimsus, mida võimendaja annab väljandiga ühendatud tarbijale normaalse tüürpinge amplituudi ja tarbija sisetakistuse korral. Väljandvõimsus ja võimendustegur määratakse harilikult ühel kindlal sagedusel, näiteks 800 või 1000 hertsi juures.

Sagedusriba (*ülekantav riba*) on helisageduste vahemik, mille piires antud võimendaja võimendustegur on normaalne. Tegelikult loetakse võimendaja sagedusribaks nende sageduste, nn. *lõikesageduste* (*piirsageduste*) vahemikku, millede juures võimendustegur moodustab veel 71 protsenti normaalsest väärtusest.



Joonis 18. 1. Helisagedusvõimendaja sageduskarakteristikuid. Sagedusriba määramine (*a*) ja sageduskarakteristik suure lineaarmoonutuse puhul (*b*); rõhttelg lineaarse jaotuskava puhul (*c*).

[1] Võimendajate vaatlemisel tuleb eristada elektroodide a l a l i s pingeid ja -voole v a h e l d u v pingetest ja -vooludest, mis ilmuvad lülituses tüürpinge toimel. Vahelduvvoolude ja -pingete tähisele lisatakse siis lainejoon.

Lineaarmoonutused (*sagedusmoonutused*) avalduvad selles, et võimendustegur pole ühtlane kõigi ülekantavasse sagedusribasse kuuluvate sageduste juures. Seetõttu pole erineva sagedusega pingete või voolude amplituudid väljandpinges täpselt samas vahekorras kui sisendpinges.

Sageduskarakteristik iseloomustab graafiliselt võimendustegurit sõltuvust võimendatava voolu sagedusest. Tema joonestamisel (joonis 18. 1-*a*) kantakse rõhtteljele sagedused logaritmilise skaala järgi, mille puhul sageduste suurenemise suunas jaotused muutuvad pidevalt väiksemaks, et hõlmata tervet helisageduste piirkonda, ja püstteljele — võimendustegurid (sageli väljandvõimsuse või -pinge suhtelised väärtused kindlal sisendpingel).

Logaritmilise skaala saamiseks kantakse mingis mõõtkavas graafiku rõhtteljele arvude (mõõteväärtuste) logaritmid:

$$\begin{array}{ll} \lg 1 = 0{,}0000; & \lg 6 = 0{,}7782; \\ \lg 2 = 0{,}3010; & \lg 7 = 0{,}8451; \\ \lg 3 = 0{,}4771; & \lg 8 = 0{,}9031; \\ \lg 4 = 0{,}6021; & \lg 9 = 0{,}9542; \\ \lg 5 = 0{,}6990; & \lg 10 = 1{,}0000. \end{array}$$

Edasi võib veelgi jätkuda niisuguseid jaotuste seeriaid, kuid nüüd juba kümnete või sadade tähistamiseks, sest

$$\lg 20 = 1{,}3010;\ \lg 30 = 1{,}4771;\ \lg 40 = 1{,}6021 \text{ jne.}$$

ning

$$\lg 200 = 2{,}3010;\ \lg 300 = 2{,}4771;\ \lg 400 = 2{,}6021 \text{ jne.}$$

Logaritmilise skaala alguses on jaotuste vahed suuremad kui lõpus. Arvudele 1 . . . 10 vastavad jaotused võtavad enda alla sama pikkuse kui näiteks arvud 10 . . . 100 või 100 . . . 1000. Tänu sellele võib logaritmilise skaala puhul selle igas osas saada ühe ja sama suhtelise täpsusega lugemeid — väikesi arvväärtusi saab määrata arvulises mõttes täpsemini kui suuri.

Kui kujutada sageduskarakteristikut jooniselt 18. 1-*a* tavalise, ühtlaste jaotustega (lineaarse) skaala abil, siis peaksime jaotuse väärtuseks valima 1000 hertsi, et need ei kujuneks liiga tihedaks. Mõnesaja-hertsise sageduse määramine skaala alguses osutub aga seetõttu äärmiselt ebatäpseks (joonis 18. 1-*c*).

Logaritmiliste jaotustega skaalat kasutatakse siis, kui määratav või väljendatav ühik muutub väga laiades piirides (helisagedusvõimendaja sageduskarakteristik jms.). Laialdast rakendust on leidnud erisüsteemilised elektrimõõteriistad, millede skaalad omavad logaritmilist jaotust (helivaljuse, sageduse, valgustustugevuse jms. laiades piirides muutuvate suuruste mõõteseadised).

Lineaarmoonutused väljenduvad võimendaja sageduskarakteristiku kujus. Eeskujulik võimendaja peab oma sagedusribas (näiteks lõikesageduste vahemikus f_1 kuni f_2 joonisel 18. 1-*a*) omama

püsivat võimendustegurit; seega osutub tema sageduskarakteristik selles vahemikus rõhtsaks sirgeks. Joonisel 18. 1-*b* on näidatud lineaarmoonutustega sageduskarakteristik. Praktiliselt lubatakse helisagedusvõimendajates teatavaid kõrvalekaldumisi ideaalsest sageduskarakteristikust. Eriotstarbelistes võimendajates aga tekitatakse sagedusmoonutusi tehislikult (magnetofoni-võimendajates jms.).

Ebalineaarmoonutused ilmnevad niisuguste «võõraste» sagedustega pingete lisandumisena võimendaja väljandpingesse, mis sisendpinges puuduvad. Nende moonutuste olemasolu korral pole võimendaja väljandpinge oma kujult sarnane siinusjoonega, kuigi sisendpinge on siinuseline. Ebalineaarmoonutuste suurust väljendab *ebalineaarmoonutustegur*. Musikaalne kõrv tajub juba 5- kuni 7-protsendilist ebalineaarmoonutust.

Ebalineaarmoonutused ilmuvad võimendajas lambi ebaõige eelpingestamise puhul, samuti ka võimsusvõimendaja anoodi koormustakistuse ebasobivuse korral.

Tuleb märkida, et heli elektrilisel ülekandmisel tekib moonutusi mitte üksnes võimendajas, vaid ka näiteks valjuhääldajas ja mikrofonis. Nendegi elektroakustiliste seadmete headuse üle võib otsustada sageduskarakteristiku kuju ja ebalineaarmoonutusteguri kaudu.

Madalsagedusvõimendajad valmistatakse ühe- või mitmeastmelistena. Ühe *võimendusastme* moodustab üks elektronlamp või pooljuhttriood (erijuhul, näiteks rööbiti- ning vastastaktlülitustes ka mitu) kõigi oma vooluringidesse kuuluvate lülituselementidega — takistitega, kondensaatoritega, transformaatoritega jne. Võimendaja üksikud astmed *sidestatakse* sobivate lülituselementide kaudu, et eelmises astmes võimendatud vahelduvpinget juhtida edasiseks võimendamiseks järgmisesse astmesse, selle talitlusrežiimi alalispingete mõttes mitte rikkudes.

Madalsagedusvõimendaja viimane aste, mille anoodring toidab valjuhääldajat või mõnda muud tarbijat, on *võimsusvõimendaja*. Sageli (võimsa vastastaktvõimendaja korral) töötab ka eelviimane aste võimsusvõimendajana. Mitmeastmelises võimendajas eelneb võimsusvõimendajana töötavale *lõppastmele* üks või mitu *pingevõimendusastet*. Nende ülesanne on tõsta võimendatavat sisendpinget võimsusvõimendaja väljatüürimiseks vajaliku suuruseni. Mõnikord nimetatakse kõiki lõppastmele eelnevaid pingevõimendusastmeid ühiselt *eelvõimendajaks*.

§ 2. TARBIJA SOBITAMINE VOOLUALLIKAGA

Nagu eespool vaatlesime, jääb vooluallika klemmipinge U sisetakistusel R_s tekkiva pingelangu IR_s võrra väiksemaks tema elektromotoorsest jõust E. Kuna nii voolu kui ka klemmipinge määrab püsiva sisetakistuse ja elektromotoorse jõu juures tarbija takistus R_t (joonis 7. 3), siis on pikemata selge, et maksimaalse voolu

saamiseks peab tarbija takistus olema sisetakistusega võrreldes väga väike (nn. lühise režiim). Kuid maksimaalse vooluga kaasneb väga väike klemmipinge.

Teisest küljest kohtume raadiotehnikas võimenduslülitustega, kus tarbijale (koormustakistusele) peab jääma võimalikult kõrge pinge. Sellise olukorra saavutamiseks peab tarbija takistus olema koormatava astme sisetakistusega võrreldes väga suur (tühijooksu režiim). Nii lühise kui ka tühijooksu puhul ei vabane tarbijal võimsust: esimesel juhul on vool küll suur, kuid välise vooluringi takistus on null ja temal pingelangu ei teki (kogu vooluallika elektromotoorne jõud mõjub ainult sisetakistusele). Võimsus kui pinge ja voolu korrutis osutub tarbijal nulliks. Samuti ka teisel juhul: tühijooksu puhul on tarbija takistus lõpmata suur, kogu elektromotoorne jõud mõjub temale, kuid puudub vool. Võimsus osutub siin seega samuti nulliks.

Tarbija toitmiseks maksimaalse võimsusega tuleb valida mingi vahepealne režiim lühise ja tühijooksu vahel, mille puhul tarbija takistus oleks selline, et tekkiva voolu ja temal ilmuva pingelangu korrutis (s. o. võimsus) osutuks maksimaalseks. Selline olukord ilmub, nagu matemaatiliselt võib näidata, juhul, kui tarbija takistus võrdub vooluallika sisetakistusega.

Eespool esitatud mõttekäigu selgitamiseks toome kolm arvutusnäidet vooluringi kohta, kus vooluallika elektromotoorne jõud $E = 100$ volti ja selle sisetakistus $R_s = 100$ oomi (joonis 7.3). Arvutustes tähistame tekkivat voolu I, vooluallika klemmipinget U, tarbijal eralduvat võimsust P, vooluallika sisetakistusel kaotsiminevat võimsust P' ja kasutegurit η abil [1].

a) Lühise režiimile lähedane olukord, kui $R_t = 1$ oom (tarbija takistus on sisetakistusega võrreldes väga väike):

$$I = \frac{E}{R_s + R_t} = \frac{100}{100 + 1} \approx 0{,}99 \text{ amprit},$$

$$U = E - IR_s \approx 100 - 0{,}99 \cdot 100 = 1 \text{ volt},$$
$$P = UI \approx 1 \cdot 0{,}99 = 0{,}99 \text{ vatti},$$
$$P' = I^2 \cdot R_s = 0{,}99^2 \cdot 100 = 98 \text{ vatti},$$
$$\eta = \frac{P}{P + P'} = \frac{0{,}99}{0{,}99 + 98} \approx 1\%.$$

b) Võimsuse maksimaalsele ülekandele vastav režiim, kui $R_t = 100$ oomi (tarbija takistus võrdub vooluallika sisetakistusega):

[1] Kasutegur η (kreeka tähestiku märk «eeta») väljendab tarbijal eralduva kasuliku võimsuse suhet võimsusesse, mida toodab elektromotoorse jõu allikas:

$$\eta = \frac{P}{P + P'} = \frac{U}{U + IR_s}.$$

$$I = \frac{100}{100+100} = 0{,}5 \text{ amprit},$$

$$U = 100 - 0{,}5 \cdot 100 = 50 \text{ volti},$$
$$P = 50 \cdot 0{,}5 = 25 \text{ vatti},$$
$$P' = 0{,}5^2 \cdot 100 = 25 \text{ vatti},$$

$$\eta = \frac{25}{25+25} = 50\%.$$

c) Tühijooksu režiimile lähedane olukord, kui $R_t = 10\,000$ oomi (tarbija takistus on sisetakistusega võrreldes väga suur):

$$I = \frac{100}{100+10\,000} \approx 0{,}0099 \text{ amprit},$$

$$U \approx 100 - 0{,}0099 \cdot 100 = 99 \text{ volti},$$
$$P \approx 99 \cdot 0{,}0099 = 0{,}98 \text{ vatti},$$
$$P' \approx 0{,}0099^2 \cdot 100 = 0{,}0098 \text{ vatti},$$

$$\eta = \frac{0{,}98}{0{,}98+0{,}0098} \approx 99\%.$$

Saadud tulemuste koondamisel tabeliks saame järgmise pildi:

Režiim	$R_t \ll R_s$[1] Lühis	$R_t = R_s$ Võimsuse maksimum	$R_t \gg R_s$[2] Tühijooks
Vool $I = \frac{E}{R_s + R_t}$	maksimaalne $\frac{E}{R_s}$	$\frac{1}{2}\frac{E}{R_s} = \frac{1}{2}\frac{E}{R_t}$	väga väike
Pinge tarbijal (vooluallika klemmipinge) $U = E - IR_s = IR_t$	väga väike	$\frac{1}{2}E$	maksimaalne
Kasulik võimsus tarbijal $P = UI = I^2R_t$	väike	maksimaalne $\frac{1}{4}\frac{E^2}{R_t} = \frac{1}{4}\frac{E^2}{R_s}$	väike
Kaotsiminev võimsus vooluallika sisetakistusel $P' = (E-U)I = I^2R_s$	maksimaalne	$P' = P$	väike
Kasutegur $\eta = \frac{P}{P+P'} = \frac{U}{U+IR_s}$	väga väike	50 %	ligi 100 %

[1] Tähistus $R_t \ll R_s$ näitab, et R_t on suuruselt väga väike, võrreldes R_s-ga.

[2] Tähistus $R_t \gg R_s$ näitab, et R_t on suuruselt väga suur, võrreldes R_s-ga.

Teist juhtumit või sellele lähedast režiimi kasutatakse raadiotehnikas siis, kui näiteks mitmeastmelise võimendaja järgneva astme tüürimiseks on tarvis eelnevast astmest ammendada maksimaalne võimsus (võimenduslülitused pooljuhttrioodidega; võimsusvõimendaja lõppastmed elektronlampidel). Selleks sobitatakse eelmise astme (kui «vooluallika») sisetakistus ehk *väljandtakistus* järgneva astme *sisendtakistusega* (kui «tarbijaga»), et oleks täidetud nõue nende võrduse kohta.

Kolmanda juhtumi lähedasi olukordi kasutatakse raadiotehnikas mitmesugustes olukordades, kui võimendusastme tüürimiseks pole praktiliselt tarvis kulutada võimsust, s. t. kui selleks piisab pingest, mis niisugusel juhul püütakse üle kanda järgmisele astmele võimalikult kadudeta (s. o. suhteliselt väikese pingelanguga eelmise astme sisetakistusel). Selleks piisab, kui eelmise astme väljandtakistus on mõnevõrra väiksem järgneva astme sisendtakistusest («ülesobitamine»).

Takistuste sobitamiseks võimenduslülitustes kasutatakse, nagu edaspidi näeme, trafosid, erilülitusi elektronlampidega ning transistoritega jms. Otstarbekas sobitamine võimendajas ei suurenda mitte üksnes sellest seadmest saadavat võimsust, vaid tavaliselt omab ka kaudset mõju võimendaja teistele iseloomustavatele suurustele (ebasoovitavate moonutuste ilmumisele, seadme talitluse ökonoomsusele jne.).

§ 3. PINGEVÕIMENDUSASTE; ELEKTRONLAMBI DÜNAAMILINE TUNNUSJOON

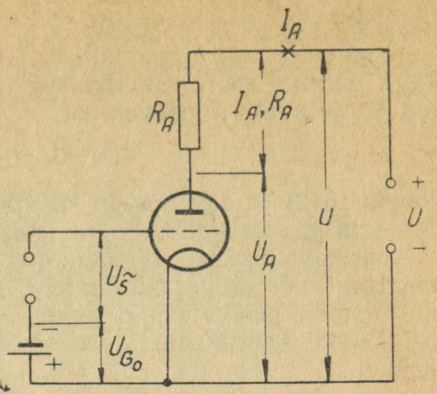
Lamptrioodiga pingevõimendusaste sisaldab võre-eelpinge allikat ja anood-koormustakistit (joonis 18. 2) ning loomulikult ka kütte- ja anoodvoolu allikaid. Viimased on tavaliselt ühised võimendusseadme kõikidele astmetele.

Elektronlambi võreringis mõjub korraga kaks pinget — püsiv negatiivne alalispinge (võre-eelpinge) U_{G0} ja võimendatav vahelduvpinge (tüür- ehk sisendpinge) $U_s\sim$, mis omab amplituudväärtust $U_{Gm}\sim$ [1]. Viimane põhjustab anoodvoolu muutumist, mille tagajärjel ilmub anoodringi koormustakistil R_A ja elektronlambi katoodi ning anoodi vahel muutlik pingelang. Olenevalt trioodi omadustest ning skeemi üksikosade suurustest võib selle pulseeriva pinge vahelduvkomponent — astme väljandpinge $U_v\sim$ olla tunduvalt suurem võrele juhitavast vahelduvpingest. Nende pingete suhe on astme võimendustegur:

$$K = \frac{U_v\sim}{U_s\sim} = \frac{\mu}{1+\frac{R_i}{R_A}}.$$

[1] Sisendpinge amplituudväärtuse tähistamiseks on joonisel 18. 3 toodud graafikul lisatud vastavale suurusele indeks *m*. Selle indeksi puudumisel on vaadeldav suurus antud efektiivväärtusena (näiteks tähis $U_s\sim$ vastab sisendpinge efektiivväärtusele).

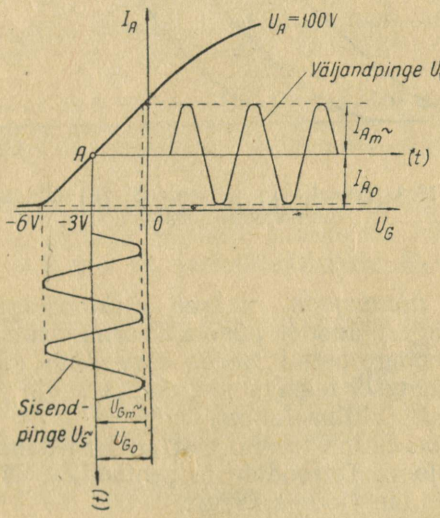
Võre-eelpinge valikuga määratakse lambi tunnusjoonel (joon. 18. 3) talitluspunkt *A*. Selle asend näitab anoodil mõjuvale pingele vastaval tunnusjoonel anoodvoolu alaliskomponendi I_{A0} suurust. Negatiivsema eelpinge U_{G0} andmisel nihkub talitluspunkt vasakule ja madalamale, s. o. väiksemate anoodalalisvoolude piirkonda, ning vastupidi.



Joonis 18. 2. Pinged ja voolud võimendusastme tüürvõre ja anoodi vooluringides.

Võre-eelpinge peab olema negatiivne, et vältida voolu võreringis, mis üldiselt põhjustab ebalineaarmoonutusi. Samal põhjusel peab võre-eelpinge olema suurem sisendpinge amplituudväärtusest, et viimase positiivsed tipud ei ulatuks võrepinge positiivsesse alasse:

$$U_{G0} > U_{sm\sim} = 1{,}4U_{s\sim}.$$



Joonis 18. 3. Talitlusrežiimi määramine võrepinge-anoodvoolu tunnusjoonelt.

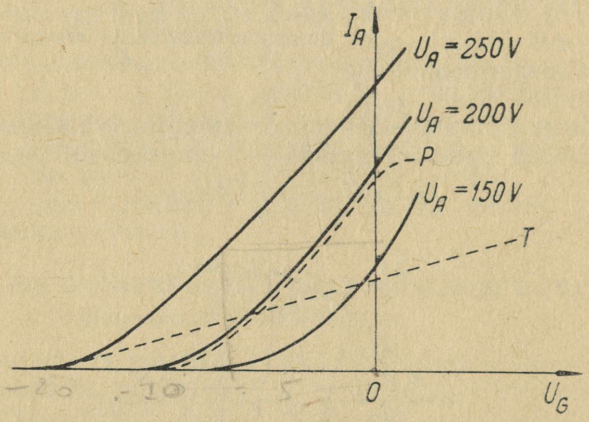
Võimendajana töötava elektronlambi anoodringis esineb koormustakistus aktiivtakistuse või induktiivsuse näol. Selle olemasolu muudab mõningal määral elektronlambi voolude-pingete vahe-

kordi. Võrepinge hetkväärtus määrab elektronlambi anoodpingele vastaval staatilisel tunnusjoonel anoodvoolu suuruse. Kuid anoodpinge osutub koormustakistusel tekkiva pingelangu $I_A R_A$ tõttu samuti sõltuvaks anoodvoolust:

$$U_A = U - I_A R_A$$

(joonis 18. 2) ja selle kaudu ka võrepingest. Anoodvool jääb seda väiksemaks, mida suurem on koormustakistus anoodringis.

Koormustakistuse tagasimõju tõttu anoodpingele ei järgi anoodvool võrepinge muutustele staatilise tunnusjoone kohaselt (mis vastab püsivale anoodpingele), vaid selleks tuleb määrata uus, anoodi koormustakistuse suurusele vastav dünaamiline tunnusjoon.



Joonis 18. 4. Trioodi (*T*) ja pentoodi (*P*) dünaamilise tunnusjoone põhikuju.

Dünaamiline tunnusjoon määrab elektronlambi anoodvoolu sõltuvuse võrepingest anoodi püsiva koormustakistuse ja anoodringi püsiva toitepinge puhul. Seega «arvestab» dünaamiline tunnusjoon anoodtakistusel tekkiva pingelangu mõju ja vastab elektronlambi tegelikule talitlusolukorrale.

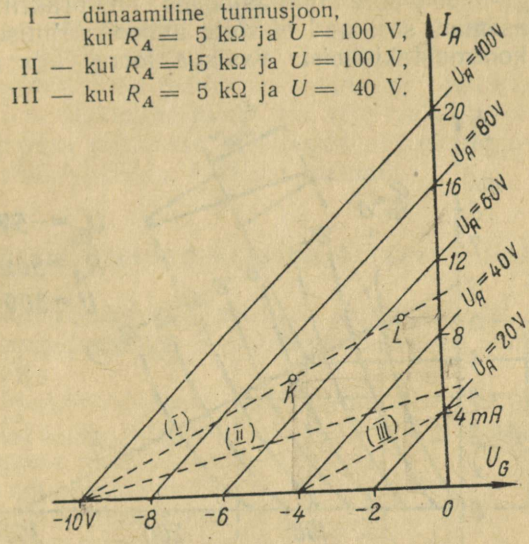
Trioodide dünaamiline tunnusjoon on lamedam ja sirgem kui staatiline tunnusjoon. Tetroodide ja pentoodide dünaamiline tunnusjoon on S-kujuline (joonis 18. 4).

Vaatleme lähemalt dünaamilise tunnusjoone ehitamist joonisel 18. 5 toodud staatilistele võrepinge-anoodvoolu tunnusjoontele, kui trioodi anoodtakistus $R_A = 5$ kilo-oomi ja anoodvooluallika pinge $U = 100$ volti. Lihtsuse mõttes on staatilised tunnusjooned kujutatud sirgetena. Nendele andmetele vastav dünaamiline tunnusjoon algab rõhtteljel punktist, kuhu suubub anoodvooluallika pingele (100 V) vastav staatiline tunnusjoon, sest anoodvoolu

puudumisel pole ka pingelangu koormustakistil ja anoodile mõjub siis vooluallika täispinge.

Kõik dünaamilise tunnusjoone punktid vastavad antud anoodvoolu juures anoodil mõjuvale pingele:

$$U_A = U - I_A R_A.$$



Joonis 18. 5. Dünaamiliste tunnusjoonte ehitamine trioodi anoodringi toitepinge U ja anoodi koormustakistuse R_A suuruste alusel.

Seepärast tulebki mingile anoodtakistusele R_A vastav dünaamiline tunnusjoon ehitada nendest suurustest lähtudes. Näiteks anoodvoolule $I_A = 6$ mA ja anoodtakistusele $R_A = 5$ kΩ vastab anoodpinge

$$U_A = 100 - 6 \cdot 5 = 70 \text{ V}$$

(punkt K) ning anoodvoolule $I_A = 9$ mA vastab anoodpinge $U_A = 100 - 9 \cdot 5 = 55$ V (punkt L) jne. Kõik niiviisi saadavad punktid moodustavad elektronlambi dünaamilise võrepinge-anoodvoolu tunnusjoone.

Näeme, et punkt K vastab võrepingele $U_{Go} = -4$ V ja punkt L vastab võrepingele $U_{Go} = -1$ V. Esimene võrepinge kutsub sel juhul esile anoodvoolu $I_{Ao} = 6$ mA ja teine: $I_{Ao} = 9$ mA.

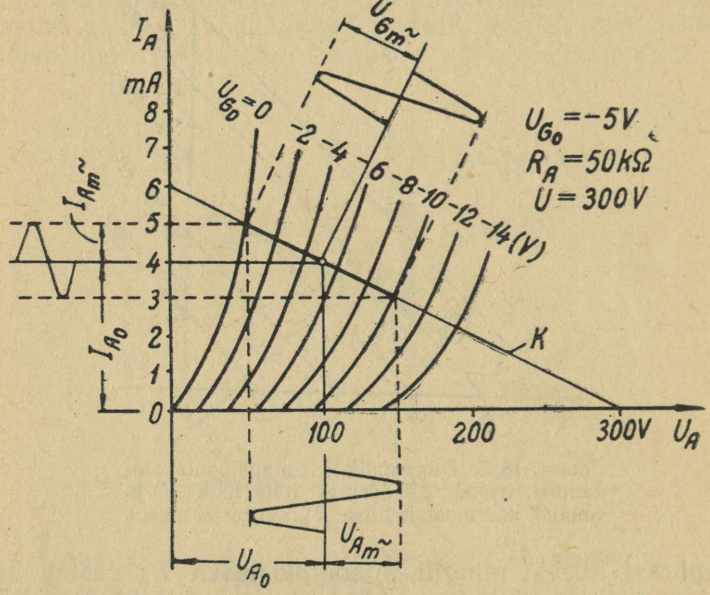
Mida suurem on anoodi koormustakistus, seda rõhtsamaks muutub dünaamiline tunnusjoon. Võrdsetele koormustakistustele, kuid erinevatele pingetele vastavad dünaamilised tunnusjooned on rööpsed.

Joonisel 18.5 on veel kujutatud dünaamilised tunnusjooned

juhul, kui $U = 100$ V ja $R_A = 15$ kΩ (joon. II) ning $U = 40$ V ja $R_A = 5$ kΩ (joon. III).

Tetroodidel ja pentoodidel erineb dünaamiline tunnusjoon staatilisest üsna vähe, sest nende lambitüüpide erinevatele anoodpingetele vastavad staatilised tunnusjooned asuvad väga lähestikku.

Anoodpinge-anoodvoolu tunnusjooned on praktiliseks kasutamiseks kohasemad, sest nad ei sõltu anoodkoormusest. Nendele saab lisada koormustakistusele vastava joone, mis aktiivtakisti



Joonis 18. 6. Koormusjoone K ehitamine ning selle kasutamine pingete ja voolude määramiseks võimendusastme vooluringides.

puhul on sirge. Seda joont nimetatakse elektronlambi *koormusjooneks* (joonis 18. 6). Koormusjoon K algab rõhttelje punktist, mis vastab anoodringi toitepingele ja on seda horisontaalsem, mida suurem on koormustakistus. Püsttelje ja koormusjoone lõikepunkti määramiseks tuleb anoodvooluallika pinge jagada kasutatava koormustakistusega (antud juhul 300 V : 50 kΩ = 6 mA).

Elektronlambi koormusjoonelt saab leida võimendusastme väljandpinge (anoodvahelduvpinge) amplituudi U_{Am}~, anoodvoolu vahelduvkomponendi amplituudi I_{Am}~, anoodil mõjuva pinge alaliskomponendi U_{Ao} ning anoodvoolu alaliskomponendi I_{Ao} väärtused, mis vastavad talitluspunkti asendit määravale võre-eelpingele U_{Go}, anoodi koormustakistusele R_A ning anoodvooluallika pingele U.

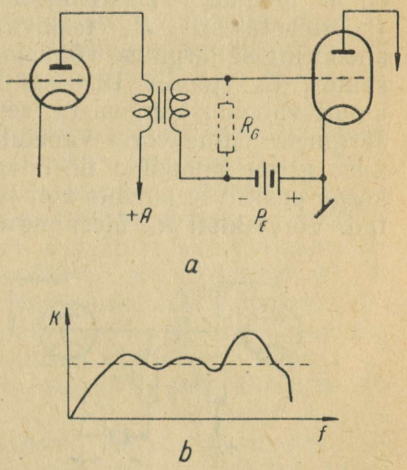
Dünaamilistelt tunnusjoontelt määratakse ka elektronlambi *dünaamilised parameetrid.* Dünaamiline tõus $S_{dün}$ ja astme võimendus K on alati väiksemad vastavatest staatilistest suurustest ning sõltuvad anoodringi koormustakistuse suurusest.

Kui võimenduslambi talitluspunkt viiakse eelpingestamise teel võrepinge-anoodvoolu tunnusjoone negatiivsete võrepingete alasse ulatuva sirge osa keskele ja võrele antava vahelduvpinge amplituudid ei «ulatu» tunnusjoone kõverusteni, siis töötab lamp *A-klassi režiimis.* Seda režiimi iseloomustab väga väikeste ebalineaarmoonutuste tekkimine juhul, kui võre vahelduvpinge jääb tunnusjoone sirgosa piiridesse. Helisagedusvõimendaja pingevõimendusastmed töötavad ikka A-klassi režiimis.

§ 4. HELISAGEDUSVÕIMENDAJA ASTMETE SIDESTAMINE

Helisagedusvõimendaja astmete sidestamiseks, s. o. võimendatava helisageduspinge ülekandmiseks ühest astmest teise, on mitu meetodit.

Transformaatorsidestuse puhul kantakse helipinge eelmise astme anoodringist järgmise astme võreringi madalsagedustrafo abil. Niisuguses skeemis on sidestustrafo primaarmähis lülitatud koormusena anoodringi ja sekundaarmähis järgmise lambi võreringi (joonis 18.7-*a*). Anoodvoolu vahelduvkomponent indutseerib trafo sekundaarmähises elektromotoorse jõu, mis ongi järgnevat astet tüürivaks pingeks.



Joonis 18.7. Helisagedusvõimendaja trafosidestuses astmed (*a*) ning vastav sageduskarakteristik (*b*).

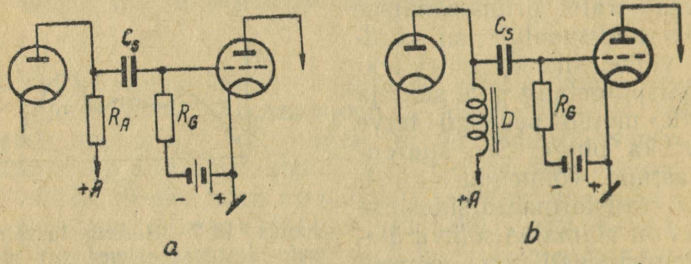
Kuna trafo primaarmähise takistus alalisvoolule on võrdlemisi väike, siis ka sellel tekkiv alalispingelang pole suur ja anoodile mõjub peaaegu terve vooluallika pinge. See suurendab astme võimendustegurit. Teiseks transformaatorsidestuse eeliseks on võimalus sobiva ülekandeteguri valikuga eelmise astme väljandpinge ülestransformeerimiseks, mis omakorda suurendab võimendust. Tavaline ülekandesuhe on 1 : 2 kuni 1 : 3.

Sidestustrafo põhjustab võimendajas märgatavaid lineaarmoonutusi, sest sagedusriba madalamaid ja kõrgemaid sagedusi kannab trafo üle halvemini. Trafosidestuses võimendaja tüüpilist

sageduskarakteristikut kujutab joonis 18.7-*b*. Lisaks sellele võib ülekandetrafo põhjustada ka ebalineaarmoonutusi (näiteks juhul, kui anoodvoolu alaliskomponent kutsub esile südamiku magnetilise küllastumise).

Piisava võimenduse saamiseks madalatel helisagedustel (alla 200 hertsi) peab ülekandetrafo primaarmähise induktiivtakistus olema lambi sisetakistusest suurem; seega on tulus kasutada suure keerdude arvuga mähiseid [1]. Kuid suure keerdude arvuga kaasub suur sisemahtuvus, mis on nagu lülitatud rööbiti mähisega. Rööbitise sisemahtuvuse tõttu langeb kõrgemate sageduste võimendus, sest need voolud läbivad trafo mähise asemel selle sisemahtuvuse. Mähise induktiivsus koos sisemahtuvusega võib ka moodustada madalsagedusliku võnkeringi, milles teatava sageduse juures ilmneb resonants. See avaldub sageduskarakteristiku tõusuna sellele sagedusele lähedases osas. Trafo resonantsi allasurumiseks võib lülitada paralleelselt sekundaarmähisega aktiivtakistuse (R_G joonisel 18.7). Kuigi see vähendab üldist võimendust, muutub sageduskarakteristik tunduvalt sirgemaks.

Takistisidestus (täpsemalt: takisti-kondensaator-sidestus) annab kvaliteetsete sidestuskondensaatorite korral palju ühtlasema võimenduse ülekantava sagedusriba ulatuses ega põhjusta ebalineaarmoonutusi. Praegusel ajal on see sidestusviis kõige enam levinud. Takistisidestuse puhul kantakse vahelduvpinge (koormustakistil R_A tekkiva pingelangu vahelduvkomponent) anoodringist järgmise võimendusastme võrele üle sidestuskondensaatori C_s (joonis 18.8-*a*). Läbi sidestuskondensaatori pääseb ainult vahelduvkomponent, sest alalisvool kondensaatorit ei läbi. Järgmise astme võret vahetult ilma sidestuskondensaatorita eelmise astme anoodiga ühendada ei või, sest siis omandaks võre kõrge positiivse potentsiaali ja teise astme lambi töö oleks halvatud. Võretakisti R_G ülesanne on anda võrele eelpinget ja juhtida



a *b*

Joonis 18.8. Takisti-kondensaator- (*a*) ja paispool-kondensaator-sidestuses (*b*) helisagedusvõimendaja astmed.

[1] Samal põhjusel kasutatakse transformaatorsidestust peaasjalikult triioodide puhul, sest nende sisetakistus on tunduvalt väiksem pentoodide sisetakistusest.

võrele langevaid elektrone katoodile. Võretakisti puudumisel koguneks elektrone võrele ja lõpuks muutuks selle elektroodi laeng niivõrd negatiivseks, et anoodvool lakkaks.

Anoodi koormustakistus võetakse trioodi puhul tavaliselt paar korda suurem lambi sisetakistusest. Sel puhul moodustab astme võimendus K umbes 75% lambi staatilisest võimendustegurist μ. Liiga väikese anoodtakistuse puhul langeb üldine võimendus, sest vahelduv pingelang sellel väheneb. Kuid see takistus ei tohi olla ka liiga suur, sest siis jääks lambi anoodile mõjuv pinge liiga madalaks ning väheneks astme võimendustegur. Sellel juhul halveneks ka kõrgemate sageduste võimendus, sest skeemi omamahtuvuse (ühendusjuhtmete ja detailide ning šassii vahelise mahtuvuse) ning elektronlampide sisemahtuvuste kaudu pääsevad nendele sagedustele vastavad helisagedusvoolud anoodtakistist mööda.

Sidestuskondensaator peab olema küllaldaselt suur selleks, et tema mahtuvustakistus osutuks ka ülekantava riba madalamatel sagedustel võrreldes R_G-ga küllalt väikeseks. Tavaliselt valitakse takistisidestus-lülituses kondensaatori mahtuvuseks 0,005 kuni 0,1 mikrofaradit ja võretakistiks 2 kuni 0,1 megaoomi. Suuremale sidestuskondensaatorile peab vastama väiksem võretakisti ja vastupidi.

Takistisidestust kasutatakse väikesevõimsuseliste trioodide ja pentoodide juures. Kuigi astme tegelik võimendustegur jääb takistisidestus-lülituse puhul märgatavalt väiksemaks lambi staatilisest võimendustegurist, osutub see pentoodide puhul siiski küllaldaseks: üks võimendusaste võib anda praktiliselt kuni mõnesajakordse võimenduse.

Paispoolsidestus sarnaneb takisti-kondensaator-sidestusega, milles anoodkoormuseks kasutatakse mitte aktiivtakistust, vaid suurt induktiivsust omavat madalsageduspaispooli (joonis 18. 8-*b*). See võrdlemisi harva kasutatav sidestuslülitus töötab analoogiliselt takistisidestusega. Kuna paispooli D mähise aktiivtakistus on kaunis väike, siis temal nimetamisväärset alalispingelangu ei teki ja anoodil mõjub kõrgem alalispinge kui takistisidestuse korral. Paispoolsidestuses madalsagedusvõimendaja sageduskarakteristik sarnaneb transformaatorsidestuses võimendaja omaga.

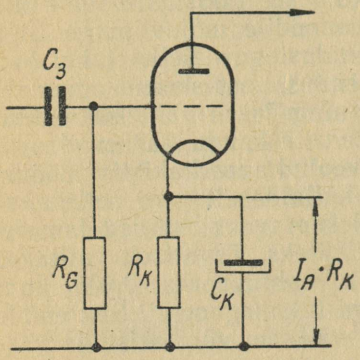
Helisagedusvõimendaja kvaliteedi määrajaks pole üksikult astmelt saadav pingevõimendus, vaid võimalikult väikesed moonutused. Seepärast kasutataksegi peamiselt takisti-kondensaator-sidestust, mille suhteliselt madalamat võimendustegurit on kerge suurendada lisa-võimendusastme abil.

§ 5. ELEKTRONLAMBI EELPINGESTAMINE; VÕIMSUSVÕIMENDAJA TALITLUSPUNKTI VALIK

Elektronlambi talitlustingimused määrab võre-eelpinge. Lihtsaim viis lambi eelpingestamiseks on sobiva pingega keemilise vooluallika lülitamine võreringi (joonised 18. 2, 18. 7 ja 18. 8).

Eelpinge suurus on niisugusel juhul püsiv ega sõltu lambi talitlusrežiimist. Eraldi pingeallika vältimiseks on mitmeid lülitusi, kus rakendatakse eelpingeks mõnel takistil anoodvoolust põhjustatud pingelangu.

Automaatseks eelpingestamiseks lülitatakse lambi katoodi ja anoodvooluallika miinuspooluse vahele takisti R_k (joonis 18. 9). Katood muutub siin pingelangu $I_A R_K$ võrra positiivsemaks anoodvoolu allika miinuspooluse potentsiaalist. Kuna võrering (sidestustrafo sekundaarmähis või võretakisti) on ühendatud anoodvooluallika miinusega, siis osutubki võre katoodi suhtes sama pingelangu võrra negatiivsemaks, s. o. eelpingestatuks. Takistis R_G enam täiendavat pingelangu ei teki, sest normaalolukorras puudub temas alalisvool.



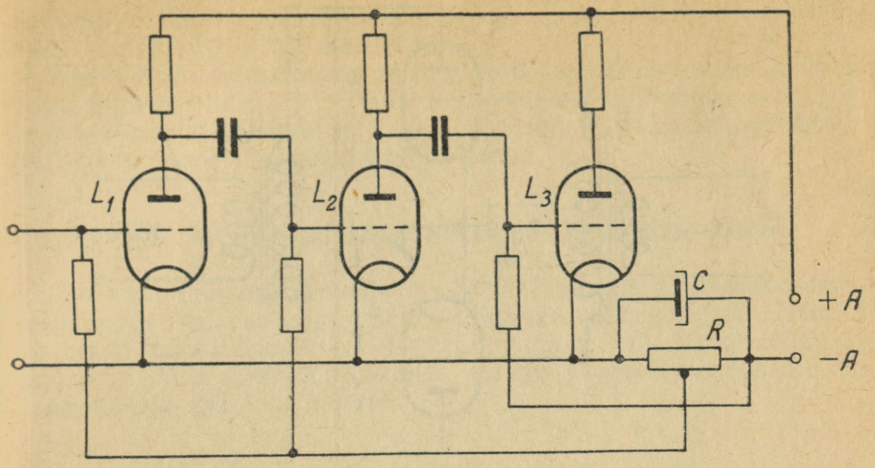
Joonis 18. 9. Võre-eelpinge saamine pingelanguna katoodtakistil R_k.

Eelpingestamiseks «üldmiinusest» lülitatakse raadioseadme anoodringide ühisesse negatiivsesse toitejuhtmesse takisti R (joonis 18. 10), millel tekib pingelang kõigi võimendusastmete anoodvoolude mõjul. Sageli valmistatakse see takisti mitme väljavõttega, et mõnele lambile (näiteks L_3) anda suuremat ja mõnele (L_1 ja L_2) väiksemat eelpinget.

Katoodtakistil või üldmiinusesse lülitatud eelpingestamistakistil tekkiv pingelang on anoodvoolu muutumise taktis pulseeriv. Mittepulseeriva eelpinge saamiseks lülitatakse nende takistitega rööbiti suuremahtuvuselised madala talitluspingega elektrolüütkondensaatorid (C või C_K).

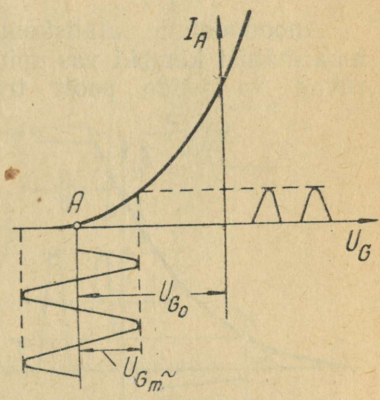
Pingevõimendusastmed töötavad peaaegu alati A-klassi režiimis, võimsusvõimendaja aga sageli ka B- või vahepealses AB-klassi režiimis.

B-klassi režiimis töötava võimenduslambi talitluspunkt viiakse suurema võre-eelpinge abil tunnusjoone alguspunkti. Siis anoodvoolu alaliskomponent praktiliselt puudub ning anoodvool tekib ainult tüürpinge positiivsete poolperioodide ajal (joonis 18. 11). Pideva anoodvoolu puudumise tõttu on niisuguses režiimis töötav võimendusaste väga ökonoomne, kuid ühe lambi kasutamisel tekivad suured ebalineaarmoonutused, sest lambis võimendatakse tegelikult vaid sisendpinge positiivseid poolperioode. Sellel põhjusel on otstarbekas B-klassi režiimi puhul rakendada tööle kaks lampi *vastastaktlülituses* (joonis 18. 12). Selles lülituses töötavad lambid vaheldumisi — üks ühel ja teine teisel tüürpinge poolperioodil. Sisendtrafo (Tr_1) sekundaarmähise keskpunkti suhtes



Joonis 18. 10. Võre-eelpingete saamine võimendaja anoodringide negatiivsesse toitejuhtmesse lülitatud takistil R tekkiva pingelanguga.

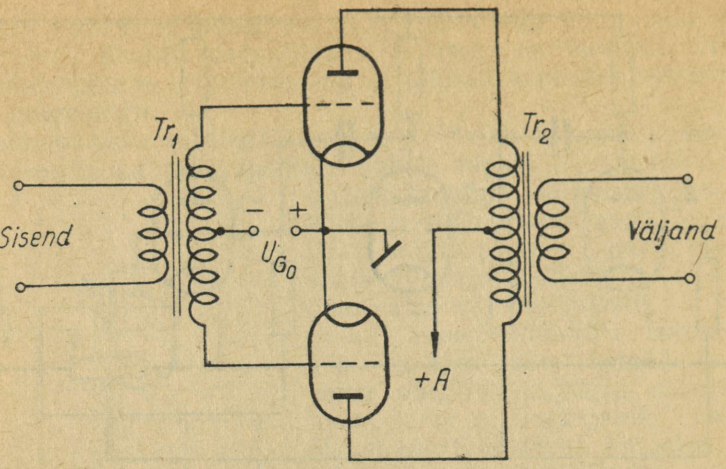
on mähise otste pinged alati vastasfaasis.[1] Kui primaarmähisele mõjub helisageduspinge, siis ka kummagi lambi tüürpinged on vastasfaasis. Tegelikult töötab mingil momendil see lamp, mille võrel mõjub parajasti positiivne poolperiood. Töötava lambi anoodvool läbib väljandtrafo (Tr_2) primaarmähise ühe poole. Kummagi lambi voolud on mähises kui tervikus vastassuunalised ning need «alaldatud» vastassuunalised pulseerivad voolud annavad teineteist täiendades väljandtrafo sekundaarmähises moonutamata helisageduspinge.



Joonis 18. 11. B-klassi režiimis töötava võimenduslambi talitluspunkt asub tunnusjoone alumise kõveruse alguses.

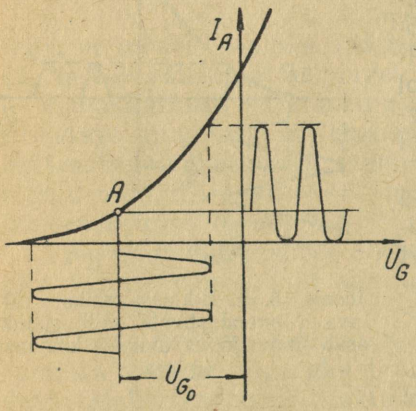
Vastastaktlülitust võib kasutada ka A-klassi režiimis. Sellel juhul on mõlemad lambid tavalised võimendajad, mis töötavad ühisele koormusele.

[1] Vastasfaasis pingete vahel on 180-kraadine faasinihe. Kui üks nendest pingetest näiteks mingil hetkel kasvab positiivses suunas, siis teine kasvab samavõrra negatiivses suunas. Vastasfaasis pingeid on kõige lihtsam saada trafo keskväljavõttega varustatud sekundaarmähise otstelt. Mingil momendil on selle mähise üks ots positiivne ja teine ots negatiivne, kuid nende vahel asuv keskväljavõte omab vahepealset potentsiaali. Kui nüüd võtta just selle punkti potentsiaal aluseks mähise otste pingete märgi määramisel, siis saamegi nendelt keskväljavõtte suhtes vastasfaasis muutuvad pinged.



Joonis 18. 12. Vastastaktlülituses helisagedusvõimendaja aste.

Anoodvoolude alaliskomponendid läbivad väljandtrafo primaarmähist kumbki vastupidises suunas ja seepärast neutraliseeruvad ka nende poolt trafos tekitatavad alalis-magnetvood. A-klassi vastastaktlülituse väljandtrafo magnetilist küllastumist pole niisiis karta ka suhteliselt väikese raudsüdamiku ristlõikepinna puhul. Seevastu anoodvoolude vahelduvkomponentide mõjud liituvad, andes sekundaarmähises suurema võimsuse kui üksiku lambi puhul. (Kummagi lambi anood-vahelduvvoolud läbivad primaarmähist küll vastassuunas, kuid kuna lambid töötavad pooleperioodise faasinihkega, siis nende vahelduvkomponentide mõjud liituvad.)



Joonis 18. 13. AB-klassi režiimis töötava võimenduslambi talitluspunkt asub tunnusjoone alumisel kõverusel.

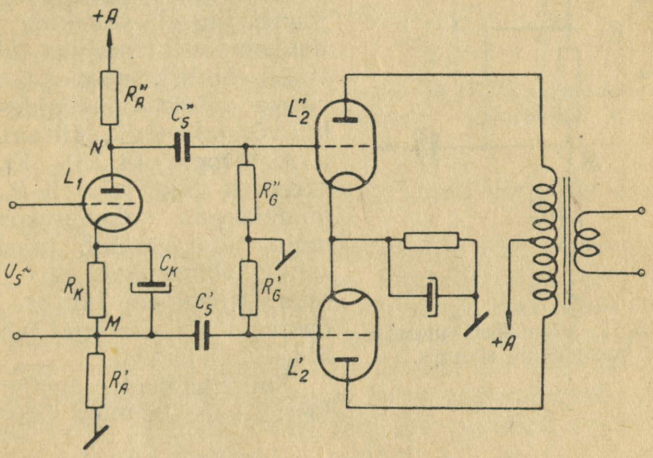
Peale A- ja B-klassi režiimi kasutatakse helisagedusvõimendajate vastastakt-lõppastmetes veel vahepealseid, *AB-klassi režiime*, mispuhul lambid on eelpingestatud vaid sellise määrani, et tüürpinge puudumisel ei langeks anoodvool täiesti nullini. Siin paigutatakse talitluspunkt tunnusjoone alumisele kõverusele (joonis 18. 13). AB-klassi režiimis tekitab tüürpinge positiivne poolperiood tunduvalt suurema anoodvoolu amplituudi kui negatiivne pool-

periood — ilmneb ebalineaarmoonutus, kuid seegi on kompenseeritav vastastaktlülituse kasutamisel.

Vastastakt-lõppastmesse sobivad kõik harilikud võimsuslambid, nagu jugatetroodid, lõpptrioodid ja -pentoodid. Spetsiaalselt selleks otstarbeks toodetakse kahest võrdsete parameetritega trioodist või pentoodist koosnevaid liitlampe.

§ 6. MITMEASTMELINE HELISAGEDUSVÕIMENDAJA

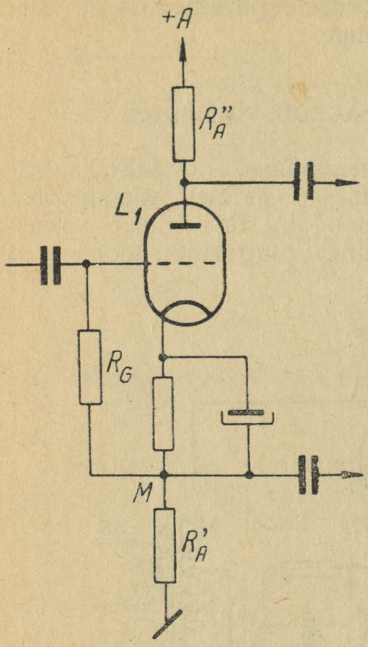
Nõrkade helisagedusvoolude võimendamiseks kasutatakse mitmeastmelist võimendajat. Selle esimesed astmed moodustavad enamasti takistisidestuses pingevõimendaja, mis tüürib võimsat lõppastet. Vastastakt-lõppastmele eelnev pingevõimendusaste on *faasipööraja* ehk *faasiinverter*.



Joonis 18. 14. Poolitatud koormustakistiga faasipööraja lülitusskeem.

Vaatleme lähemalt üht faasipööraja lülitusskeemi (joonis 18. 14), mille ülesanne on järgnevale vastastaktastmele L_2'-L_2'' anda kaht võrdset vastupidises faasis tüürpinget. Käsitletaval juhul jagatakse faasipööraja-astme L_1 anoodtakisti kaheks võrdseks osaks, millest üks asub katoodringis ja teine oma «õigel kohal» — anoodringis. Sidestuskondensaatorite C_s' ja C_s'' kaudu juhitakse faasipööraja mõlemad väljandpinged lõppastme lampide tüürvõredele. Need vahelduvpinged on anoodvooluallika miinuspooluse suhtes vastasfaasis. Näiteks faasipööraja tüürvõrele mõjuva helipinge $U_s\sim$ positiivsel poolperioodil kasvab anoodvool ja pingelangud kummalgi koormustakistil (R_A' ning R_A'') suurenevad. Seetõttu punkti M potentsiaal muutub positiivsemaks

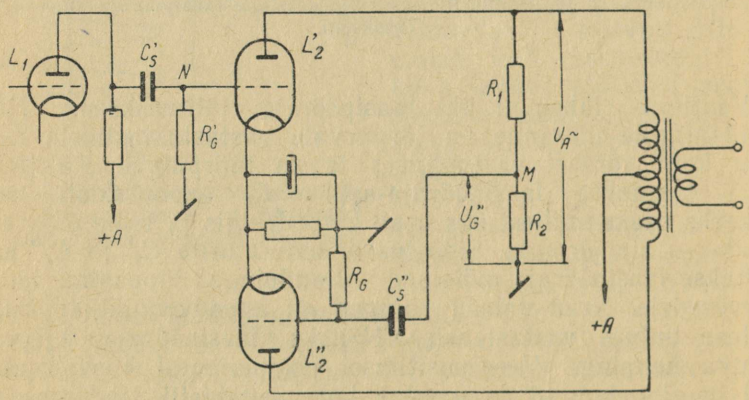
ja punkti N potentsiaal negatiivsemaks. Helipinge negatiivsel poolperioodil kahaneb faasipööraja anoodvool ja pingelangud takistitel vähenevad. Punkt M muutub siis negatiivsemaks ja punkt N positiivsemaks; tähendab, nendes punktides ilmuvad vahelduvpinged on omavahel vastasfaasis.



Joonis 18. 15. Võretakisti ühendamine faasipööraja skeemis.

Tüürpinge antakse selle faasipöörajalülituse võrele võimaluse korral mitte üldmiinuse, vaid katoodi suhtes. Vastasel korral mõjuks võreringis kaasa ka takistil R_A' tekkiv pulseeriv alalispingelang, mis võib häirida lambi tööd. Selle pingelangu alaliskomponent viiks talitluspunkti tunnusjoonel liigselt vasakule ja vahelduvkomponent mõjuks tüürpingele vastu. Alaliskomponendi sattumist võrele väldib takistisidestuse puhul võretakisti R_G lülitamine punkti M (joonis 18. 15). Kuid seegi skeem ei väldi takistil R_A' tekkiva pingelangu vahelduvkomponendi mõju, mis avaldub faasipöörajaastme võimendusteguri langemisena. Niisuguse lülituse võimendustegur võib parimal juhul küündida kuni kaheni.

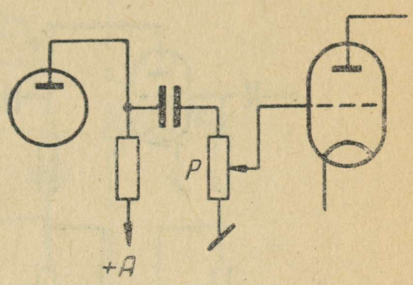
Suurema võimendusteguri kindlustab kahe lambiga faasipööraja-



Joonis 18. 16. Tüürpinge faasi pööramine vastastaktlülituses eneses.

lülitus, mida kujutab joonis 18. 16. Eelastet L_1 kasutatakse siin hariliku pingevõimendajana, mis tüürib üle sidestuskondensaatori C_s' ainult üht vastastaktastme poolt L_2'. Tüüritava lambi anoodringist võetakse sobiva pingejagaja R_1-R_2 ja sidestuskondensaatori (C_s'') abil tüürpinge vastastaktastme teisele poolele (L_2'').

Punktis M on vahelduvpinge vastasfaasis punktis N mõjuva pingega. Eeldame, et vaadeldaval hetkel mõjub ühe lambi võrele (punktis N) tüürpinge positiivne poolperiood. Sellega suureneb anoodvool ja pingelang anoodkoormusel ning punkt M muutub negatiivsemaks. Pingejagaja R_1-R_2 annab lambile L_2'' täpselt niisama suure amplituudiga tüürpinge kui mõjub lambile L_2'. Pingejagajalülituse väljandpinge $U_G''\sim$ peab niisiis olema lambi L_2' võimendusteguri-kordselt väiksem pingest $U_A'\sim$. Takistid R_1 ja R_2 valitakse suurusjärgus 0,05 kuni 1 megaoomi ning suhe $R_2 : (R_1 + R_2)$ peab võrduma astme võimendusteguriga.



Joonis 18. 17. Liugkontaktiga potentsiomeeter võimenduse reguleerijana.

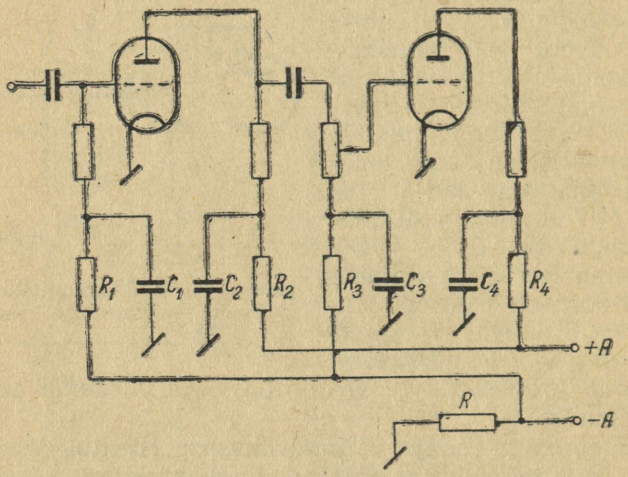
Helisagedusvõimendaja väljandvõimsuse (helitugevuse) soovikohaseks muutmiseks kasutatakse liugkontaktiga kõrgeoomilist potentsiomeetrit P, mis lülitatakse võreringi ühes esimeses pingevõimendusastmes (joonis 18. 17). Olenevalt liikuva kontakti asendist kandub võrele kas suurem või väiksem osa võretakistina töötavale potentsiomeetrile mõjuvast helisageduspingest. Helitugevust reguleeriva potentsiomeetri takistus valitakse enamasti suurusjärgus 0,1 kuni 1 megaoomi.

Ebakohane oleks helitugevust reguleerida võimendusseadme viimastes astmetes, sest suurte sisendpingete korral ilmneks siis kindlasti esimeste astmete ületüürimine (liiga suur võrevahelduvpinge põhjustab võrevoolude tekke ja suurte ebalineaarmoonutuste ilmumise).

Mitmeastmelise helisagedusvõimendaja esimeste astmete anoodringid peavad olema varustatud üksikult väikeste R-C-filtritega — *lahtisidestusfiltritega*, mis väldiksid astmete soovimatut omavahelist sidestumist anoodvooluallika kaudu. Niisugune parasiitsidestus tekib anoodvooluallika sisetakistuse tõttu ja võib halvata võimendaja tööd. Lõppastme poolt tarbitav anoodvool kutsub toiteseadme sisetakistusel esile muutliku pingelangu, mis lahtisidestusfiltrite puudumisel hakkab mõjutama ka eelnevate võimendusastmete anoodvoolu. Võimendaja võib parasiitsidestuse tagajärjel muutuda helisagedusgeneraatoriks ja väljandis anda

tugevat vahelduvpinget, mis valjuhääldajas avaldub vilena, undamisena või sisepõlemismootori mürinat meenutava helina.

Anoodringide parasiitse sidestumise vältimiseks kasutatavad lahtisidestusfiltrid (joonis 18. 18) koosnevad takistist R_2 ja R_4 (suurusjärgus 5 kuni 50 kilo-oomi) ning kondensaatorist C_2 ja C_4 (suurusjärgus 0,1 kuni 10 mikrofaradit). Tuleb silmas pidada, et selles filtris tekib ka alalispingelang, mistõttu vastavalt väheneb võimendusastme anoodpinge.



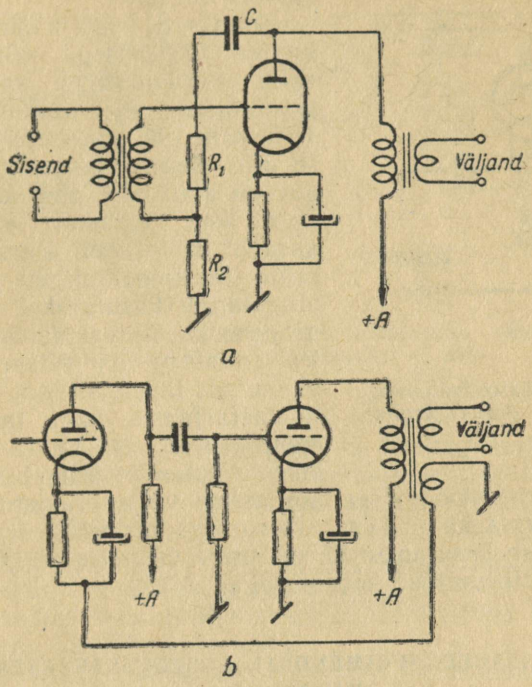
Joonis 18. 18. Lahtisidestusfiltrid võimendusastmete anoodide ja võrede vooluringides.

Võimendusastmete eelpingestamisel üldmiinusesse lülitatud takisti R abil võib samuti tekkida parasiitsidestumine, mille vältimiseks tuleb kasutada eraldi igas võreringis takistus-mahtuvuslikku lahtisidestusfiltrit (joonisel 18. 18 R_1-C_1 ja R_3-C_3). Takisti suurus valitakse selles 0,05 kuni 0,5 megaoomi ja kondensaatori mahtuvus 0,2 kuni 2 mikrofaradit. Automaatsel eelpingestamisel katoodtakistite abil ei ole võreringides lahtisidestusfiltrid tarvilikud, sest eelpinged tekitatakse igas astmes iseseisvalt, teistest astmetest sõltumatult.

§ 7. NEGATIIVNE TAGASISIDESTUS HELISAGEDUSVÕIMENDAJAS

Helisagedusvõimendajas tekkivaid lineaar- ja ebalineaarmoonutusi saab tunduvalt vähendada negatiivse tagasisidestuse ehk vastusidestuse kasutamisega. Tagasisidestuse all mõistetakse võimendaja väljandpingest ühe osa tagasijuhtimist tema sisendisse. Tagasisidestatud

võimendaja sisendis mõjub niisiis korraga kaks vahelduvpinget — tüürpinge ja tagasisidestuspinge. Kui need vahelduvpinged langevad faasis ühte, siis suureneb võimendaja võimendustegur. Sellise tagasisidestuse — *positiivse tagasiside* ehk *koosside* puhul suurenevad moonutused ja liiga suure tagasisidestuspinge korral muutub võimendaja generaatoriks, hakates ise tekitama vahelduvvoolu.



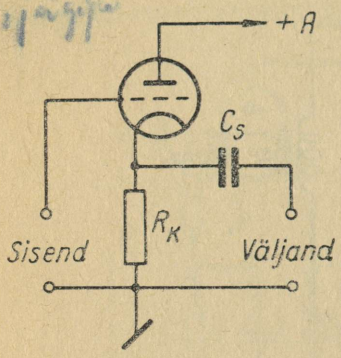
Joonis 18. 19. Helisagedusvõimendaja lõppastme vastusidestamine.

Kui juhtida võimendaja sisendisse tagasisidestuspinge, mis on tüürivpingega vastasfaasis, siis väheneb üldine võimendustegur. Sellist tagasisidestust nimetatakse *negatiivseks tagasisideks* ehk *vastusideks*. Koos võimenduse vähenemisega langevad tunduvalt ka lineaar- ja ebalineaarmoonutused ning võimendaja talitlusrežiim muutub stabiilsemaks. Endise võimendusteguri taastamiseks pärast vastusidestamist on mõnikord tarvis lisada võimendajale veel üks aste.

Peamised moonutused tekivad helisagedusvõimendaja lõppastmes. Seepärast on otstarbekas hõlmata vastusidestusega kui mitte tervet võimendajat, siis vähemalt tema lõppastet. Lülituses, mis on toodud joonisel 18. 19-*a*, antakse lõpplambi anoodringist saadav vastusidestuspinge kondensaatori *C* ja pingejagaja R_1-R_2

kaudu sama astme võreringi. Vastusidestuse suurust saab reguleerida pingejagaja takistite suuruste suhtega. Kondensaator C valitakse küllaldaselt suur (0,1 kuni 0,5 mikrofaradit) selleks, et tema mahtuvuslik takistus oleks ka madalamatel helisagedustel takistusega R_1 võrreldes väike.

Levinud on ka vastusidestamine väljandtrafo lisamähise abil (joonis 18. 19-*b*).



Joonis 18. 20. Katoodväljandiga võimendusaste (katoodjärgija).

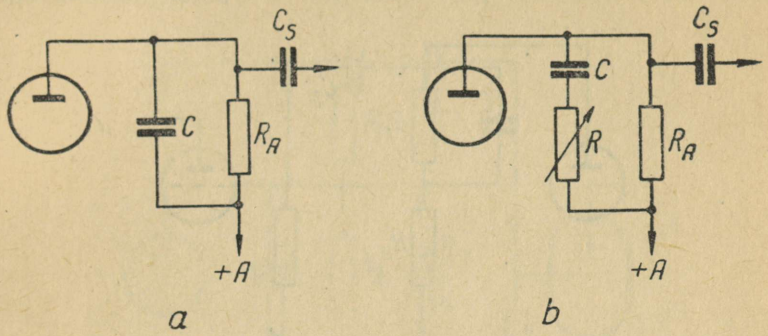
Mõnikord leiab kasutamist väga tugeva vastusidega võimendusaste, mille väljandpinge saadakse katoodtakistilt R_K, nn. *katoodväljandiga aste* ehk *katoodjärgija* (joonis 18. 20). Sellise astme võimendustegur on alati alla ühe; katoodväljandiga aste tegelikult alandab üleantavat helipinget. Paralleelkondensaatorita katoodtakistil R_K tekkivat pingelangu kasutatakse nii väljandpingena kui ka vastusidestuspingena. Väljandpinge on niisugusel lülitusel samas faasis sisendpingega (mitte vastasfaasis, nagu tavalistel võimendusastmetel). Vastandina harilikele võimenduslülitustele elektronlampidega on katoodväljandiga astme väljandtakistus väike (ja nõuab seepärast ka väikese takistusega tarbijat). Katoodväljandiga aste leiab kasutamist kõrge sisetakistusega pingeallika sobitamisel madalaoomilise koormusega.

§ 8. HELISAGEDUSVÕIMENDAJA SAGEDUSKARAKTERISTIKU MUUTMINE

Helisagedusvõimendaja omaduste soovikohaseks valikuks vastavalt ülekantava programmi iseloomule kasutatakse tämbri reguleerimise lülitusi, mis võimaldavad ahendada ülekantavat sagedusriba või ka tõsta võimendust eriti madalatel või eriti kõrgetel helisagedustel, s. o. tekitada mõnes sagedusvahemikus tahtlikult lineaarmoonutust. Möödapääsematult vajalik on see näiteks magnetofoni- ja grammofonivõimendajates.

Võimendaja sageduskarakteristikut muudetakse peaasjalikult mõnede teiste elektroakustiliste seadiste, nagu mikrofonide, grammofoni elektriliste helipeade ja valjuhääldajate poolt ülekantava sagedusriba ebaühtluse osaliseks või täielikuks kompenseerimiseks. Näiteks väheneb valjuhääldaja poolt tekitatava heli valjus madalamate bassitoonide juures. Elektroakustilise heliülekande kvaliteedi lähendamiseks loomulikule võib kasutada võimendajat, kus valjuhääldaja puuduste kompenseerimiseks on madalate heli-

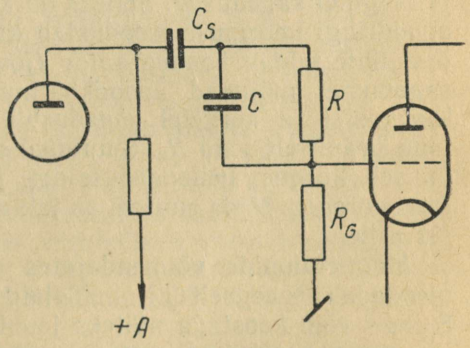
sageduste võimendust suurendatud. Mõnel teisel juhul, näiteks magnetofonivõimendajates, on aga vajalik tõsta võimendust ka kõrgetel helisagedustel. Seepärast tulebki lähemalt peatuda helisagedusvõimendaja sageduskarakteristiku iseloomu muutvatel erilülitustel.



Joonis 18.21. Kõrgemate helisageduste võimenduse vähendamine anoodtakistit sildava kondensaatori *C* abil.

Võimenduse vähendamine kõrgematel helisagedustel on lihtsaimal juhul teostatav anood- või võretakistile rööbitise kondensaatoriga *C* (joonis 18.21-*a*). Pingelang anoodtakistil väheneb siis olenevalt sagedusest ja vastavalt kahaneb ka kõrgemate sageduste üldine võimendamine. Vajaliku ulatusega sagedusriba saamiseks ning selle soovikohaseks muutmiseks tuleb kasutada mitut ümberlülitatavat erineva mahtuvusega kondensaatorit (suurustega umbes 2000 kuni 20 000 pikofaradit).

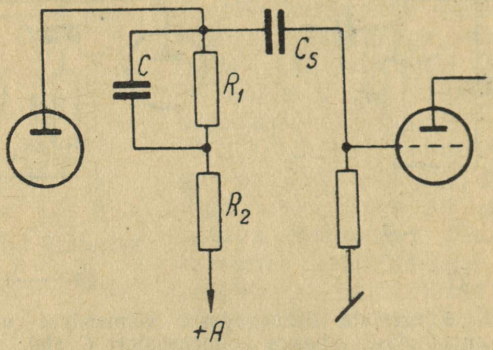
Kõrgemate helide nõrgendamiseks on lihtsamates madalsagedusvõimendajates kasutusel järjestikuse kondensaatori *C* (5000 kuni 30 000 pikofaradit) ja reguleeritava takisti *R* (50 kilo-oomi) lülitus võimendaja ühe astme anoodringis (joonis 18.21-*b*). Mida väiksemaks muudetakse takisti *R*, seda rohkem mõjub kondensaatori mahtuvuslik takistus ja seda madalamal sagedusel algab kõrgemate helisageduste võimenduse vähenemine.



Joonis 18.22. Kõrgemate helisageduste võimenduse suurendamine sagedusest sõltuva ülekandesuhtega potentsiomeeterlülituse *C-R-R*$_G$ abil võreringis.

Kõrgemate helisageduste suhteliseks esiletõstmiseks vähendatakse üldist võimen-

dust madalatel ja keskmistel sagedustel. Selleks sobib sagedusest sõltuva ülekandesuhtega potentsiomeeterlülitus astmetevahelises sidestuses (joonis 18. 22). Lisatakisti R koos võretakistiga R_G moodustavad pingejagaja, mille ülemine osa on sillatud kondensaatoriga C. Madalatel sagedustel kondensaator mõju ei avalda, kuid alates sagedusest, mille juures tema reaktiivtakistus saab umbes



Joonis 18. 23. Madalate helisageduste võimenduse suurendamine sagedusest sõltuva anoodkoormuse R_1-R_2-C kasutamisega.

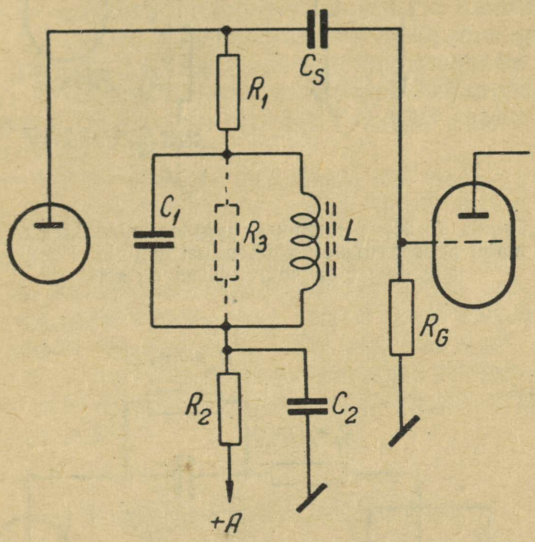
võrdseks takistusega R, väheneb pingejagaja ülemise osa impedants ning teise astme võrele langeb suurem osa esimeselt astmelt saadavast helipingest. Tavaliselt valitakse lisatakisti kaks kuni kolm korda suurem võretakistist.

Võimendusteguri suurendamiseks madalatel helisagedustel (basside esiletoomiseks) tuleb vähendada võimendust keskmistel ja kõrgetel sagedustel. Selleks on kohane lülitus, milles ühe astme anoodringi koormuse moodustab kaks järjestikust takistit ja nendest ühte sildav kondensaator (joonis 18. 23). Madalamatel helisagedustel mõjuvad anoodkoormusena mõlemad takistid, kuid keskmistel ja kõrgetel sagedustel mõjub kondensaatorist tingituna peamiselt vaid R_2. Suuremal anoodkoormusel areneb niiviisi üldiselt kõrgem helisageduspinge ja madalamate helide võimendus suureneb. Mida suurem on takisti R_1, seda rohkem tulevad bassid esile.

Magnetofonide võimendajates on sageli tarvis rohkem võimendada üheaegselt nii madalaid kui ka kõrgeid helisagedusi. Selleks võib koostada näiteks joonisel 18. 24 toodud lülituse, milles esimese võimendusastme sagedusest sõltuva anoodkoormuse moodustab võrdlemisi keerukas süsteem aktiivtakistusest R_1, võnkeringist L-C_1, aktiivtakistusest R_2 ja seda sildavast kondensaatorist C_2. Võnkeringi resonants valitakse kõrgemate helisageduste

piirkonda ning madalatel ja keskmistel sagedustel on tema takistus tühine.

Selles skeemis mõjuvad madalate helisageduste puhul anoodkoormusena vaid takistid R_1 ja R_2. Keskmistel helisagedustel väheneb sildava kondensaatori C_2 tõttu takistuse R_2 mõju ja anoodkoormuse moodustab siis tegelikult vaid takistus R_1. Kõrgetel



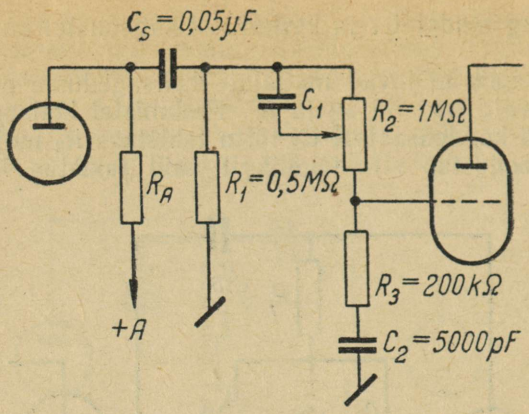
Joonis 18. 24. Madalate ja kõrgete helisageduste võimenduse suurendamine sagedusest sõltuva anoodkoormuse R_1-C_1-R_3-L-R_2-C_2 kasutamisega.

sagedustel on koormuseks R_1 ja võnkeringi resonantstakistus. Selleks et viimane ei avalduks liiga järsult, s. o. liiga kitsas sagedusalas, võib võnkeringi hüvetegurit vähendada paralleelse lisatakisti R_3 abil, mis muudab resonantsikõvera lamedamaks.

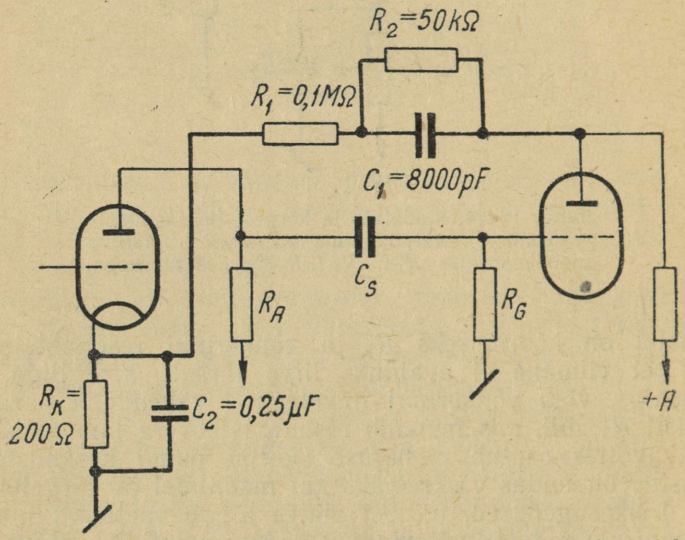
Kokkuvõttes osutub niisuguse skeemi puhul keskmiste helisageduste võimendus väiksemaks kui madalatel ja kõrgetel sagedustel. Lõikesagedused, millest alates algab vastavalt madalate või kõrgete sageduste võimenduse tõus, samuti ka nende tõusu ulatus, on määratud kõigi lülituselementide suurustega. Orienteerimiseks toome siinkohal detailide elektrilised suurused ühelt magnetofonivõimendajalt [1], kus $R_1 = 20$ kilo-oomi, $R_2 = 510$ kilo-oomi, $L = 0{,}08$ henrit, $C_1 = 7500$ pikofaradit, $C_s = 6200$ pikofaradit ja $R_G = 680$ kilo-oomi.

Vastandina viimatikirjeldatule, kus võimendaja sageduskarakteristiku kuju on fikseeritud, võimaldavad täiuslikumad tämbri re-

[1] Ajakirjast «Радио» 1955 nr. 2.



Joonis 18. 25. Võimenduse reguleerimine kõrgematel helisagedustel; võimendust madalatel helisagedustel on suurendatud C_2 abil.



Joonis. 18. 26. Võimenduse suurendamine madalatel ja kõrgetel helisagedustel sagedusest sõltuva vastusidestuse abil, mis vähendab võimendust keskmistel helisagedustel. Vastusidestuse vooluring on joonestatud jämejoonega.

guleerimise seadised soovikohaselt muuta eraldi madalate ja kõrgete helide võimendust. Real juhtumitel on skeemi lihtsustamiseks siiski madalad helisagedused püsivalt «tõstetud» ning toimub ainult kõrgete reguleerimine. Üht niisugust skeemi kujutab joonis 18. 25. Pingejagajalülituse R_3 ning R_2 koosmõjul kondensaa-

toriga C_2 on madalamate helisagedusvõnkumiste pääs teise lambi tüürvõrele eelistatud, sest siis on mahtuvustakistus suur. Kõrgeid helisagedusi saab reguleerida potentsiomeetri R_2 liikuva kontakti asendiga, mis lülitab paralleelselt kas osale või tervele takistile R_2 väikese mahtuvusega kondensaatori C_1. Viimane hõlbustab kõrgemate sagedustega helisageduspingete pääsu võrele.

Helisagedusvõimendaja sageduskarakteristikut saab muuta ka vastusidestuse vooluringis sagedusest sõltuvate omadustega lülituselementide (enamasti kondensaatorite) kasutamisega. Kui näiteks skeemis joonisel 18. 19-*a* valitakse kondensaator C niivõrd väike, et tema mahtuvustakistus madalatel helisagedustel oleks võrreldes takistusega R_1 suur, siis tekib nendel sagedustel vastusidestuse nõrgenemine ja võimenduse tõus.

Võimenduse tõstmiseks nii madalatel kui ka kõrgetel helisagedustel kasutatakse vastusidestust, mis mõjub ainult keskmistel sagedustel (joonis 18. 26). Siin tekib vastuside lõpplambi anoodilt üle C_1, R_1 ja R_2 eelastme katoodile. Ühest küljest määrab takistuste R_2 ja R_1 vahekord vastuside tugevuse (sageduskarakteristiku otste suhtelise tõusu) ning teiselt poolt sõltub mahtuvustest C_1 ja C_2 sageduste vahemik, mille ulatuses vastuside mõjub. Kondensaatori C_1 suurusest oleneb vastuside nõrgenemine (võimenduse kasv) madalatel helisagedustel ja kondensaatorist C_2 — kõrgetel helisagedustel.

§ 9. HELISAGEDUSGENERAATOR

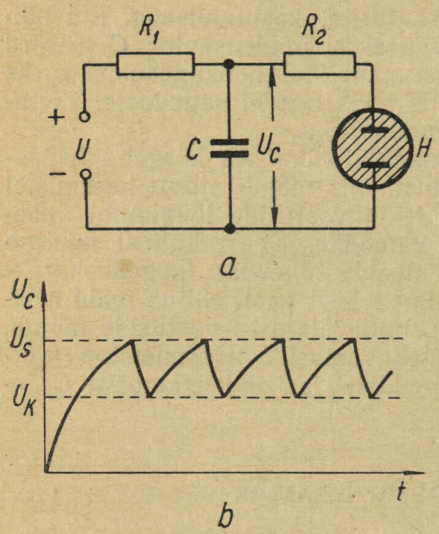
Generaator on seadis, mis muundab elektrienergiaks mingit teist liiki energiat. Kitsamas mõttes nimetatakse raadiotehnikas generaatoriks seadist või erilülitust, mis muundab alalisvoolu vahelduvvooluks. Vastavalt tekitatavale sagedusele eristatakse madal- ehk helisagedusgeneraatoreid ja kõrgsagedusgeneraatoreid.

Käesoleva õpiku kahekümnendas peatükis tuleb vaatluse alla kustumatu kõrgsagedusvõnkumise tekitamine võnkeringis positiivselt tagasisidestatud elektronlambi abil. Märgime juba siinkohal, et niisugused generaatorid võivad tekitada ka kuitahes madala sagedusega voolu, sest sagedus oleneb ainult lülituses kasutatava võnkeringi omasagedusest:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Kuna helisageduste piirkonda kuuluvate vahelduvvoolude genereerimiseks tuleks võnkeringis kasutada väga suuri induktiivsusi ja mahtuvusi, mis on tehniliselt raskesti teostatav ja kulukas, siis on laialdaselt levinud mitmed spetsiaalsed helisagedusgeneraatorite lülitused, mida kasutatakse raadiotehnilistes mõõteseadmetes, televisiooniaparatuuris ja automaatikas.

Elektrilist võnkumist saab tekitada süsteemides, mis sisaldavad induktiivsust või mahtuvust, aktiivtakistust, mingit ebalineaarse iseloomuga takistust (elektron- või gaaslahenduslampi) ja alalisvooluallikat. Laialt on levinud generaatorid, kus leiab aset kahe vastandliku protsessi perioodiline vaheldumine: kondensaatori aeglane laadimine läbi suure takistuse ja kiire tühjenemine läbi tunduvalt väiksema takistuse. Pinge, mis selliselt generaatorlülituselt saadakse, sarnaneb oma graafiku poolest sae hammastikule ja seepärast nimetataksegi seda hammaspingeks.



Joonis 18. 27. Hammaspingegeneraatori lülitus gaaslahenduslambiga (*a*) ning kondensaatoril ilmuva pinge graafik (*b*).

Lihtsaim *hammaspingegeneraator* on *R-C*-lülitus gaaslahenduslambiga joonisel 18. 27. Alalisvooluallikas laeb suure aktiivtakistuse R_1 kaudu kondensaatorit C. Rööbiti viimasega on ühendatud külma katoodiga gaaslahenduslamp (huumlamp) H ja tunduvalt väiksem aktiivtakistus R_2. Kui pinge kondensaatoril on jõudnud tõusta gaaslahenduslambi süttimispingeni U_s, siis tekib vool läbi takisti R_2 ja gaaslahenduslambi ning kondensaator tühjeneb takistusest R_2 oleneva kiirusega kuni lambi kustumispingeni U_k. Edasi algab taas kondensaatori laadimine ning protsess jääb perioodiliselt korduma süttimis- ja kustumispinge vahega ning lülituselementide suurustega määratud sagedusel. Kondensaatorilt saadavat pinget kujutab graafik samal joonisel. Pingehammaste parempoolse osa kallaku määrab kondensaatori C mahtuvus ja takisti R_2 suurus ning vasakpoolse osa kallaku — sama kondensaatori mahtuvus ja takisti R_1 suurus. Peaaegu alati valitakse takistused selliselt, et R_2 moodustab kõigest sajandiku või veelgi vähem takisti R_1 suurusest.

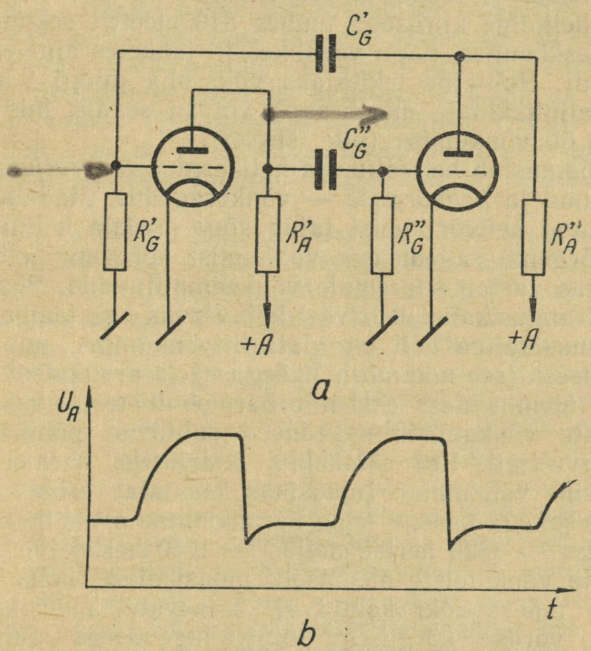
Taolise generaatorlülituse väljandpinge määrab kasutatava huumlambi süttimis- ja kustumispinge vahe. Väljandpinge amplituud

$$U_{vm} = \frac{U_s - U_k}{2}.$$

Multivibraatoriks nimetatakse generaatorit, mis oma lülitusskeemilt meenutab kaheastmelist takisti-kondensaator-sidestuses

võimendajat, mille väljandpinge juhitakse sisendisse tagasi (joonis 18. 28). Sellise tugeva positiivse tagasiside tagajärjel muutub võimendaja generaatoriks ja tema elektronlampide anoodidelt võib saada peaaegu ristküliku-kujulise vahelduvkomponendiga pinget, mis on väga rikas harmooniliste võnkumiste poolest. Põhisageduse määravad lülituselemendid:

$$f \approx \frac{0{,}6}{R_G'C_G' + R_G''C_G''}.$$



Joonis 18. 28. Multivibraatori lülitus (*a*) ja tema väljandpinge graafik (*b*).

Multivibraatori väärtuslikuks omaduseks on selle sünkroniseeritavus välise vahelduvpingega või üksikute pingeimpulssidega, mis määravad täpselt kindlaks genereeritava võnkumise sageduse.

Kui multivibraatori skeemi juhtida tema võnkesagedusele lähedase sagedusega vahelduvpinget (sünkroniseerimispinget), siis viimane «haarab» kaasa ka multivibraatoris genereeritava võnkumise — see omandab sünkroniseerimispinge sageduse.

Multivibraatoreid kasutatakse mõõtelülitustes, automaatikas jm.

Multivibraatori tüüpi generaatoreid võib rakendada tööle väga laias sagedusalas — hertsi murdosadest kuni sadade kilohertsideni.

19. PEATÜKK

ELEKTROAKUSTILISED SEADISED

§ 1. ÜLDMÕISTED

Inimkõrv tajub helina õhuosakeste laineliselt edasikanduvat võnkumist sagedusalas 16 kuni 20 000 hertsi. Helivõnkumine võib tekkida ja edasi kanduda ka vedelikes ning tahketes ainetes. Õhus levib helilaine kiirusega umbes 340 meetrit sekundis, kuid tihedamas keskkonnas, nagu vedelikes ja tahketes ainetes, tunduvalt kiiremini. Helilaine tekitajaks võib olla mingi võnkuv ese (pillikeel, valjuhääldaja membraan) või ka seadis, mis vahetult kutsub esile õhuvõnkumise (vile, sireen).

Heli iseloomustab helivaljus ja helikõrgus. *Helivaljuse* määrab võnkeamplituud ja *helikõrguse* — võnkesagedus. Madalatel sagedustel toimuvat helivõnkumist tajub kõrv madala helina ja vastupidi — kõrgema sagedusega võnkumist kõrgema helina. Suurem helivaljus vastab suuremale võnkeamplituudile. Peale nende iseloomustab muusikalist heli veel kõlavärvus ehk tämber.

Üksik muusikaline heli on alati liitvõnkumine, mis koosneb põhivõnkumisest (see määrab helikõrguse) ja arvukatest kõrgema sagedusega ülemhelidest ehk nn. harmoonilistest võnkumistest. Harmooniliste võnkumiste sagedused suhtuvad põhiheli sagedusse täisarvuliselt. Kui põhiheliks (esimeseks harmooniliseks) on 440-hertsine võnkumine (muusikas kasutatav esimese oktaavi heli la), siis sellega kaasuv teine harmooniline oleks $2 \cdot 440 = 880$ hertsi, kolmas — 1320 hertsi, neljas — 1760 hertsi jne. Üksikute harmooniliste võnkumiste olemasolu muusikalises helis ja nende amplituudid määravadki kõlavärvi. Erinevatel muusikariistadel tekitatavate võrdse kõrgusega ning tugevusega muusikaliste helide kõlaline erinevus ongi tingitud erinevate ülemhelide olemasolust ja suhtelisest tugevusest.

Heli elektroakustilise ülekande ja salvestamise (jäädvustamise) seadmetelt tuleb nõuda küllalt ühtlast laia sageduspiirkonda, mis hõlmaks kõiki põhihelisid ning nende harmoonilisi (viimastest kui mitte kõiki, siis vähemalt tähtsamaid). Kõne põhisagedused asuvad vahemikus 80 kuni 800 hertsi, kuid nende ülemhelid ulatuvad kuni 8000 hertsini ja üksikutel sisisevatel häälikutel veelgi kõrgemale. Teksti arusaadavuse tagamiseks peab *elektroakustilise trakti* [1] kaudu üleantav sagedusriba haarama sagedusi vahemikus 200 kuni 2500 hertsi (tavaline traattelefoniside).

[1] Elektroakustiliseks traktiks nimetatakse kõiki järjestikuseid elektroakustilisi seadmeid, mille abil kantakse üle, salvestatakse või taastatakse heli. Lihtsaimal juhul moodustub elektroakustiline trakt hariliku telefoniside vahenditest — süsimikrofonist, ühendusjuhtmetest ja elektromagnetilisest telefonist.

Kõnes leiduvad madalamad põhisagedused (80 kuni 200 hertsi) jäävad niisugusel juhul küll üle kandmata, kuid nende helide harmoonilised võnkumised loovad kõrvas illusiooni ka põhiheli olemasolust. Taoline sagedusala piiramine altpoolt, s. o. madalamate sageduste osas, on lubatav ainult kõne ülekandel. Muusika puhul see pole üldse sobiv, sest ülekande kõlavärv kaotaks oma lopsakuse ja mahlakuse. Loomutruuks heliülekandeks kasutatavate elektroakustiliste seadiste sagedusriba peab kõne puhul ühtlaselt haarama kõiki sagedusi vahemikus 80 kuni 8000 hertsi. Muusikariistade helide põhisagedused langevad vahemikku 30 kuni 5000 hertsi (näiteks klaveri madalaim la = 28 hertsi ja kõrgeim do = 4178 hertsi). Enam-vähem loomutruuks kõne ja muusika ülekandeks piisabki sagedusalast umbes 70 kuni 5000 hertsi (tavaliste ringhäälingu-vastuvõtjate puhul), kuid ideaalseks saab pidada alles 30 ... 15 000-hertsise sagedusriba ühtlast ülekannet (kvaliteetsed magnetofonid, ultralühilaine ringhääling).

Kõrv võib tajuda helisid äärmiselt laias tugevusalas (dünaamilises piirkonnas). Näiteks tekib ühe keskmise kõrgusega tooni (1000 hertsi) puhul helitaju juba 0,0002 baari [1] suurusel helirõhul, kuid suurim kõrva poolt talutav helitugevus samal sagedusel on sellest mitu miljonit korda suurem. Helitugevuse muutmise taju pole võrdeline helivõimsuse muutumisega. Suurt helivõimsuse kasvu eraldab kõrv kui võrdlemisi tühist helitugevuse suurenemist. Kui aga helivõimsus muutub vähema kui 25 protsendi võrra, siis kõrv seda helitugevuse muutumisena üldse ei taju.

Raadio- ja traatside tehnikas ning elektroakustikas on levinud helipingete, -voolude, -võimsuste ja helitugevuste logaritmiline mõõtmisviis erilise võrdlusühiku — detsibelli abil. Selle abil saab väljendada heli ja helisagedusvoolude (pingete) tugevnemist või nõrgenemist, näiteks võimendaja või selle üksiku astme võimendusmäära, helisageduspinge vähenemist potentsiomeetrites ning muudes helivõimendust reguleerivates seadmetes jm.

Käsitletavad logaritmilised ühikud on tegelikult võrdlusühikud, milledega ei saa vahetult määrata mingit absoluutset suurust, vaid kahe sama liiki suuruse, näiteks võimendaja väljandpinge ja sisendpinge suhet (s. t. tema võimendusteguri) vms.

Detsibell (lühend: dB) on üks kümnendik põhiühikust *bellist*. Ühele bellile vastab võimsuste suhe 10 : 1 ja pingete või voolude suhe 3,16 : 1. Detsibellide arv K on kümnekordne võrreldavate võimsuste suhte kümnendlogaritm:

$$K = 10 \lg \frac{P_2}{P_1}.$$

Tähelepanu tuleb juhtida asjaolule, et detsibellide kasutamisel vastavad mingile pingete või voolude suhtele ning arvuliselt

[1] Üks baar on umbes miljondik atmosfääri.

samale võimsuse suhtele erinevad K väärtused. Kuna võimsus on võrdeline pinge või voolu ruuduga ($P = I^2R$ ehk $P = U^2 : R$), siis ka

$$K = 10 \lg \frac{I_2^2 R_2}{I_1^2 R_1} \text{ ehk } K = 10 \lg \frac{U_2^2 : R_2}{U_1^2 : R_1}.$$

Kui võrreldavad pinged U_2 ja U_1 või voolud I_2 ja I_1 tekivad võrdsetes takistustes ($R_2 = R_1$), siis lihtsustuvad valemid ja logaritmide omaduste põhjal võib ruutväärtused muuta esimeseks astmeks logaritmi kordaja kahekordistamisel:

$$K = 10 \lg \frac{I_2^2}{I_1^2} = 20 \lg \frac{I_2}{I_1} \text{ ning } K = 10 \lg \frac{U_2^2}{U_1^2} = 20 \lg \frac{U_2}{U_1}.$$

Saadud lihtsad valemid võimaldavad logaritmide tabeli abil määrata kahe pinge või voolu suhet detsibellides, kui vastavad takistused on omavahel võrdsed. Ühele detsibellile vastab 1,12-kordne pinge või voolu ja 1,259-kordne võimsuse juurdekasv.

Ülevaate detsibellide arvu ja võimsuste, pingete ehk voolude suhete vahekorrast annab vastav tabel käesoleva õpiku lisas.

Teine samalaadne, kuid raadiotehnikas vähem levinud logaritmiline võrdlusühik on *neper* (lühend: N). Seda kasutatakse traatsidetehnikas. Ühele neperile vastab 2,72-kordne pinge- või vooluvõimendus ehk 7,39-kordne võimsusevõimendus. Neperite arv on võrreldavate suuruste suhte naturaallogaritm.

Ühele detsibellile vastab 0,115 neperit ja ühele neperile vastab 8,686 detsibelli.

Näide. Määrata helisagedusvõimendaja võimendus detsibellides, kui sisend- ja väljandtakistuse võrdsuse korral temas areneb 100-kordne pingevõimendus.

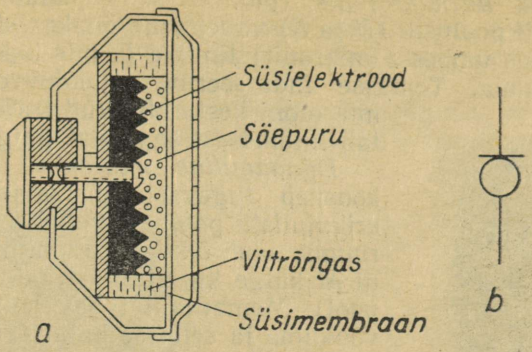
Sellele pingevõimendusele vastab raamatu lõpus toodud tabeli kohaselt +40 detsibelli.

Mitme võimendusastme koguvõimenduse saamiseks tuleb nende detsibellides antud üksikvõimendused liita.

§ 2. MIKROFONID

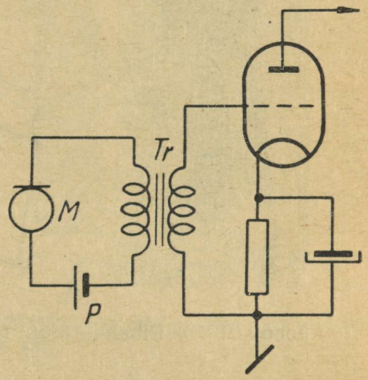
Mikrofon on elektroakustiline seadis, mis muundab temasse sattuva heli vastavaks vahelduvvoolu liitvõnkumiseks — helisagedusvooluks. Lihtsaim oma ehituselt ja talitluspõhimõttelt on telefonitehnikas kasutatav *süsimikrofon*. See koosneb kausikujulisest metallkapslist, mida katab õhuke süsiplaat — membraan. Kapsli sees on viimasest isoleeritud süsielektrood, mille süvendit täidab peenike söepuru (joonis 19. 1). Mikrofoni tähistatakse samal joonisel antud märgiga.

Süsimikrofoni ühendamiseks võimendaja sisendisse või tarbijat (näiteks telefoni) sisaldavasse vooluringi kasutatakse mingit alalisvooluallikat ja väikest helisagedustrafot, nn. mikrofonitrafot, mille ülekandesuhe on 1 : 20 kuni 1 : 100 (joonis 19. 2).



Joonis 19. 1. Süsimikrofoni ehitus (*a*) ning mikrofoni skeemitähis (*b*).

Membraan võngub mikrofoni tabava heli mõjul ja avaldab vastavalt muutlikku survet söepurule. Süsielektroodi, söepuru ja membraani läbiv alalisvool kohtab sealjuures muutlikku takistust, sest söepuru osakeste omavaheline kontakt on suurema surve puhul parem, seega üleminekutakistus voolule väiksem kui nõrgema surve puhul. Järelikult tekib vooluringis pulseeriv vool, mis indutseerib mikrofonitrafo sekundaarmähises helisagedusliku vahelduvpinge.



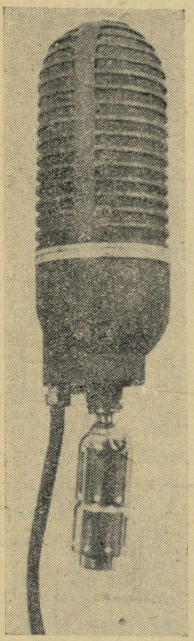
Joonis 19. 2. Süsimikrofoni ühendamine helisagedusvõimendaja sisendisse sobitustrafo kaudu.

Süsimikrofoni toitepingeallikana kasutatakse kuivelemente. Ühe elemendi 1,5-voldisest pingest piisab selle mikrofoni tööle-rakendamiseks.

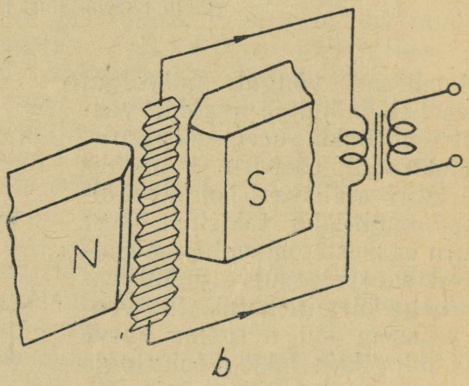
Süsimikrofon tekitab suuri ebalineaarmoonutusi, tema sagedusriba on võrdlemisi kitsas ning ülekantavat heli saadavad mitmesugused kahinad ja raginad, mis tekivad ebaühtlasest kontaktist söepuru osakeste vahel. Süsimikrofoni eelisteks on madal hind ja suur tundlikkus (teatava helitugevuse juures on tema väljandpinge tunduvalt suurem kui ühelgi teisel mikrofonitüübil). Sel põhjusel kasutataksegi telefonitehnikas süsimikrofone, et vältida tülikat helisagedusvoolu võimendamist igas abonentaparaadis.

Tunduvalt parema ülekandekvaliteedi kindlustavad *elektrodünaamilised mikrofonid*, milliseid on kahte tüüpi: ribamikrofonid ja võnkepool-mikrofonid (viimaseid nimetatakse tavaliselt dünaamilisteks mikrofonideks).

Riba- ehk *lintmikrofonis* (joonis 19. 3) puudub membraan. Püsivmagneti pooluste (*N* ja *S*) vahel asub õhukesest alumiiniumlehest (paksus umbes 5 mikronit) lindike *L*, mis hakkab helilaine mõjul võnkuma. Temasse indutseeruv vahelduvvool juhitakse mikrofoni kesta ehitatud trafosse, mis tõstab lindikesest saadavat pinget.



Dünaamiline mikrofon (joonis 19. 4) koosneb tugevast püsivmagnetist, mille erikujuliste pooluste vahelises silindrilises ruumis asub õhukese alumiiniummembraani *M* külge kinnitatud traatmähis (võnkepool). Membraani tabav heli paneb pooli võnkuma ja sellesse indutseerub vahelduvvool, mis transformeeritakse kõrgemapingeliseks ning juhitakse võimendaja esimese astme võreringi.



a b

Joonis 19. 3. Ribamikrofon (*a*) ning selle põhimõtteline ehitus (*b*).

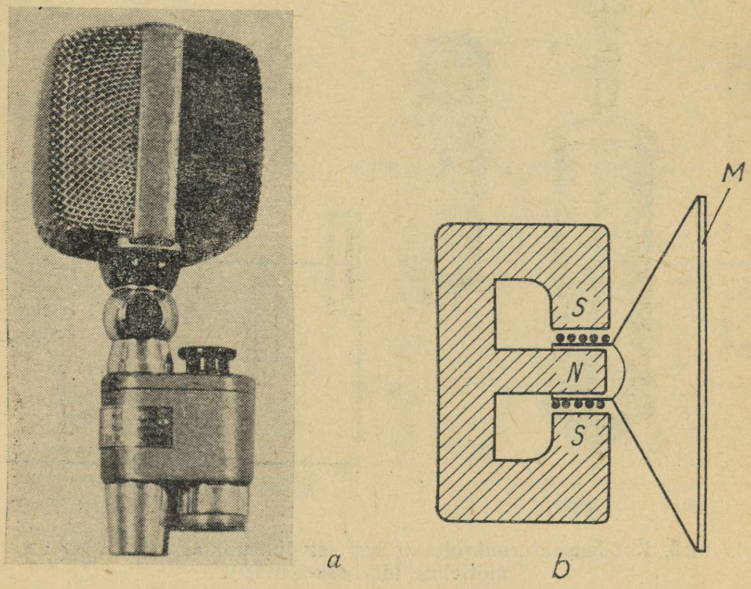
Elektrodünaamiliste mikrofonide ja võimendaja vahelise ühendusjuhtme pikkus võib ulatuda sadade meetriteni ilma märgatava võimsuskaota. Mikrofonijuhe peab omama korralikku varjestust näiteks tiheda punutud traatvõrgu («suka») näol, mis maandatuna väldib kõrvaliste elektri- ja osalt ka magnetväljade häired.

Elektrodünaamilised mikrofonid toodavad väga väikesi helisageduspingeid (suurusjärgus 0,1 millivolti), mis nõuab suurt võimendust. Nendes tekkivad lineaar- ja ebalineaarmoonutused on võrdlemisi tühised ning ulatuslik ribalaius (parematel tüüpidel 50 kuni 10 000 hertsi) võimaldab elektrodünaamilisi mikro-

fone (esmajoones just ribamikrofone) kasutada kvaliteetseks heliülekandeks.

Piesoelektrilised (*kristall-*) *mikrofonid* on elektroakustilistelt ja mehaanilistelt omadustelt üldiselt pisut halvemad elektrodünaamilistest mikrofonidest, kuid nad on konstruktsiooni lihtsuse ja madala hinna tõttu kättesaadavamad. Piesomikrofon ühendatakse ühes suure rööbitise takistiga (mitu megaoomi) otseselt esimese võimendusastme võrele.

Piesoelektrilise mikrofoni talitlusviis põhineb nn. *piesoelektrilisel* efektil. Mõnede mittejuhtide (kvartsi, senjettsoola, turma-



Joonis 19. 4. Dünaamiline (võnkepool-) mikrofon (*a*) ning selle põhimõtteline ehitus lõikes (*b*).

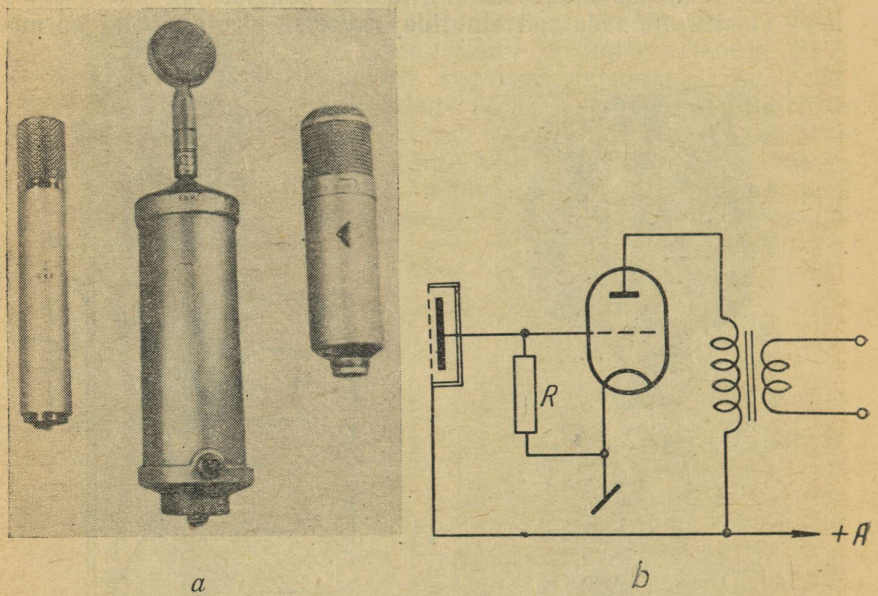
liini) kristallidest väljalihvitud plaadikeste vastaskülgedele ilmuvad mehaanilise surve mõjul vastasmärgilised elektrilaengud. Nende suurus — tekkiv potentsiaalide vahe — on võrdeline survega.

Piesoelement koostatakse ühest või mitmest senjettsoola kristallist väljalõigatud 0,3 millimeetri paksusest plaadikesest, millede pinnad kaetakse metallikihiga. Helilaine taktis võnkuv membraan paneb omakorda võnkuma piesoelemendi ja selle metallkatetel tekkivad väikesed vahelduvpinged juhitakse lühikese (kuni mõned meetrid) ühendusjuhtme kaudu helivõimendaja sisendisse. Piesomikrofonid arendavad umbes 10 korda kõrgemat helipinget kui dünaamilised mikrofonid.

Piesomikrofonid, nagu teisedki piesoelektrilised seadmed, ei

talu temperatuure üle 50° C ega niiskust, sest senjettsool sulab 63° C juures ning lahustub vees hästi. Pika (suure sisemahtuvusega) ühendusjuhtme korral halveneb piesomikrofoni sageduskarakteristik kõrgemate helide osas.

Täiuslikem mikrofonitüüp on *kondensaatormikrofon*, mida kasutatakse ringhäälingutehnikas ja mujal eriti kvaliteetsete ülekannete teostamiseks. Kondensaatormikrofon oma lihtsaimal



Joonis 19. 5. Kondensaatormikrofone ühes eelvõimendajaga (*a*) ning selle põhimõtteline lülitusskeem (*b*).

kujul koosneb väikesest ümmargusest metallkapslist, mille üht otspinda katab õhukesest alumiinium- või kuldlehest ehk ka mingist plastmassist valmistatud ja metallikihiga kaetud membraan. Viimase lähedale on paigutatud massiivne isoleeritud metallplaat, mis koos membraaniga moodustab helisageduse rütmis muutuva mahtuvusega kondensaatori (kui võnkumisel membraan läheneb paigalseisvale elektroodile, siis suureneb mahtuvus ja vastupidi).

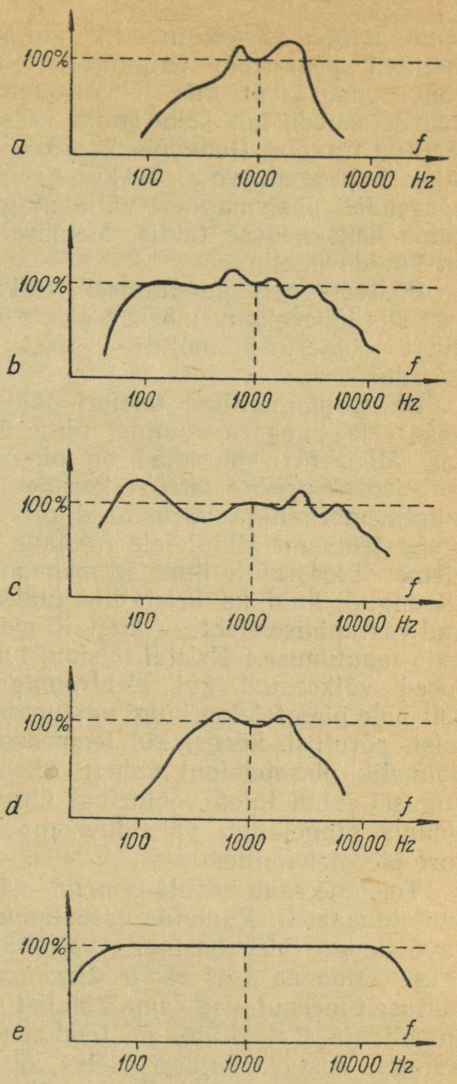
Umbes 100-voldise pingega alalisvooluallikas lülitatakse suure takistuse (25 kuni 80 megaoomi) kaudu kondensaatormikrofoni membraani ja aluselektroodi vahele (joonis 19. 5). Mahtuvuse muutustega kaasuvad vahelduvad laadimis- ja tühjenemisvoolud tekitavad takistil vahelduva pingelangu, mis juhitakse mikrofoni enese sisse ehitatud eelvõimendusastme võrele. Mikrofoni väljandpinge võetakse selle elektronlambi anoodringist enamasti üle

trafo. Uuemad kondensaatormikrofoni eelvõimendajad töötavad katoodväljandiga lülituses, seega ilma väljandtrafota.

Esimese võimendusastme kokkuehitamine kondensaatormikrofoniga on tarvilik selleks, et võimalikult vältida häirepingete sattumist võimendaja sisendisse. Mikrofonilülituse takistil tekkiv vahelduvpinge on äärmiselt väike ja kui seda juhtida kaugemal asuvasse võimendajasse, siis kõrvaliste väljade poolt juhtmesse indutseeritavad häirepinged võivad kergesti ületada helipinge suuruse.

Selle mikrofonitüübi eelisteks on tühised moonutused ning väga lai ja ühtlane sagedusriba (30 kuni 15 000 hertsi ja isegi kuni 20 000 hertsi) ning puuduseks vajadus eelvõimendaja kokkuehitamiseks mikrofoniga ja selle toitmine kütte- ning anoodvooluga.

Üksikutes mikrofonitüüpides tekkivate lineaarmoonutuste võrdlemiseks on joonisel 19. 6 toodud rida sageduskarakteristikuid: *a* — süsimikrofon, *b* — ribamikrofon, *c* — dünaamiline mikrofon, *d* —piesomikrofon, *e* — kondensaatormikrofon. Näeme, et kõige ühtlasema ülekande suures helisageduste alas kindlustab ainult kondensaatormikrofon.



Joonis 19. 6. Mikrofonide sageduskarakteristikuid eelistatud suunas langeva heli puhul: *a* — süsimikrofon, *b* — ribamikrofon, *c* — dünaamiline mikrofon, *d* — piesomikrofon, *e* — kondensaatormikrofon.

§ 3. VALJUHÄÄLDAJAD

Vastandina mikrofonile muundab valjuhääldaja vahelduvvoolu energia taas heliks. Samaks otstarbeks kasutatakse ka telefone, mis on väiksema võimsusega elektroakustilised heliallikad. *Elekt-*

romagnetilise telefoni metallist või plastmassist keres asuva püsivmagneti poolustele paigutatud elektromagneti mõjupiirkonnas võib vabalt võnkuda õhuke terasmembraan. Elektromagneti mähise moodustab kaks suure keerdude arvuga peenikesest isoleeritud traadist (läbimõõt kuni 0,05 mm) poolikest, millesse juhitakse helisagedusvool. Tekkiv vahelduv magnetväli tugevdab ja nõrgendab püsivmagneti välja ning sunnib terasmembraani võnkuma helisageduse taktis. Membraan tekitab õhuvõnkumise, mis on kuuldav helina.

Püsivmagneti puudumisel tekiks ülekantava heli moonutus, sest siis läheneks membraan elektromagnetile vahelduvvoolu kummagi poolperioodi mõjul — seega kahekordistuks kuuldava heli sagedus.

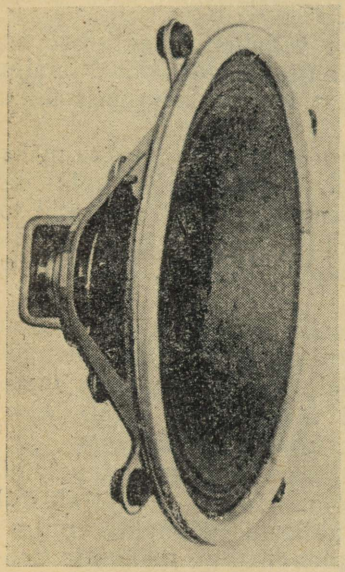
Elektromagnetiline telefon põhjustab võrdlemisi suuri ebalineaar- ja lineaarmoonutusi ning ülekantav sagedusriba on kitsas. Mõnevõrra paremad on piesoelektrilise telefoni omadused.

Piesoelektriline telefon koosneb kerge alumiinium- või plastmassmembraaniga varustatud piesoelemendist, mis hakkab võnkuma tema metallkatetele juhitava vahelduvpinge mõjul. (Piesoelemendi kristallile ilmuvad mehaaniliste jõudude tagajärjel elektrilaengud, kuid ka kristallile juhitavad elektrilaengud põhjustavad vastupidise efekti — kristalli mehaanilise deformeerumise, s. o. kuju muutumise.) Kristalltelefoni tundlikkus on suurem ja moonutused väiksemad kui elektromagnetilisel telefonil. Mehaaniliselt pole piesotelefon kuigi vastupidav, kuna ta kardab ülekoormamist, põrutusi, kõrgemaid temperatuure ja niiskust. Samuti pole võimalik piesotelefoni vahetu ühendamine alalisvooluringi. Niisugusel juhul tuleb vooluringi ühendada koormustakisti ja sellel ilmuva pingelangu vahelduvkomponent juhtida läbi kondensaatori piesotelefonile.

Telefone saab kasutada nende väikese helivõimsuse tõttu ainult individuaalselt. Ruumide varustamiseks elektroakustiliselt ülekantava heliga tuleb kasutada valjuhääldajat. Praegusel ajal toodetakse valdavas osas *elektrodünaamilisi valjuhääldajaid,* mis oma ehituselt meenutavad samatüübilist mikrofoni (joonis 19. 4-*b*). Valjuhääldaja skeemitähis on toodud joonisel 19. 7 ühes tema väliskujuga. Vastava kujuga püsiv- või elektromagneti pooluste vahelises ümmarguses silindrilises pilus asub suurepinnalise koonusekujulise pappmembraani külge kinnitatud võnkepool — umbes viiskümmend keerdu lakikihiga isoleeritud vasktraati. Pooli läbiv vahelduvvool põhjustab vahelduva magnetvälja, mis koosmõjul püsivmagneti (või elektromagneti) väljaga sunnib mähist ning membraani helivoolu taktis võnkuma. Võnkepooli täpseks tsentreerimiseks, s. o. asendi andmiseks, mille puhul ta saab vabalt võnkuda piki pooluste vahemikku, on elastsed väljalõigetega või lainelised tsentreerimisseibid. Koonusekujulise membraani välisserv, mis kinnitub valjuhääldaja kerele, tehakse samuti laineline.

See võimaldab membraanil koos võnkepooliga liikuda kolvitaoliselt edasi-tagasi ka võrdlemisi suure amplituudiga.

Elektrodünaamiline valjuhääldaja on madalaoomiline seadis: ta tarbib tühise talitluspinge juures võrdlemisi suurt helisagedusvoolu, sest magnetvälja tugevus sõltub just viimasest. Sellepärast kasutataksegi niisugust valjuhääldajat alati koos sobitustrafoga, mis võimendaja lõppastme anoodringist saadava kõrge pingega vahelduvvoolu transformeerib madalamapingeliseks, kuid suhteliselt tugevamaks vooluks, kusjuures ülekandesuhe on 40 : 1 ümber.



Elektrodünaamilised (lühendatult: *dünaamilised*) *valjuhääldajad* erinevad koormatavuselt, mõõdetelt ja elektrilistelt omadustelt, nagu üleantava sagedusriba laiuse ning lubatavate moonutuste poolest. Suurema membraaniga valjuhääldajad annavad madalaid helisid paremini edasi kui väikesed.



a *b*

Joonis 19. 7. Dünaamiline valjuhääldaja (*a*) ning valjuhääldaja skeemitähis (*b*).

Dünaamilist valjuhääldajat iseloomustab võnkepooli näivtakistus (impedants), mis määratakse keskmistel helisagedustel, ja normaalne koormatavus.

Elektrodünaamiline valjuhääldaja, millel püsivmagnet on asendatud elektromagnetiga, vajab selle toiteks alalisvoolu — ergutusvoolu (enamasti umbes 40 kuni 60 milliamprit 50 voldi juures), mis võetakse raadioseadme toiteallikast (alaldaja silumisfiltri paispool asendatakse valjuhääldaja ergutusmähisega, mis oma terassüdamiku tõttu samuti omab suurt induktiivsust).

Piesoelektrilised ehk *kristall-valjuhääldajad* on ehituselt suuremõõtmelised piesoelektrilised telefonid. Neid kasutatakse mõnikord odavuse tõttu translatsioonivõrgu väikese võimsusega kuuldepunktides, kus ei nõuta erilist ülekandekvaliteeti. Harilike massiliselt toodetavate piesoelektriliste valjuhääldajate sagedusriba on võrdlemisi kitsas — üleantavas helis puuduvad madalad ja kõrgeimad helisagedused.

Elektroakustika ja raadiotehnika valdkonda kuulub ka helijäädvustamine (helisalvestus), mis hõlmab heli üleskirjutamist ning selle soovikohast reprodutseerimist võimaldavaid seadmeid. Lihtsaim ja ajalooliselt vanim on heli salvestamise meetod *mehaanilise fonogrammina,* kus helivõnkumine «kirjutatakse» võnkuva lõiketera abil lainelise spiraaljoonena silindri- või plaadikujulise ühtlaselt pöörleva helikandja pinnale.

Laialt on levinud helisalvestamine šellakist, vinüliidist ning teistest plastmassidest valmistatud plaatidele. Massiliselt paljundatavate grammofoniplaatide (heliplaatide) valmistamine toimub järgmiselt.

Elektromagnetilise rekorderi (lõikepea) abil lõigatakse mehaaniline fonogramm pehmele vahaplaadile, millelt galvanoplastilisel meetodil kopeeritakse metallist stantsimisvorm. Viimase abil toodetakse vastavas pressis heliplaadid. Plaatide pöörlemiskiirused on normitud: $33^1/_3$; 45 ja 78 pööret minutis. Suurem kiirus annab üldiselt parema helikvaliteedi.

Mehaanilise fonogrammi taastamiseks — kuuldavaks muutmiseks — võib kasutada harilikku mehaanilist grammofoni, kus pöörleva plaadi helisüvendit kompiv nõelake paneb võnkuma metall- või vilgukivi-membraani. Membraani ühelt poolt algab laienev ruupor, millest membraani võnkumine kiirgub helilainena.

Tunduvalt kvaliteetsem on mehaanilise fonogrammi taastamine grammofoni elektrilisest helipeast, võimendajast ja valjuhääldajast koosneva elektroakustilise trakti abil, mis võimaldab mitmeid selle fonogrammi süsteemi puudusi (plaadikahin, madalate helide väike amplituud) elektrilisel teel vältida või kompenseerida.

Grammofoni elektrilistest helipeadest on praegu tarvitamisel magnetilised ja piesoelektrilised süsteemid. *Magnetilises helipeas* võngub väike raudleheke heliplaati kompiva nõela mõjul püsivmagneti väljas. Magnetvälja tiheduse muutumine raudlehekeses indutseeribki seda ümbritsevas poolis helisageduspinge.

Magnetilise helipea puuduseks on magnetist tingitud võrdlemisi suur kaal, mille tõttu plaat kulub kiiresti.

Piesoelektrilises (kristall-) helipeas kandub nõela võnkumine piesoelemendile, millelt saadakse helipinge. Selle konstruktsiooni puuduseks on väiksem mehaaniline vastupidavus, heaks küljeks suhteliselt kõrge (kuni 1 volt) helipinge ja parem sageduskarakteristik. Piesoelektrilised helipead toovad eriti esile madalaid helisid. See omadus on eriti hinnatav, sest madalad helid jäädvustatakse mehaanilisele fonogrammile väiksema amplituudiga kui kõrgemad.

Uuemad kristall-helipead on varustatud vahetatavat terasnõela asendava alalise safiir- või korundteravikuga, mis võimaldab mängida kuni 2000 plaadipoolt. Pärast teraviku kulumist asendatakse

helipeas — olenevalt konstruktsioonist — kas terve piesoelement koos teravikuga või ainult plastmassist nõelahoidja.

Heliplaadi mängimiskestuse pikendamiseks vähendati pöörlemiskiirust ja muudeti süvendite paigutus tihedamaks. Nii ilmusid praktikasse nn. *mikrokiri-* (*«kauamängivad»*) *plaadid,* mille puhul 30-sentimeetrise läbimõõduga plaadi üks pool mahutab kuni 23-minutise kestusega programmi. Võrdlusena võib märkida, et 30-sentimeetrise läbimõõduga «hariliku» plaadi üks pool mahutab parimal juhul 6-minutise kestusega programmi. Mikrokirja ja selle puhul kasutatavate plaadimaterjalide puhul on ebalineaarmoonutused ja kahina tase tunduvalt väiksemad ning salvestatav sagedusriba laiem kui tavalist tüüpi mehaanilisel fonogrammil. Seetõttu on kauamängivad plaadid juba hakanud harilikke heliplaate kõrvale tõrjuma.

Helifilmi-tehnikas jäädvustatakse helivõnkumine fotograafiliselt filmilindile ja saadakse *optiline fonogramm.* Selle saamiseks tüüritakse võimendatud helivooluga peenikese valguskiire heledust või laiust, mis valgustab pidevalt liikuvat filmi. Pärast ilmutamist jääb filmile optiline fonogramm: helivõnkumiste graafiku taoline muutliku laiusega või heledusega heliriba.

Optilise fonogrammi taastamiseks juhitakse läbi filmi peenike ühtlane valguskiir, mis langeb fotoelemendile[1]. Filmi liikumisel muutub valguskiire laius või tugevus ja fotoelemendi lülituse väljandpinge vastab jäädvustatud helile.

§ 5. HELI MAGNETILINE SALVESTAMINE

Magnetiline helisalvestamise süsteem on otstarbekaim ja kvaliteedilt parim. Umbes viieteistkümne aasta vältel on magnetofonid saanud mitte üksnes võistlejateks grammofonidele, vaid on näiteks kodumaisest ringhäälingutehnikast tavalise heliplaadi täiesti välja tõrjunud.

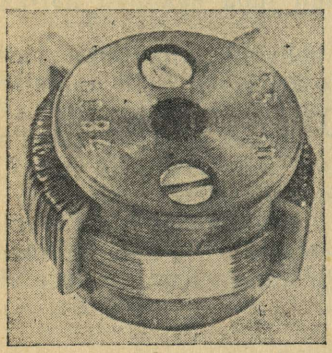
Helisalvestamine magnetofonil toimub ferromagnetilise helikandja magneetimise teel helisagedusvoolu rütmis muutuva magnetvälja abil. Enamasti kasutatakse helikandjana lindikujulist 6,35 millimeetri laiust ja 40 mikroni paksust tselluloosainest või plastmassist linti, mis on kaetud 10 mikroni paksuse magneeditava kihiga (erilise rauaühendeid sisaldava seguga). Lint liigub püsiva kiirusega erikujulise elektromagneti — salvestuspea eest mööda ning magneetub pead läbiva helisagedusvoolu rütmis lühemate või pikemate vahelduvate aladena.

Magnetofoni salvestuspea on kahest komplektist poolrõngakujulistest kõrge magnetilise läbitavusega metallisulamist (permalloi, mü-metall) valmistatud omavahel elektriliselt isoleeritud

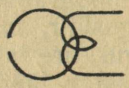
[1] Fotoelement on seadis, mis vastavalt tüübile muudab valguse mõjul oma takistust või tekitab elektromotoorse jõu.

plekkidest koosnev elektromagnet (joonis 19. 8), mille pooluste vahe — pilu — moodustab 8 kuni 25 mikroni paksune mittemagnetilisest metallist leheke. Salvestuspea mähist toidetakse võimendaja väljandist saadava helisagedusvooluga ja lampgeneraatoris toodetava kõrgemasagedusliku (30 kuni 120 kilohertsi) püsiva amplituudiga vahelduvvooluga. Selle vahelduvvoolu (*eelmagneetimisvoolu*) puudumisel toimuks salvestusprotsess suurte moonutustega ja tugeva kahina lisandumisega fonogrammile. Igale helilindi tüübile vastab teatav, katseliselt kindlaksmääratav eelmagneetimisvool.

Samast või mõnikord ka teisest iseseisvast generaatorist toidetakse *kustutuspead,* mis oma ehituselt sarnaneb salvestuspeaga, kuid omab laiemat pilu (harilikult 0,2 millimeetrit). Helilint möödub enne salvestuspeani jõudmist kustutuspeast ja selle tugev kõrgsageduslik magnetväli demagneedib lindi, kustutades eelmise salvestuse mittevajaliku fonogrammi.



a



b

Joonis 19. 8. Magnetofoni helipea (*a*) ning selle skeemitähis (*b*).

Magnetilise fonogrammi kuuldavaks muutmine toimub taastamispead, helivõimendajat ja valjuhääldajat sisaldava elektroakustilise trakti kaudu. *Taastamispea* on ehituselt samuti sarnane salvestuspeaga, omab võimalikult kitsast pilu ning suurema keerdude arvuga poole, mis ühendatakse kas otseselt või pingettõstva ülekandetrafo kaudu võimendaja sisendiga. Magnetilist fonogrammi kandev helilint magneedib vähesel määral taastamispea südamikku ja mähisesse indutseerub nõrk helipinge. Lindi magneetimisaste ei vähene korduval helitaastamisel, mistõttu magnetiline fonogramm mängimisel ei halvene. Lindi säilivust piiravad tema mehaaniliste omaduste halvenemine ja järkjärguline demagneetumine. Nendel põhjustel tuleb praegusaegsete helilintide säilivust hinnata umbes kümnele aastale.

Helilindi kiirused on normitud: 76,2; 38,1; 19,05; 9,5 ja 4,75 sentimeetrit sekundis. Suuremad kiirused annavad parema helikvaliteedi just sagedusriba laiuse osas, kuid ka kiirusel 38,1 cm/sek on võimalik saada 30 kuni 15 000 hertsini ulatuvat ühtlast sagedusriba.

Helilint võimaldab salvestatud fonogrammi monteerimist, s. o.

üksikute muusikapalade või nende osade soovikohast järjestamist või tekstist üksikute osade — näiteks mittevajalike lausete, sõnade või isegi üksikute häälikute — eemaldamist. Niisugusel juhul kasutatakse lindi jätkamiseks erilist liimi, mis koosneb 23,5 mahuosast kontsentreeritud äädikhappest, 63,5 mahuosast atsetoonist ja 13,0 mahuosast butüülatsetaadist. Võrdlemisi rahuldavalt saab magnetofonilinti jätkata ka ainult kontsentreeritud äädikhappe abil.

§ 6. MAGNETOFONI EHITUS

Igas magnetilises helijäädvustusseadmes on üldiselt kaks või kolm helipead (kustutus-, salvestus- ja taastamispea; kahte viimast võib asendada odavamates seadmetes üheainsa universaalse helipeaga), lindi veomehhanism ja üks või kaks võimendajat (esimesel juhul universaalne ja teisel juhul iseseisvad võimendajad salvestuseks ning taastamiseks).

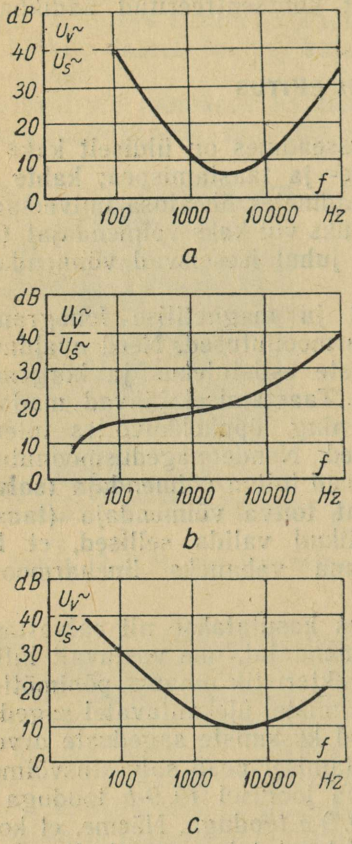
Magnetilisel helijäädvustamisel ja magnetilise fonogrammi taastamisel tekivad teatavad lineaarmoonutused. Need avalduvad salvestamisel madalate helisageduste esiletulekus ja kõrgemate sageduste suhtelises nõrgenemises. Taastamisel jäävad madalad ja kõrgeimad sagedused nõrgaks ning lõppkokkuvõttes tulevad esile ainult keskmised helisagedused. Nende sagedusmoonutuste kompenseerimiseks tuleb salvestuspead toitva võimendaja (salvestusvõimendaja) ning valjuhääldajat toitva võimendaja (taastamisvõimendaja) sageduskarakteristikud valida sellised, et heli salvestus-taastamisprotsess tervikuna vabaneks lineaarmoonutustest.

Lihtsamates magnetofonides, kus kasutatakse nii salvestamiseks kui ka taastamiseks sama võimendajat, mis vastavalt lülitatakse ümber, peab selle sageduskarakteristik omama põhimõtteliselt joonisel 19. 9-*a* toodud kuju (äärmistel ülekantavatel sagedustel on võimendustegurit suurendatud keskmiste sageduste arvel).

Kahe iseseisva võimendaja kasutamisel peab salvestusvõimendaja sageduskarakteristik sarnanema joonisel 19. 9-*b* tooduga ja taastamisvõimendajal — joonisel 19. 9-*c* tooduga. Näeme, et kompenseerimine kõrgetel helisagedustel teostatakse peamiselt salvestusvõimendajas ja madalatel sagedustel — taastamisvõimendajas. Sobiva kujuga sageduskarakteristikud saadakse sagedusest sõltuva vastusidestuse, filtrite ja madalsageduslike võnkeringide kasutamisega võimendajas.

Magnetofoni mehaaniline osa — lindi veomehhanism töötab ühe kuni kolme väikese elektrimootori jõul. Kolme mootoriga süsteemi puhul (joonis 19. 10) on helilindi kassetid või rullid asetatud kahe mootori võllidele. Kolmas mootor *C* veab kas vahetult või üle aeglustava ülekande nn. toonvõlli *I*, mis tõmbab linti väikese vabalt pöörleva kummist surverulli *R* abil püsiva kiirusega helipeade *K*, *S* ja *T* eest mööda. Kassettide mootoritele *A* ja *B* antakse

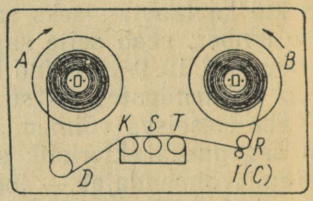
madalam pinge, kusjuures üks nendest (*A*) mõjub linti pingutavalt, sest kassetilt mahakeritav lint veab seda mootorit vastu tema pöörlemissuunale. Teine mootor *B* kerib helipeade eest möödunud ja toonvõlli ning kummirulli läbinud linti parempoolsele kassetile. Helisalvestuse või -taastamise lõppemisel eemaldatakse lint peadest, et vältida nende asjatut kulumist, ja mootorile *A* antava normaalse suurusega pinge mõjul keritakse lint tagasi vasakpoolsele kassetile. Tagasikerimise vältel on kummirull toonvõllist eemaldatud ja teisele mootorile *B* pinget ei rakendata või antakse lindi tihedamaks kerimiseks üsna väike pidurduspinge.



Joonis 19. 9. Magnetofoni võimendaja sageduskarakteristik ühise võimendaja kasutamisel salvestamiseks ja taastamiseks (*a*), iseseisva salvestusvõimendaja (*b*) ja taastamisvõimendaja sageduskarakteristik (*c*).

Helilint ületab enne peade ette sattumist vabalt pöörleva hooratta *D*, mis ühtlustab tema liikumist, vähendades lindi elastset pikivõnkumist.

Kahe ja ühe mootoriga veomehhanismi pealekerivale kassetile *B* antakse pöörlemine rihma ja hõõrdeülekande abil otse toonvõllile asetatud rattakeselt. Vastavalt reguleeritud hõõrde-



Joonis 19. 10. Vaade magnetofoni kolme mootoriga veomehhanismile.

ülekanne hoiab lindi parajalt pingul ja kerib toonvõllist möödunud lindi ühtlaselt parempoolsele kassetile. Tagasikerimiseks kasutatakse kahe mootoriga süsteemi puhul eraldi mootorit, mis käitab vasakpoolset kassetti. Salvestuse ja taastamise ajal saab see mootor madalama pinge ja pidurdab linti.

Ühe mootoriga süsteemides toimub tagasikerimine vastava mehaanilise ülekande tegevusserakendamisel toonvõlli mootori abil. Salvestusel ja taastamisel hoiab lindi pingul vasakule kassetile mõjuv väike hõõrdepidur.

Magnetofoni helipead (eriti just taastamispea) tuleb hoolikalt varjestada kõrvaliste magnetväljade mõju eest. Vastasel korral võib võimendaja toiteseadme trafo ja veomehhanismi elektrimootorite magnetiline puisteväli indutseerida helipeas häirepinge, mis võimendatuna avaldub valjuhääldajas madalatoonilise undamisena — «võrgumürana». Samuti tuleb hoida helikandjat sattumast tugeva magnetvälja piirkonda. Kui lindile on mõjunud püsiv magnetväli, siis niisuguse fonogrammi taastamisel ilmub tugev kahin. Küllalt tugev vahelduv magnetväli mõjub fonogrammile kustutavalt.

§ 7. ELEKTRIGRAMMOFONIDE MEHHANISMID

Elektrigrammofonid võimaldavad heliplaadile jäädvustatud mehaanilise fonogrammi taastamist elektroakustilise trakti kaudu. Elektrigrammofone toodetakse kahte liiki — sisseehitatud võimendaja ning valjuhääldajaga ja ilma nendeta. Esimest liiki grammofone nimetatakse — mitte just eriti õnnestunult — raadiogrammofonideks. Peale nimetatute varustatakse ka raadiovastuvõtjaid elektrigrammofoni mehhanismiga (nn. radioolad). Niisugusel juhul rakendatakse heliplaatide kuulamiseks vastuvõtja helivõimendusosa ja valjuhääldajad.

Elektrigrammofonide mehhanismides kasutatakse väikesi sünkroon- või asünkroonmootoreid, mis kas vahetult või vastava (enamasti hõõrde-) ajami kaudu panevad pöörlema rõhtsa taldrikukujulise aluse, millele asetatakse heliplaat. Nimetatud aluse keskel on 7-millimeetrise läbimõõduga poldike, mis hoiab heliplaadi keskpunkti täpselt pöörlemisteljel.

Universaalsed (kahe kiirusega) grammofoni-mehhanismid on tänapäeval kõige levinumad. Nendes käitab üks mootori võllile asetatud kahest erineva läbimõõduga messingrattakesest vabalt pöörlevat kummiäärisega vaherulli, mis omakorda annab liikumise üle juba plaadi aluskettale.

Vastavalt parajasti kasutatava heliplaadi normaalsele kiirusele ($33^1/_3$ või 78 pööret minutis) on hõõrdeülekande kummirull kokkupuutes ühe või teise veorattakesega, mis asuvad mootori võllil. Soovitud pöörlemiskiirust võimaldab valida vastava ehitusega hoobmehhanism, mis muudab kummirulli asendit.

Plaadi alusketta mass tehakse serval võimalikult suur, et ta mõjuks hoorattana, s. o. iseenese pöörlemist ühtlustavana.

Igasuguse helijäädvustus- ja taastamissüsteemi juures omab esmajärgulist tähtsust helikandja ühtlane liikumiskiirus. Juba väikesed võnkumised heliplaadi või magnetofonilindi liikumiskiiruses avalduvad — olenevalt nende sagedusest — heli iseloomu-

liku «ujumisena» (aeglased kiiruse muutused, mis muusika puhul avalduvad helistiku enam-vähem perioodilise muutumisena) või kiire vibreerimisena, mis moonutab tämbrit.

Heliplaadi veomehhanismi juures on väga oluline see, et mootori vibreerimine ei kanduks helipeale, kus see võiks indutseerida segava häirepinge. Selleks tehakse helipea kinnitus elastne.

§ 8. MITMEKANALILISED JA STEREOFOONILISED ELEKTROAKUSTILISED SEADISED

Kaasaegsete ringhäälingusaatjate helikvaliteet on väga kõrge. Seepärast sõltub raadiovastuvõtjas taastatav heli just viimase elektroakustilistest omadustest. Terves elektroakustilises traktis esinejast kuulajani — läbi mikrofoni, helisalvestusseadmete, võimendajate ja raadiosaatja kuni vastuvõtja valjuhääldajani — osutub suurimaks moonutuste põhjustajaks just viimane.

Tavaliseks kvaliteetseks ringhäälingu-ülekandeks piisab, kui valjuhääldaja annab ühtlaselt (s. o. kuuldavate lineaar- ja ebalineaarmoonutusteta) edasi sagedusriba 50 kuni 6500 hertsini, kuid ultralühilaine ringhäälingu, televisioonisaate helitausta ja heade magnetofonide puhul peab olema kaetud sagedusriba 30 kuni 15 000 hertsini. Sellist ulatuslikku sagedusriba on ühe valjuhääldaja abil väga raske ühtlaselt edasi anda, mistõttu kasutatakse neid mitu. Mitmest valjuhääldajast koosnevas süsteemis — *valjuhääldajate agregaadis* — on ühisesse kasti monteeritud üks või kaks suuremembraanilist dünaamilist valjuhääldajat madalate ja keskmiste helisageduste reprodutseerimiseks ja enamasti mitu väikeste membraanidega valjuhääldajat kõrgemate helisageduste jaoks.

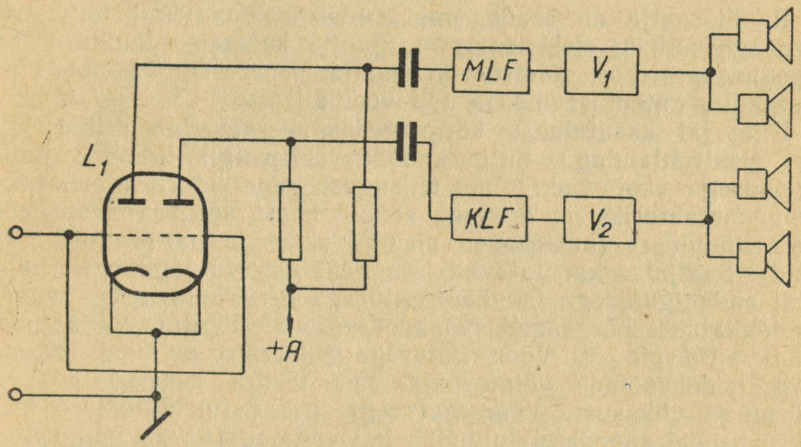
Valjuhääldajas reprodutseeritav heli võib olla täiesti vaba moonutustest, kuid ta erineb loomulikust ruumilisuse puudumisega. Näiteks avaldab kõlapildile suurt mõju orkestri vahetul kuulamisel nn. «akustiline perspektiiv» — asjaolu, et üksikute pillide heli saabub kõrva eri suundadest. Sümfooniaorkester haarab enda alla pinna 18 × 15 meetrit, kuid valjuhääldajast väljub heli nagu ühest punktist ning seetõttu hävib «akustiline perspektiiv» — ülekantav muusika kaotab oma loomuliku «sügavuse» ning «laiuse».

Paremad raadiovastuvõtjad varustatakse kõlapildi «sügavuse» osalisekski taastamiseks mitme (vähemalt kolme) valjuhääldajaga, mis kiirgavad heli laiali erinevates suundades. See peegeldub ruumi seintelt ja laelt, sattudeski niiviisi kuulaja kõrva ühekorraga paljudest suundadest ja andes mõninga, kuigi mitte täiesti loomuliku ruumilise kõlaefekti («pseudo-stereofooniline süsteem»).

Pseudo-stereofoonilise süsteemi heaks küljeks on see, et mitmes suunas paigutatud valjuhääldajad täidavad ruumi kõrgemate helisagedustega ühtlaselt. Kõrgemad helid kiirguvad nimelt val-

juhääldajast ainult võrdlemisi väikese nurga ulatuses, ristsihist arvates. Seepärast on üheainsa valjuhääldaja kasutamisel madalate ja kõrgete helide vahekord ülekantavas programmis õige ainult otse valjuhääldaja ees asuva kuulaja puhul.

Kõik valjuhääldajad võib ühendada sobiva võimsusega võimendaja väljandisse, kuid keerukamates seadmetes kasutatakse kahte iseseisvat võimenduskanalit — eraldi madalate ja kõrgete helide jaoks. Võimendatav helisagedusvool juhitakse ühes esimestest astmetest läbi sobivate *R-C*-filtrite, mis jaotavad kogu ülekantava sagedusala kaheks eraldi võimendatavaks ribaks (põhimõtteline plokkskeem [1] joonisel 19. 11). Tüürpinge antakse siin kaksiktrioodi



Joonis 19. 11 Kahe sageduskanaliga helisagedusvõimendaja plokkskeem.

L_1 kummalegi võrele; eraldi anoodringides on madalläbivusfilter *MLF* ja kõrgläbivusfilter *KLF*, millele järgnevad madalate helisageduste võimendaja V_1 ja kõrgete helisageduste võimendaja V_2 ühes vastavate valjuhääldajatega.

Valjuhääldaja helikvaliteet sõltub väga suurel määral kastist või kõlapinnast, mille külge ta on monteeritud. Ilma kastita või kõlapinnata valjuhääldaja madalaid helisid praktiliselt edasi ei anna. Madalama sagedusala helide normaalseks tekitamiseks tuleb valjuhääldaja monteerida suurepinnalisele puittahvlile või siis puidust või plastmassist kasti.

Valjuhääldajate kõla parandamiseks madalatel sagedustel kasutatakse mõnikord (näiteks kino heliseadmetes) *akustilist faasiinverterit* (faasipöörajat) — kinnist, ühe lisa-avaga varusta-

[1] Plokkskeem iseloomustab elektri- või raadioseadet ilma peensustesse laskumiseta. Selles kujutatakse võimendajad, filtrid jm. kokkuleppeliste lühenditega tähistatud ristkülikutena.

tud valjuhääldajakasti. Kasti ja selle ava mõõtmed valitakse kaalutlusel, et madalamate sagedustega helivõnkumine, mis kiirgub membraani tagumiselt küljelt, väljuks lisa-avast samas faasis kui membraani esiküljelt. Nii võib madalate helide (70 kuni 200 hertsi) võimsus soodsal juhul peaaegu kahekordistuda.

20. PEATÜKK

RAADIOSAATJAD

§ 1. ÜLDKÜSIMUSED

Raadiosaatja on seade, mis toodab saateantenni toitmiseks kõrgsageduslikku elektrienergiat. Saatja koosseisu kuulub kõrgsagedusgeneraator, võimsusvõimendaja, genereeritud voolu tüürimisseadis, antenniseadis ja toitevooluallikad.

Kaasajal kasutatakse kõrgsagedusgeneraatorina erilist lülitust elektronlambiga, mille anoodi võnkeringis ilmub vajaliku sagedusega vooluvõnkumine. Niisugust generaatorit nimetatakse lampgeneraatoriks, et eristada seda teistest kõrgsageduse generaatoritüüpidest (omaaegsed masin-, säde- ja kaarleek-generaatorid). Saatjates kasutatavad lampgeneraatorid jagunevad kahte liiki: endaergutusega ja võõrergutusega generaatoriteks. Esimestes tekitatakse kõrgsagedusvõnkumine vahetult, ilma väljastpoolt saadava tüürpingeta. Võõrergutusega generaator on sisuliselt vaid kõrgsagedusvoolude võimendaja, mis tõstab temasse juhitava tüürpinge võimsust. Võõrergutusega generaatorlülitust kasutatakse nendel sagedatel juhtudel, kui endaergutusega generaatori väljandvõimsusest ei piisa saateantenni toitmiseks.

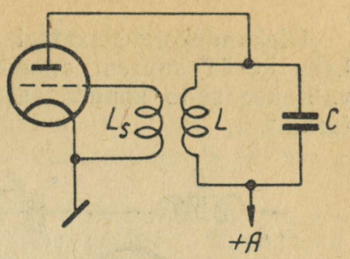
Raadiosaatja antenni juhitavat kõrgsagedusvoolu tuleb tüürida vastavalt saate iseloomule. Telegraafisignaalide üleandmiseks raadio teel tuleb näiteks ühel või teisel viisil katkestada võnkumine antennis morsemärkide rütmis — saatjat *manipuleerida.* Heli ülekandeks tuleb kasutada *moduleerimisprotsessi* — kõrgsagedusvoolu mõjutamist helisagedusvooluga iseseisva helivõimendaja — modulaatori abil.

§ 2. ENDAERGUTUSEGA LAMPGENERAATOR

Lampgeneraator on mitme elektroodiga elektronlampi ja võnkeringi sisaldav lülitus, mis muudab anoodvooluallika energiat sobiva sagedusega vahelduvvooluks. Endaergutusega lampgeneraator on tegelikult kõrgsagedusvõimendaja, mille anoodringist juhitakse teatav osa võimendatud pingest tagasi tüürvõrele — tekitatakse positiivne tagasiside.

Induktiivses sidestuses järjestikku-toitega lampgeneraatori

(joonis 20. 1) vajalikule sagedusele häälestatud anoodi-võnkering L-C on pooli L_s abil induktiivselt sidestatud elektronlambi võrega. Anoodpingeallika sisselülitamisel ilmub anoodringis voolutõuge, mis laeb võnkeringi kondensaatori, sest pool avaldab algul voolu kiirele muutusele suurt induktiivtakistust. Kondensaator tühjeneb nüüd — sõltumatult anoodvoolu suurusest või suunast — läbi pooli ning võnkeringi omasagedusel tekib võnkumine, mis omakorda indutseerib võre ja katoodi vahele lülitatud sidestuspoolis L_s pinge. Viimane muudab võre potentsiaali ning võib, olenevalt poolide keerdude omavahelisest suunast, tugevdada või nõrgendada anoodvoolu. Ühel juhul hakkab elektronlambi võrepinge poolt tüüritav anoodvool t o e t a m a omavõnkumist võnkeringis, teisel juhul aga seda t a k i s t a m a. Esimesel juhul on tegemist positiivse ja teisel juhul — negatiivse tagasisidestusega.



Joonis 20. 1. Järjestikku toidetava anoodringiga induktiivselt tagasisidestatud lampgeneraator.

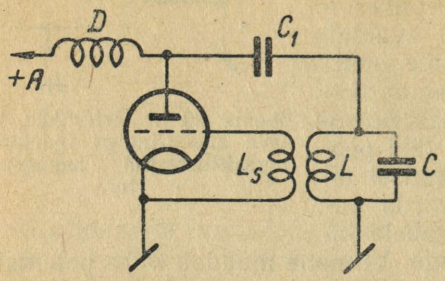
Küllaldaselt tugeva positiivse tagasisidestuse puhul tekib võnkeringis mittesumbuv võnkumine, sest anoodvahelduvvool katab kõik energiakaod. Negatiivse tagasiside korral mõjub anoodvoolu vahelduvkomponent võnkumisele vastu ja viimane sumbub kiiresti.

Võnkumine võib sumbuda ka positiivse tagasiside puhul, kui viimasest ei piisa küllaldase anoodvoolu vahelduvkomponendi tekitamiseks, mis suudaks katta kõik võnkeenergia kaod.

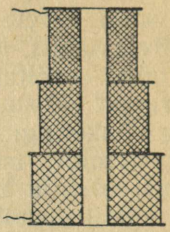
Kui induktiivses sidestuses endaergutusega generaator ei hakka tööle, siis tuleb ühel mähistest vahetada omavahel otsad. Ühesuunaliselt keritud mähiste puhul tekib positiivne tagasiside siis, kui katoodiga on ühendatud võrepooli algus ja anoodiga — võnkeringi pooli lõpp.

Praegukirjeldatu asemel kasutatakse ka rööbitise toitega lampgeneraatorit (joonis 20. 2), mille võnkering on eraldatud kõrgest anoodalalispingest. Elektronlambi anoodi toidetakse kõrgsagedus-paispooli D kaudu ning võnkeringi ergutab sidestuskondensaatorit C_1 läbiv anoodvoolu vahelduvkomponent. Sama kondensaator väldib ka anoodvooluallika lühistumise läbi võnkeringi pooli. Kõrgsagedus-paispool takistab omakorda anoodvoolu vahelduvkomponendi pääsemist vooluallikasse. Seepärast peab tema induktiivsus olema küllaldaselt suur ja parasiitne keerdude vaheline sisemahtuvus võimalikult väike. Viimase piiramiseks mähitakse paispool mitme eraldatud sektsioonina (joonis 20. 3). Paispooli induktiivsus valitakse sõltuvalt genereeritavast sagedusalast. Lühilaineastmikus töötavatel generaatoritel on see induktiivsus umbes 0,5 kuni 2 millihenrit.

Ülekandekondensaatori C_1 talitluspinge peab olema vähemalt kaks korda suurem anoodvooluallika alalispingest. Lühilainetel valitakse selle kondensaatori mahtuvuseks 100 kuni 1000 pikofaradit.



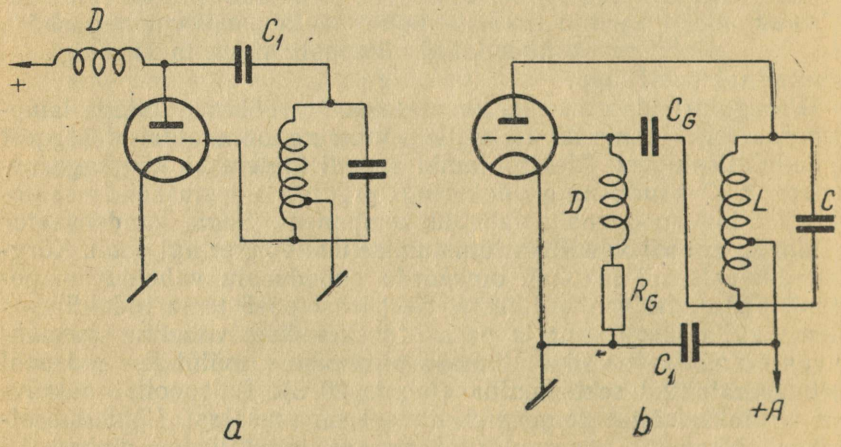
Joonis 20.2. Rööbiti toidetava anoodringiga induktiivselt tagasisidestatud lampgeneraator.



Joonis 20.3. Sektsioonidena keritud kõrgsagedus-paispool.

Induktiivne sidestus anoodringi ja võreringi poolide vahel võib olla kaunis nõrk. Kui mõlemad mähised asuvad kõrvuti või ülestikku ühisel südamikul, siis piisab võreringi pooli keerdude arvuks ühest neljandikust kuni ühest viiendikust anoodringi pooli suurusest.

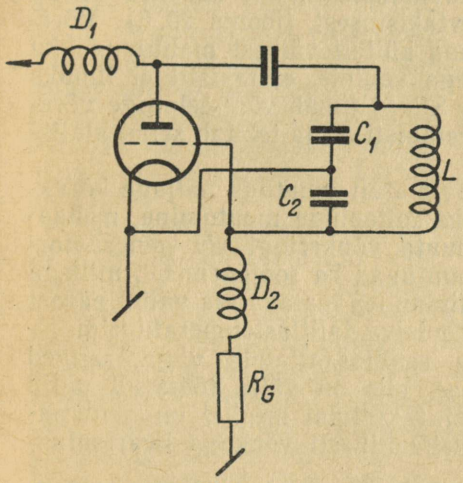
Kolmpunktlülituses endaergutusega kõrgsagedusgeneraatoril võetakse tagasisidestuspinge anoodi võnkeringi pooli ühelt osalt autotransformatoorselt (joonis 20.4). Positiivse tagasiside saamiseks peab pooli üks ots olema ühendatud anoodiga, teine —



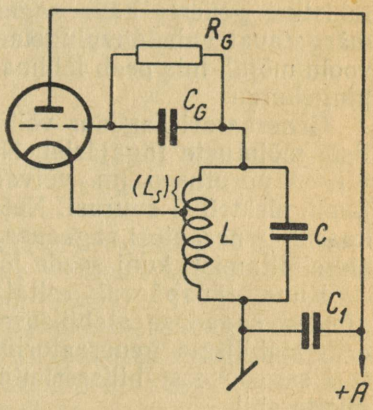
Joonis 20.4. Rööbiti (*a*) ning järjestikku toidetava anoodringiga (*b*) kolmpunktlülituses generaator.

võrega ja väljavõte — katoodiga. Sobivat sidestustugevust saab valida pooli väljavõtte asendiga. Tavaliselt tehakse väljavõte ühelt kolmandikult või neljandikult (pooli võrepoolsest otsast arvates). Kuna väljavõte omab katoodi potentsiaali, siis pooli kummaski otsas on pinged selle elektroodi suhtes vastasfaasis ja tekitavad positiivse tagasiside.

Kuna selles lülituses on võremähis ja anoodmähis ühine, siis tuleb kasutada sidestuskondensaatorit ning paispooli kas anoodringis (joonis 20. 4-*a*) või võreringis (joonis 20. 4-*b*), mis väldik-



Joonis 20. 5. Rööbiti toidetava anoodiga mahtuvuslikus kolmpunktlülituses generaator.



Joonis 20. 6. Katoodsidestuses generaator.

sid anoodalalispinge langemist võrele. Anoodi järjestikkutoite korral kasutatavale võre-paispoolile lisatakse veel sageli järjestikku aktiivtakistus R_G, millel võrevoolu tõttu tekkiv pingelang mõjub automaatse eelpingena.

Kolmpunktlülituse erikuju, mida kujutab joonis 20. 5, erineb eelmistest vaid sellega, et tagasisidestuse pinge antakse võrele mahtuvuslikult pingejagajalt anood-võnkeringist. Anoodringi poolil puudub niisugusel juhul väljavõte, kuna aga võnkeringi mahtuvuse moodustab kaks järjestikust kondensaatorit. Kondensaatorite ühisele punktile antakse katoodi potentsiaal. Tagasisidestuse tugevust muudetakse kondensaatorite C_1 ja C_2 mahtuvuste sobiva suhte valikuga. Mida väiksem on C_2 mahtuvus, seda suurem on võrele langev osapinge ja seda tugevam on tagasiside.

Katoodsidestuses generaator (joonis 20. 6) on induktiivse kolmpunktlülituse erikuju, milles võnkeringi pooli üks ots ühendatakse võrega, väljavõte — katoodiga ja teine ots — üldmiinusega.

Pooli üldmiinusega ühendatud otsa võib lugeda vahelduvvoolu mõttes ühendatuks anoodiga läbi anoodvooluallikat sildava kondensaatori C_1. Seega sarnaneb, vaatamata vormilisele erinevusele, katoodsidestusega generaatorlülitus täpselt tavalise induktiivse kolmpunktlülitusega.

Sellises lülituses on lambi anood vahelduvvoolu mõttes maandatud — sellest ka nimetus: *maandatud anoodiga induktiivne kolmpunktlülitus.*

Kõrgsagedusgeneraatorite eelpingestamiseks kasutatakse sageli võreringi lülitatud nn. võrekomplekti, mis koosneb paralleelsest kondensaatorist ja aktiivtakistusest (joonis 20. 6). Võrekondensaator C_G peab siin omama küllalt väikest mahtuvuslikku takistust genereeritava sagedusega voolule, et takistil ei ilmuks märgatavat vahelduvpingelangu. Siingi ilmub võre-eelpinge võrevoolu mõjul, mis peab läbima võretakisti R_G ja tekitab sellel alalispingelangu.

Generaatori sagedus võib soovimatult muutuda paljude kõrvaliste mõjutuste tagajärjel. Näiteks toitepinge muutumine, mehaanilised põrutused jm. võivad muuta võnkeringi või generaatorlambi elektrilisi suurusi. Need muutuvad ka soojenemisel, millega kaasub generaatori sageduse «triivimine» teatava aja vältel pärast sisselülitamist, kuni seade jõuab püsiva talitlustemperatuurini.

Kuna tänapäeval esitatakse raadiosaatjatele väga ranged nõuded sageduse stabiilsuse osas, siis on välja töötatud palju eriti stabiilseid generaatorlülitusi. Kindlaim meetod on generaatori sageduse stabiliseerimine mehaaniliselt võnkuva kvartsplaadikese abil.

Täpselt lihvitud kandiline või ümmargune tasaparalleelne kvartskristallist või turmaliinist plaadike varustatakse kahe metallkattega või paigutatakse massiivsete metallelektroodide vahele ja moodustatakse niiviisi piesoelement. Kvartsplaadike hakkab elektroodidele rakendatud vahelduvpinge mõjul mehaaniliselt võnkuma, kuid ühel teataval sagedusel esineb resonants ja võnkeamplituud muutub eriti suureks. Mehaanilise resonantsi sagedus sõltub ainult plaadikese paksusest ja vähesel määral ka temperatuurist ning on väga püsiv suurus. Kvartskristalli omavõnkesagedus avaldub ligikaudselt valemist:

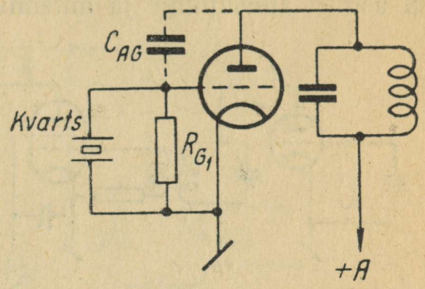
$$f_{kvarts(\mathrm{MHz})} \approx \frac{2{,}7}{d},$$

kus d on kristalli paksus millimeetrites.

Kvartsi abil stabiliseeritava generaatori (joonis 20. 7) võrering on varustatud vajalikku omavõnkesagedust omava kvartsiga. Tagasisidestuse kaudu [1] kristallile mõjuv kõrgsageduspinge teki-

[1] Lühilainetel piisab kvartsi abil stabiliseeritava generaatori tagasisidestamiseks vaid sellest energiahulgast, mis satub anoodringist võreringi üle elektronlambi elektroodide vahelise mahtuvuse, mistõttu polegi tarvis lisada skeemi selleks erilisi sidestuselemente. Pikematel lainetel kasutatakse lisaks induktiivset või mahtuvuslikku tagasisidet.

tab selle mehaanilise võnkumise omasagedusega ühtimisel tugeva võnkumise, mis omakorda põhjustab piesoefekti tõttu kõrgema vahelduvpinge ilmumise kristalli elektroodidele. Resonantsipinge kristallil võib tõusta kuni mitme tuhande kordseks, võrreldes temale juhitava ergutuspingega. Kristalli elektroodide pinge mõjub elektronlambi võrele ja tüürib generaatori anoodvoolu ning võnkumist anoodi samale sagedusele häälestatud võnkeringis. Kvarts mõjub niiviisi justkui suure hüveteguriga võnkering. Tavaliste stabilisaatorkvartside puhul ulatub hüvetegur mitme tuhandeni. Seega on ka kvartskristalli kui omapärase «võnkeringi» resonantsikõver äärmiselt terav.



Joonis 20. 7. Kvartsi abil stabiliseeritav generaator.

Takisti R_{G_1} skeemis joonisel 20. 7 võimaldab võrele langevate elektronide äravoolu katoodile.

Kvartsi abil stabiliseeritava generaatori sagedust ei saa tavalistes lülitustes muuta sujuvalt — igale erinevale sagedusele tuleb kasutada sobivat kristalli. See muudab mõnikord kvartsiga stabiliseerimise ebakohaselt kohmakaks ja ta asendatakse muude sagedust stabiliseerivate vahenditega. Esmajoones stabiliseeritakse generaatorlülituse toitepinged ning rakendatakse see tööle madalamal sagedusel ühes pärastise sageduse mitmekordistamisega järgmistes võimendusastmetes. Üldiselt kehtib reegel, et mida madalam on sagedus, seda kergem on generaatorit stabiliseerida (see kehtib muidugi kõrgsageduse piirkonnas).

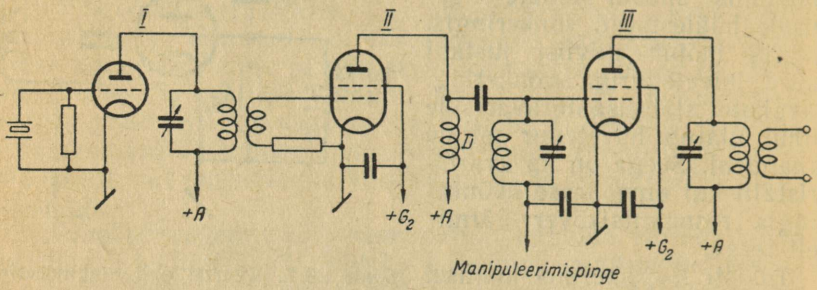
§ 3. KÕRGSAGEDUSVÕIMENDAJA

Suurema võimsusega raadiosaatjate puhul sidestatakse endaergutusega generaatoriga veel üks või mitu kõrgsageduse võimendusastet, milledest viimane — võimsusvõimendaja — toidab saateantenni.

Kõrgsagedusvõimendaja aste sisaldab üht või mitut võnkeringi, sest vastandina helisagedusvõimendajale, mis peab ühtlaselt edasi andma laia sagedusriba, on kõrgsagedusvõimendaja sagedusriba kitsas. Erandiks on ainult sagedusmodulatsiooni puhul ja televisioonitehnikas kasutatavad lairibavõimendajad. Võõrergutusega generaatorastet võib toita kas järjestikku- või rööbiti-lülituses. Astmed sidestatakse enamasti induktiivselt või mahtuvuslikult (joonis 20. 8) ning nendes kasutatakse väikestel võimsustel peamiselt tetroode ja pentoode, suurtel võimsustel aga trioode.

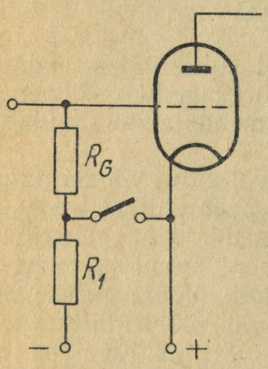
Teksti raadiotelegraafiliseks üleandmiseks tuleb saateanten-

nist väljakiirguvat elektromagnetilist lainet katkestada morsemärkide taktis — saatjat manipuleerida. Seda saab teha näiteks mõne astme anoodringi lülitatud morsevõtmega. See kujutab endast lülitit, mille abil näiteks ka traattelegraafisides tekitatakse morse tähestikule vastavad kestvamate ja lühemate voolutõugete kombinatsioonid. Allavajutamata morsevõtme korral puudub sellel astmel anoodpinge ja antennis võnkumist pole.



Joonis 20. 8. Kõrgsagedusvõimendaja astmete induktiivne (I—II) ja mahtuvuslik (II—III) sidestamine.

Teine võimalus on manipuleerida mõnes võreringis — andes allavajutamata võtme korral ühe või mitme astme võredele suure negatiivse alalispinge, mis sulgeks lambi — katkestaks anoodvoolu (joonis 20. 9). Võtme allavajutamisel mõjub võrele normaalne eelpinge, mis tekib võrevoolu tõttu takistil R_G, ning saatja kiirgab välja lühema või kestvama elektromagnetilise laine impulsi. Takisti R_1 ülesanne on vältida võrepingeallika asjatut lühistumist allavajutatud võtme korral.

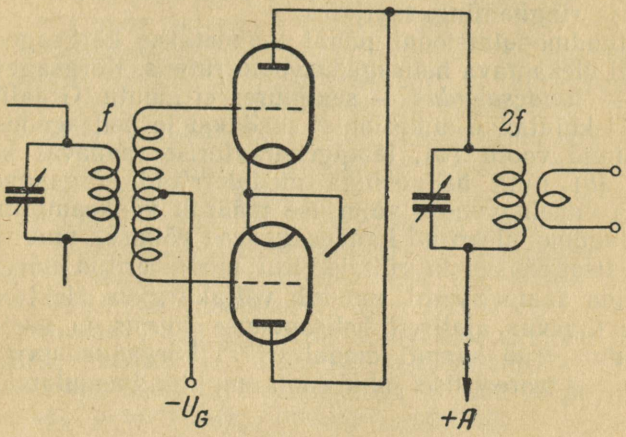


Joonis 20. 9. Saatja astme manipuleerimine võre-eelpingega.

Kui lühi- või ultralühilainesaatjas kasutatakse madalamal sagedusel töötavat endaergutusega generaatorit, siis peab sellele järgnema üks või mitu sageduskordistajana toimivat võimendusastet.

Sageduskordistaja oma lihtsaimal kujul ei erine võimendajast, kuid töötab erilises režiimis. Tüürpinge ja eelpinge, mis juhitakse sageduskordistaja võrele, peavad olema mitu korda suuremad kui normaalse võimendaja puhul. Suure negatiivse eelpingega nihutatakse lambi talitluspunkt tunnusjoone vasaku kõveruse taha, nii et tüürpinge puudumisel poleks anoodvoolu (*C-klassi režiim*). Võimendajas arenevad siis suured ebalineaarmoonutused: anoodvool esineb ainult tüür-

pinge positiivsete tippude vältel. Samuti nagu B-klassi režiimis helivõimendajate puhul, nii avaldub ka siin ebalineaarmoonutus harmooniliste sageduste ilmumisena võimendatavasse vahelduvpingesse. Need harmoonilised sagedused — põhisageduse kahe-, kolme- jne. kordsed võnkumised — võivad anda anoodi võnkeringil suure pingelangu, kui viimane on häälestatud just sellele sagedusele.



Joonis 20. 10. Vastastaktlülituses sageduse kahekordistaja.

Vastastaktlülituses sageduse kahekordistaja (joonis 20. 10) töötab põhimõttel, et kahe 180-kraadise faasinihkega tüüritava lambi ühises anoodringis esinevad ainult põhisageduse paarisarvulised harmoonilised võnkumised, kuid paarituarvulisi (kaasa arvatud ka esimene harmooniline ehk põhisagedus) pole. See lülitus annab anoodringis tunduvalt suurema võimsuse kui harilik kahekordistaja; viimase väljandvõimsus põhisageduse teisel harmoonilisel saab parimal juhul küündida 50 protsendini sellest, mida ta toodaks hariliku võimendajana.

Vastastaktlülituses sageduse kahekordistaja võrering ei erine hariliku vastastaktvõimendaja lülitusest, kuid anoodid on ühendatud kokku ühisele koormusele — tüürpinge kahekordsele sagedusele häälestatud võnkeringile. Siingi eelpingestatakse võred selliselt, et ilmuksid suured ebalineaarmoonutused.

§ 4. AMPLITUUDMODULATSIOON

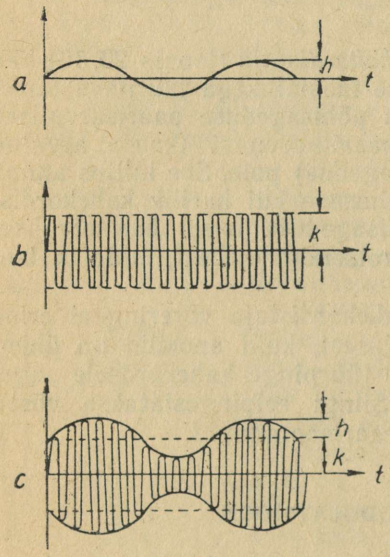
Igasugune raadiotelefoniline side, nagu ringhäälingusaade ja televisiooni helitaust, toimub saateantenni juhitava kõrgsagedusvõnkumise moduleerimise teel. Raadiotehnikas mõistetakse *modu-*

latsiooni all kõrgsagedusvoolu mõjustamist madalama sagedusega voolu poolt.

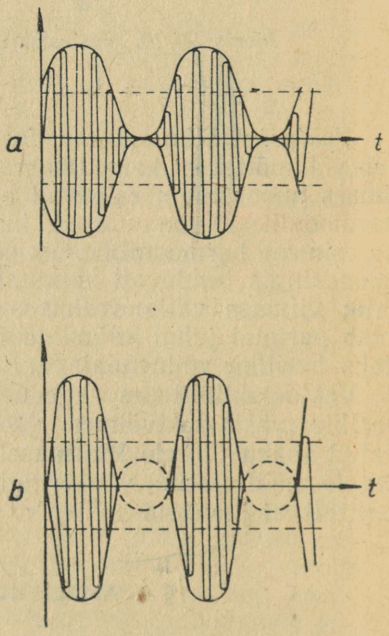
Ringhäälingutehnikas kasutatakse kahte moduleerimisviisi: amplituud- ja sagedusmodulatsiooni. Lisaks nendele on võimalikud veel pulss- ja faasmodulatsioon. Amplituudmodulatsiooniga töötavad kõik ringhäälingusaatjad pikk-, kesk- ja lühilaineil; sagedusmodulatsiooni kasutatakse ultralühilainelistes televisiooni helisaatjates ja ringhäälingusaatjates.

Amplituudmodulatsiooni puhul muudetakse kõrgsagedusvoolu amplituudi ülekantava helisagedusvoolu rütmis. Kõrgsagedusvoolu sagedus — *kandesagedus* — sealjuures ei muutu. Graafikud joonisel 20. 11 kujutavad mikrofonist saadavat ja helisagedusvõimendajat läbinud voolu (*a*), lampgeneraatorist saadavat kõrgsagedusvoolu (*b*) ning helivooluga moduleeritud kõrgsagedusvoolu (*c*). Kuna vahelduvvoolu võimsuse määrab võnkeamplituud, siis ka amplituudmoduleeritud kandesageduse võimsus muutub moduleeriva helisagedusvoolu rütmis. Kui moduleeritud kõrgsagedusvool juhtida saateantenni, muutub väljakiirguva elektromagnetilise laine tugevus ajaliselt helisageduse rütmis ja vastuvõtuantennis indutseerub samuti moduleeritud kõrgsagedusvool.

Lihtsaimal teoreetilisel juhul saab amplituudmodulatsiooni teki-



Joonis 20. 11. Amplituudmoduleerimine: *a* — helisagedusvool, *b* — kõrgsagedusvool, *c* — amplituudmoduleeritud kõrgsagedusvool.



Joonis 20. 12. Sajaprotsendilise (*a*) ja ülemoduleeritud (*b*) võnkumise graafik.

tada saateantenni lülitatud süsimikrofoni abil: mikrofoni takistus ja seega ka kõrgsagedusvoolu võnkeamplituud antennis hakkab muutuma mikrofoni tabava heli taktis — ilmnebki amplituudmodulatsioon. Selline primitiivne moduleerimisviis pole siiski mõeldav mikrofonis ilmnevate suurte energiakadude tõttu.

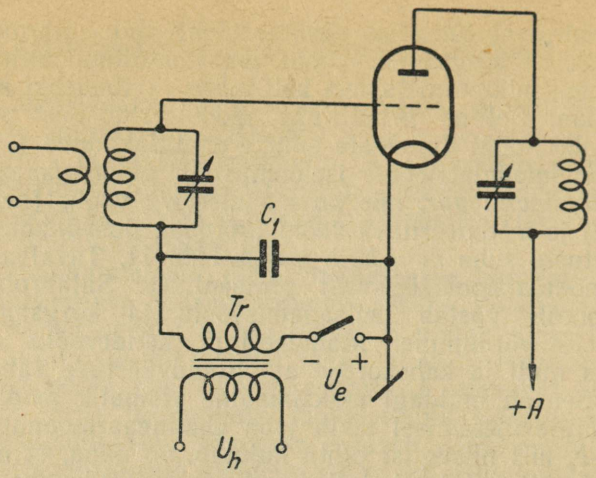
Amplituudmodulatsiooni iseloomustab *modulatsioonisügavus* ehk *modulatsioonitegur*, mis on moduleeriva voolu (helisagedusvõnkumise) ja moduleeritava voolu (kõrgsagedusvõnkumise) amplituudväärtuste suhe $m = h : k$ joonisel 20. 11. Tavaliselt väljendatakse modulatsioonisügavust protsentides. Sajaprotsendilisele modulatsioonile vastab helisagedusvoolu ja kõrgsagedusvoolu amplituudide võrdumine. Moduleeritud kandevoolu amplituud kõigub siis nulli ja kahekordse amplituudväärtuse vahel (joonis 20. 12-*a*). See on muidugi maksimaalne võimalik modulatsioonisügavus, mille ületamisel tekib juba ebalineaarmoonutus. Jooniselt 20. 12-*b*, mis niisugust juhtu kujutab, on näha, et moduleeriv vool lõikab ülemoduleerimisel kandevoolu üksikuteks impulssideks. Ülemoduleeritud kõrgsagedusvoolu amplituud ei muutu enam täpses kooskõlas moduleeriva helivooluga ning see avaldub vastuvõtjas kuuldava heli tunduva ebalineaarse moonutusena. Ülemoduleerimise vältimiseks hoitakse kvaliteetsete ringhäälingusaatjate keskmine modulatsioonisügavus 20 kuni 90 protsendi piires ja kasutatakse erilisi amplituudipiiramislülitusi.

Amplituudmoduleerimise lülitustest vaatame lähemalt kahte: võre- ja anoodmodulatsiooni. Mõlemal juhul mõjub helisagedusvõimendajas — *modulaatoris* — vajaliku tasemeni võimendatud helisageduspinge saatja ühe või mitme kõrgsagedus-võimendusastme lambi vastavale elektroodile ja liitubki võimendatava kõrgsageduspingega.

Võremodulatsiooni puhul antakse saatja ühele võimendusastmele selline võre-eelpinge, et anoodvool tekiks vaid tüüriva kõrgsageduspinge positiivsetel poolperioodidel (eelpinge on nii suur, et tüürpinge puudumisel anoodvoolu pole). Moduleerimiseks ühendatakse võreringi madalsagedustrafo *Tr* sekundaarmähis (joonis 20. 13) ja eelpingeallikas. Rööbiti nendele lisatakse sildav kondensaator C_1, mis väldib tarbetu kõrgsagedusliku pingelangu tekkimise transformaatoril ja eelpingeallikal. Olenevalt talitlussagedusest valitakse sildava kondensaatori mahtuvus suurusjärgus umbes 1000 pikofaradit.

Madalsagedustrafo — modulatsioonitrafo — primaarmähist toidab kas madalsagedusvõimendajast või vahetult süsimikrofonist saadav helisagedusvool. Samaaegselt antakse võrele muidugi ka võimendatav püsiva amplituudiga kõrgsageduspinge. Niisiis kujuneb anoodringis kõrgsagedusvoolu amplituud juba sõltuvaks moduleerivast helisageduspingest.

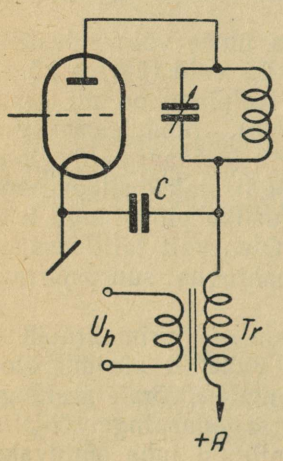
Anoodmodulatsiooni rakendamine saatja lõppastmes tagab enamasti tunduvalt parema helikvaliteedi kui võremodulatsioon.



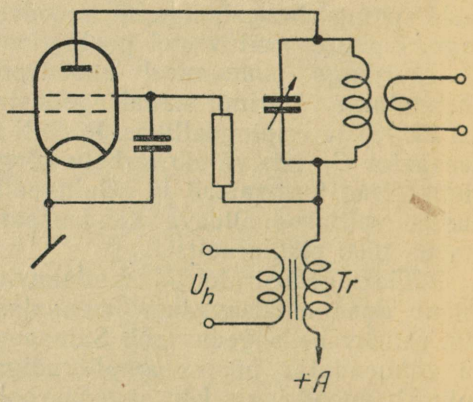
Joonis 20. 13. Amplituudmoduleerimine saatja kõrgsagedusastme võreringis.

Selle puhul toidetakse lõppastme anoodi helisageduse rütmis muutuva pingega. Vastavalt pinge hetkväärtusele muutub ka võnkumise amplituud anoodringis ja sellest saadav kõrgsagedusvõnkumine osutubki moduleerituks.

Anoodalalispinge mõjustamiseks helisageduspingega võib kasutada modulatsioonitrafot *Tr*, mille sekundaarmähist läbib lõppastme anoodvool ja primaarmähist toidab modulaatorist saadav



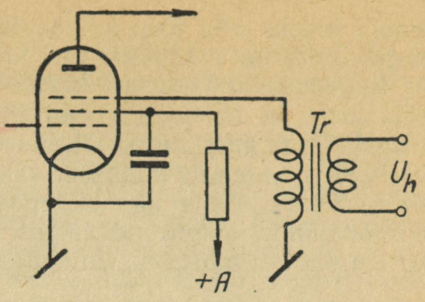
Joonis 20. 14. Amplituudmoduleerimine saatja kõrgsagedusastme anoodringis.



Joonis 20. 15. Amplituudmoduleerimine saatja kõrgsagedusastme anood- ja varivõreringis.

helisagedusvool (joonis 20. 14). Modulaatoris võimendatud helisageduspinge liitub modulatsioonitrafo sekundaarmähises anoodvooluallika alalispingega ja kõrgsagedusastme anoodil hakkab mõjuma helisagedusvoolu rütmis pulseeriv pinge.

Modulaatorvõimendaja väljandvõimsus peab anoodmodulatsiooni puhul olema vähemalt võrdne moduleeritava kõrgsagedusastme võimsusega. Vastasel korral ei ole võimalik saatjat sajaprotsendiliselt moduleerida.

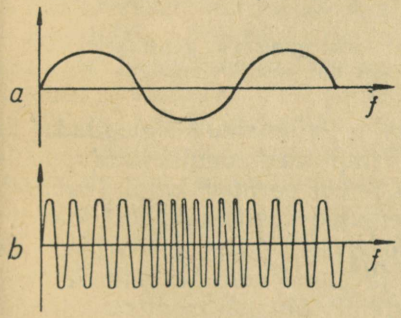


Joonis 20. 16. Amplituudmoduleerimine saatja kõrgsagedusastme sulgvõreringis.

Tetroodide ja pentoodide kasutamisel saatja lõppastmes on tulus kasutada üheaegset anood- ja varivõremodulatsiooni (joonis 20. 15), mille puhul pinge nii anoodil kui ka varivõrel muutub helisageduslikult. Samuti kasutatakse pentoodide sulgvõre-modulatsiooni, millega võib soodsal juhul saada väikese helivoolu võimsuse juures sügava ja moonutustevaba modulatsiooni (joonis 20. 16).

§ 5. SAGEDUSMODULATSIOON

Sagedusmodulatsiooni puhul mõjub moduleeriv vool kõrgsagedusvõnkumise sagedusele, kusjuures selle amplituud ei muutu. Moduleeriva voolu (joonis 20. 17-*a*) ühel poolperioodil moduleeritud voolu (*b*) sagedus suureneb ja teisel poolperioodil väheneb. Nii hakkab kõrgsagedusvoolu sagedus kõikuma moduleeriva voolu rütmis ümber moduleeritava sageduse.



Joonis 20. 17. Sagedusmoduleerimine: *a* — helisagedusvool, *b* — sagedusmoduleeritud kõrgsagedusvool.

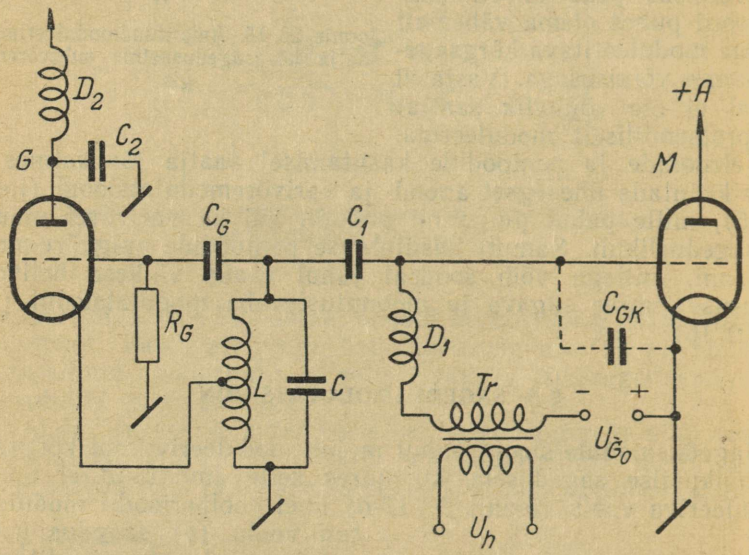
Maksimaalset sageduse muutumise «amplituudi» $(\Delta f)_{max}$ nimetatakse sageduse *deviatsiooniks*. Deviatsiooni ja moduleeriva sageduse F suhet

$$a = \frac{(\Delta f)_{max}}{F}$$

nimetatakse *sagedusmodulatsiooni indeksiks* ja see on teataval määral analoogiline modulatsioonitegurigа amplituudmodulatsiooni korral, kuna ta iseloomustab moduleerimise «sügavust». Kui deviatsioon on väiksem moduleerivast sagedusest, on modulat-

siooni indeks alla ühe; kui deviatsioon on suurem moduleerivast sagedusest, on modulatsiooni indeks üle ühe.

Sagedusmodulatsiooni kasutamine vähendab tunduvalt atmosfääriliste ja tööstuslike häirete segavat mõju raadiosidele või ringhäälingu programmi jälgimisele. Need häired muudavad ainult vastuvõtja antennis indutseeriva pinge amplituudi, mitte aga sagedust. Kuna aga sagedusmoduleerimise korral kõrgsagedusvõnkumise amplituudväärtus helisignaale edasi ei kanna, siis ka amplituudi häired vastuvõtule peaaegu mingit mõju ei avalda.



Joonis 20. 18. Sagedusmoduleerimine endaergutusega generaatori *G* võreringi mahtuvuse mõjutamise teel nn. «reaktiivlambiga» *M*.

Sagedusmodulatsiooni kasutamine võimaldab laiendada ka ülekantava heli sagedusriba. Kui amplituudmoduleeritud kunstiline raadiosaade hõlmab üldiselt 4,5- või parimal juhul (kohaliku saatja programmi jälgimisel kõrgemasse kvaliteediklassi kuuluva ringhäälinguvastuvõtjaga) 6,5-kilohertsist helisagedusriba, siis sagedusmoduleeritud kohaliku saatja puhul võib kõrgeimaid helisagedusi üle kanda kuni 15 kilohertsini (tänapäeva ultralühilaineringhäälingujaamades kuni 12 kilohertsini).

Sagedusmoduleerimine tuleb teostada juba saatja esimeses astmes — endaergutusega kõrgsagedusgeneraatoris. Generaatori sageduse mõjutamine võib toimuda mitmeti. Vaatleme siin üht lihtsamat meetodit (joonis 20. 18). Rööbiti endaergutusega generaatori *G* võnkeringiga on kondensaatori C_1 kaudu ühendatud modulaatorlambi *M* võrering. Seega mõjub generaatori võnkeringis lisaks mahtuvusele *C* ka modulaatorlambi võre-katoodi vahe-

line mahtuvus (joonisel näitlikult punktiiris kujutatud C_{GK}). Nende mahtuvuste summa ja võnkeringi induktiivsus määravad genereeritava võnkumise sageduse.

Modulaatorlambi võreringi on kõrgsageduspaispooli D_1 kaudu lülitatud modulatsioonitrafo *Tr* ja eelpingeallikas. Kui elektronlambi *M* võrel mõjub trafo sekundaarmähisest saadav helisagedus-pinge, siis olenevalt selle hetkväärtusest on katoodi ümber rohkem või vähem ulatuslik ruumlaeng (positiivsema võre puhul on ruumlaengu moodustavad elektronid võrele lähemal kui negatiivsema võre puhul). Vastavalt ruumlaengu kihi «paksusele» ning «tihedusele» muutub ka lambi katoodi ja võre vaheline sisemahtuvus C_{GK} ning generaatori sagedus hakkabki kõikuma moduleeriva helisageduse rütmis.

Kondensaator C_1 on vajalik selleks, et võre-eelpinge allikas ei lühistuks läbi pooli *L*. Paispool D_1 hoiab ära võnkeringi lühistumise (kõrgsageduse mõttes) läbi modulatsioonitrafo sekundaarmähise ja eelpingeallika.

§ 6. RIBALAIUS

Modulatsiooni puudumisel toimub võnkumine raadiosaatja antennis ainult ühel sagedusel — kandesagedusel. Kõrgsagedusvoolu amplituudi moduleerimisel madalsagedusvooluga tekib liitvõnkumine, mis sisaldab komponentidena kandesagedust f ja sellest madalsageduse F võrra erinevaid *külg-* ehk *kõrvalsagedusi* $f + F$ ja $f - F$. Nii tekivad näiteks kandesageduse $f = 1000$ kHz moduleerimisel helisagedusega $F = 1$ kHz kõrvalsagedused $f + F = 1000 + 1 = 1001$ kHz ja $f - F = 1000 - 1 = 999$ kHz. Kui aga moduleeriva voolu sagedus oleks 2 kHz, siis ilmuksid kõrvalsagedused vastavalt 1002 ja 998 kHz.

Raadio kaudu ülekantav helisagedusvool pole kunagi siinuseline lihtvõnkumine, vaid on liitvool, mis koosneb reast erinevate sageduste ja amplituudidega komponentidest. Moduleerimisel annab iga niisugune komponent o m a paari kõrvalsagedusi. Kogusummas «täidavad» need teatava laiusega sagedusriba Δf, mida peab üle kandma nii saatja kui ka vastuvõtja kõrgsagedusvõimendaja. Selle tingimuse mittepiisaval täitmisel ilmub lineaarmoonutus, mis avaldub kõrgemate helisageduste suhtelises nõrgenemises.

Kandesagedust ümbritsevaid sageduspiirkondi, kuhu kõik kõrvalsagedused langevad, nimetatakse *külg-* ehk *kõrvalribadeks*. Kumbki külgriba ulatub amplituudmodulatsiooni puhul kandesagedusest sellise «kauguseni», mis vastab kõrgeimale ülekantavale modulatsioonisagedusele. Kui näiteks Tallinna ringhäälingusaatja, mis töötab 1034 kilohertsil ($\lambda = 290{,}1$ m), kannab üle sõnalist või muusikalist programmi sagedusribas 60 kuni 8000

hertsi, siis tema kõrvalribad haaravad enda alla kokku sagedusriba vahemikus 1034 — 8 = 1026 kuni 1034 + 8 = 1042 kilohertsi. On pikemata selge, et amplituudmoduleeritud raadiosaatja poolt hõlmatav sagedusriba on kaks korda laiem kui kõrgeim moduleeriv sagedus.

Toodud näites vajab saatja 16-kilohertsilist sagedusriba, et kanda üle helisagedusi 8 kilohertsini. Teisest küljest pole aga pikk-, kesk- ja kohati isegi lühilaineastmikes enam võimalik kindlustada igale saatjale vajaliku laiusega sagedusriba. Näiteks kesklaineile, mis hõlmab sagedusala 1500 kuni 500 kilohertsi, «mahuks» üheaegselt töötama kõigest umbes kuuskümmend viis saatjat, kui neist igaüks vajaks 16 kilohertsi laiust sagedusriba ehk *saatekanalit*. «Ruumipuudus» laineastmikes sunnibki ühelt poolt piirama saatekanalite laiust 9 kilohertsini (mis võimaldab vastu võtta kõigest kuni 4,5 kilohertsini küündivaid helisid) ja teiselt poolt sünkroonsete ühislaine-saatevõrkude üha suuremat kasutamist. Viimased moodustatakse omavahel sidestatud ja täpselt samal lainepikkusel töötavatest saatjatest, mis levitavad ühist programmi. Ühislaine-saatevõrgud on otstarbekad juhul, kui on vajalik selle programmi laitmatu vastuvõtt suurel territooriumil.

Selleks et tagada vähemalt kohalike saatjate programmi laitmatut vastuvõttu, võeti kasutusele sagedusmoduleeritud ultralühilaine. Ultralühilaineribades «ruumipuudust» karta ei ole ja seepärast pole tarvidust üksikute saatjate moduleerimisel tekkivate külgribade ulatuse kärpimiseks.

Sagedusmodulatsiooni puhul kujuneb saatekanal tavaliselt palju laiemaks kui amplituudmoduleerimisel. Saatekanali laiust sagedusmoduleerimisel saab ligikaudselt määrata moduleeriva sageduse F ja modulatsiooni indeksi a kaudu:

$$f_{max} - f_{min} \approx 2F\,(1 + a + \sqrt{a}).$$

Näide. Moduleeriva sageduse $F = 10$ kilohertsi ja modulatsiooni indeksi $a = 5$ juures kujuneb sagedusriba laiuseks

$$f_{max} - f_{min} \approx 2 \cdot 10\,(1 + 5 + \sqrt{5}) = 20(1 + 5 + 2{,}24) = 165 \text{ kHz}.$$

Väga laia saatekanali pärast kasutataksegi sagedusmodulatsiooni peamiselt ultralühilainetel ning üldse mitte kesk- või pikklaine astmikes. Kahjuks ei taga veel kaasaegne tehnika kindlat kaugvastuvõttu ultralühilainetel.

21. PEATÜKK

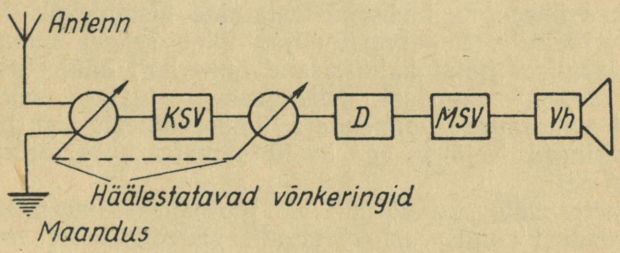
RAADIOVASTUVÕTJAD

§ 1. ÜLDKÜSIMUSED

Raadiovastuvõtjad jagunevad oma talitluspõhimõttelt kahte liiki — otsevõimendus- ja superheterodüünvastuvõtjateks.

Otsevõimendusvastuvõtja põhilisteks koostisosadeks on antenniga sidestatud sisendvõnkering, kõrgsagedusvõimendaja, detektoraste, madalsagedusvõimendaja, valjuhääldaja ja toiteseadis.

Kõik vastuvõtja kõrgsagedusosa võnkeringid häälestatakse vastuvõetavale sagedusele ning nende abil toimub selektsioon — vastuvõetava saatja signaali väljafiltreerimine mittevajalikest. Kõrgsagedusvõimendajas (lühend: *KSV*) suureneb signaali võnkeamplituud detektorisse *D* juhtimiseks vajaliku väärtuseni. Detek-



Joonis 21. 1. Otsevõimendusvastuvõtja plokkskeem.

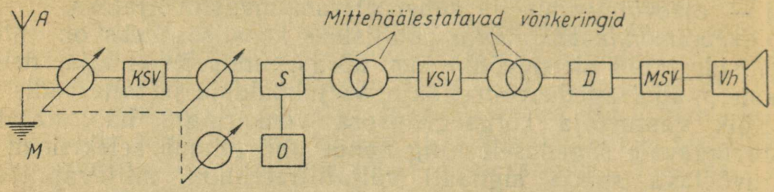
toris vabaneb moduleeriv helisagedusvool kõrgsageduslikust kandevõnkumisest; esimest võimendatakse järgnevas madalsagedusvõimendajas (*MSV*) ja juhitakse siis valjuhääldajasse *Vh*. Otsevõimendusvastuvõtja lülitust iseloomustab plokkskeem joonisel 21. 1.

Superheterodüünvastuvõtjas (lühemalt: *supervastuvõtjas*) toimuvad keerukamad protsessid. Pärast selekteerimist sisendvõnkeringis ja esialgset võimendamist kõrgsagedusvõimendajas (viimane võib ka puududa) toimub erilises segustusastmes *S* vastuvõetava signaali sageduse muundamine. Selleks mõjustatakse signaali väikeses generaatoris — ostsillaatoris *O* tekitatud kõrgsagedusvõnkumisega, mille tagajärjel segustusastme väljandis ilmuvad uued sagedused. Üks nendest, nn. vahesageduslik võnkumine (milles säilib saatja esialgse signaali amplituud- või sagedusmodulatsioon) suunatakse järgnevasse *vahesagedusvõimendajasse VSV*. Alles sellele järgneb detektor, madalsagedusvõimendaja ning valjuhääldaja.

Ostsillaatori sagedus valitakse sõltuvalt vastuvõetava signaali kandesagedusest alati niisugune, et tekkiv vahesagedus oleks iga

juhul püsiv. Valdaval enamikul ringhäälingu-vastuvõtjatel on vahesageduseks 465 kilohertsi või sellele lähedased väärtused — 460, 468 või 473 kilohertsi [1].

Vahesageduse püsivus võimaldab selekteerimist ja võimendamist läbi viia põhiliselt vastuvõtja vahesagedusvõimendajas, s. o. ühel kindlal sagedusel. Sellega hoitakse ära arvukate võnkerin-



Joonis 21. 2. Superheterodüünvastuvõtja plokkskeem.

gide tülikas üheaegne ümberhäälestamine üleminekul ühe saatja vastuvõtult teisele. Supervastuvõtjas tuleb selleks muuta ainult ühe või äärmisel juhul kahe sisendvõnkeringi häälestuse kõrval veel ostsillaatori sagedust. Niisuguse vastuvõtja selektiivsuse määravad vahesagedusvõimendaja ümberhäälestamist mittevajavad võnkeringid. Neid on aga ka lihtsamates vastuvõtjates vähemalt kolm-neli.

Superheterodüünvastuvõtja teise paremusena märgitagu ühtlast võimendust kõigil vastuvõetavatel sagedusaladel, mida otsevõimendusvastuvõtjaga pole võimalik saavutada.

Superheterodüünvastuvõtja plokkskeem on toodud joonisel 21. 2.

§ 2. AMPLITUUDMODULEERITUD SIGNAALI DETEKTEERIMINE

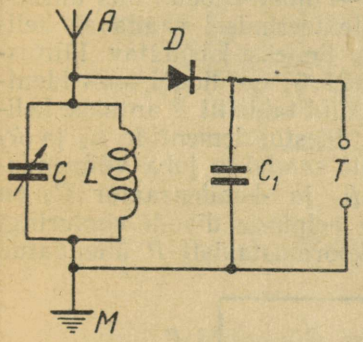
Detektor (*demodulaator*) on vastuvõtja koostisosa, mis eraldab kõrgsagedus- ehk vahesagedusvoolust moduleeriva helisagedusvoolu. Amplituudmoduleeritud kandevõnkumise detekteerimine toimub unipolaarse elektrijuhtivusega lülituselemendi — *detektori* abil, mis alaldab kõrgsagedusvõnkumise.

Lihtsaima raadiovastuvõtja — detektorvastuvõtja — lülitus (joonis 21. 3) sisaldab vastuvõetava jaama kandesagedusele häälestatud sisendvõnkeringi *L-C*, mis sidestatakse (vahetult, induktiivselt või mahtuvuslikult) antenniga *A* ja maandusega *M*, detektorit *D* ning telefoni *T*. Siin muidugi mingit võimendamist ei toimu ja antenni tabavast kõrgsagedusenergiast peab piisama heli tekitamiseks telefonis. Väikese tundlikkuse ja halva selektiivsuse tõttu

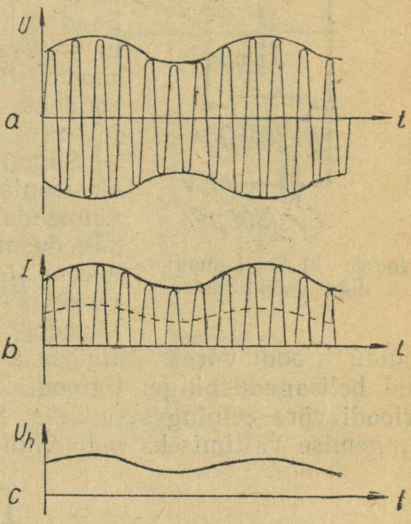
[1] 465 kHz on standardse vahesagedusena kasutusel NSV Liidus toodetavates ja ülejäänud — välismaa päritoluga raadiovastuvõtjates.

sobib selline detektorlülitus ainult lähedaste võimsate raadiosaatjate programmi jälgimiseks. Detektorvastuvõtja ei võimalda vastuvõttu valjuhääldajas.

Detektori ülesande selgitamiseks kasutame graafikuid joonisel 21. 4. Nendest esimene (*a*) kujutab detektorile mõjuvat amplituudmoduleeritud kõrgsageduspinget. See pinge tekitab detektori vooluringis ühesuunalise muutliku tugevusega voolu (*b*), sest teises suunas detektor voolu ei juhi. Alaldatud voolu keskväärtus (*c*) muutub nagu moduleeriv helisagedusvool ning tekitab telefonis heli. Et telefonil ei tekiks asjatut kõrgsage-



Joonis 21. 3. Detektorvastuvõtja lülitusskeem. *D* — pooljuhtdiood või kristalldetektor.

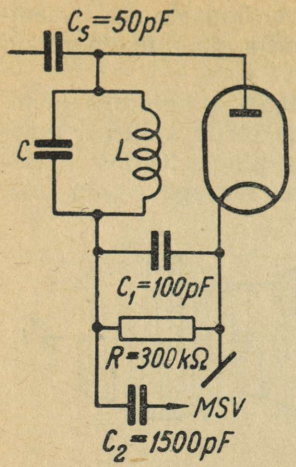


Joonis 21. 4. Amplituuddetekteerimine: *a* — moduleeritud pinge võnkeringis, *b* — alaldatud kõrgsagedusvool detektori ringis ja *c* — selle keskväärtus (helisageduspinge).

duslikku pingelangu, sillatakse see kondensaatoriga C_1, mille suurus on umbes 2000 pikofaradit.

Detektoriks sobib igasugune väikese sisemahtuvusega alaldav pooljuhtseadis, nagu germaanium- või kristalldetektor ning elektronlamp. Kristalldetektor on tinaläike, püriidi vms. kristall, millega luuakse elektriline kontakt ühelt poolt suurepinnalise kristallihoidja ja teiselt poolt vetruva metallteraviku abil. Detektori sisemahtuvus peab olema võimalikult väike, sest vastasel korral väheneks alaldamise efekt tema mahtuvustakistust läbiva voolu arvel.

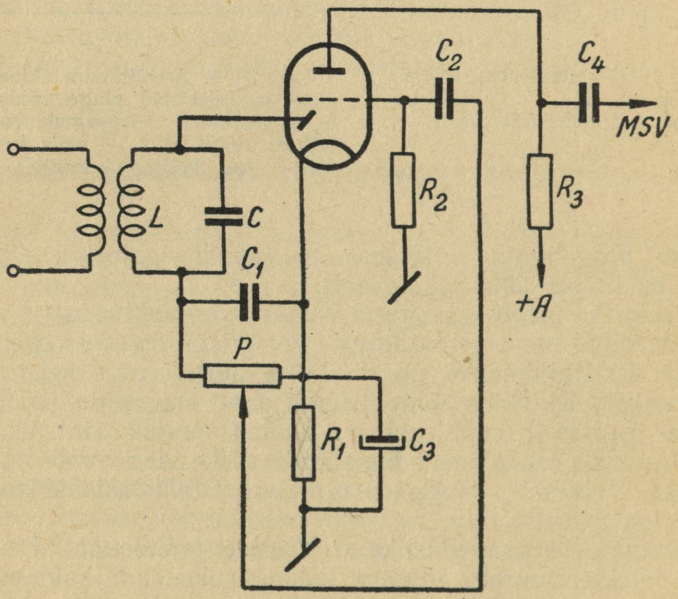
Suuremate kõrgsageduslike signaalide (võimendatud antennivoolu) detekteerimiseks on väga kohane rakendada kahe elektroodiga elektronlampi. Dioodidetektori kasutamisel raadiovastuvõtjas tuleb vastuvõetavat signaali eelnevalt võimendada. Demoduleeri-



Joonis 21. 5. Lampdioodiga detektoraste.

vas lülituses dioodiga (joonis 21. 5) sidestatakse võnkering L-C kõrgsagedusvõimendaja väljandiga ja sellel ilmuv pinge mõjub üle koormustakistit R sildava kondensaatori C_1 dioodi elektroodidele. Tekib alaldamine ja takistit läbib modulatsiooni rütmis muutuvate amplituudidega ühesuunaline kõrgsageduslikult pulseeriv vool. Saadav helisageduspinge (pulseeriva voolu keskväärtusest põhjustatud pingelang koormustakistil) juhitakse läbi sidestuskondensaatori C_2 madalsagedusvõimendajasse.

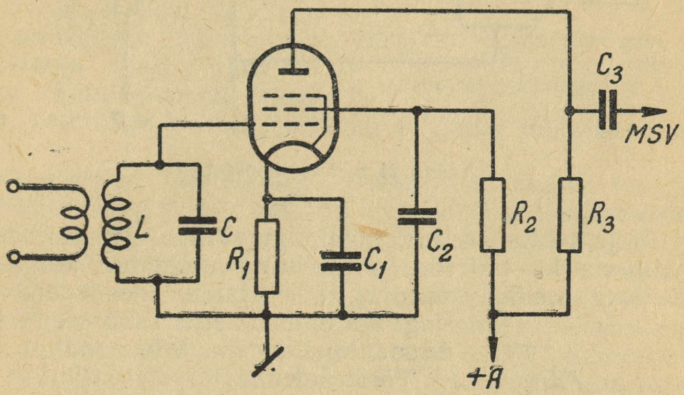
Sageli kasutatakse kombineeritud elektronlampi — diood-trioodi, mis ühtlasi võimendab detekteerimisel saadavat helisageduspinget. Selleks kasutatav lülitusskeem (joonis 21. 6) on dioodi osas identne eelmisega, kuid takistilt P antakse helisageduspinge sidestuselementide C_2 ja R_2 kaudu trioodi võrele. Viimase anoodilt saadakse juba võimendatud helisageduspinge. Katoodtakisti R_1 ja -kondensaator C_3 on trioodi võre eelpingestamiseks. Sama eelpinge dioodi vooluringi langemise vältimiseks pole viimase koormustakisti P ühendatud



Joonis 21. 6. Diood-triood detektorina ja madalsagedusvõimendajana.

üldmiinusega, vaid katoodiga. Pingelang katoodtakistil jääbki niiviisi välja dioodi vooluringist. Takistina *P* on kasutatud potentsiomeetrit, mis täidab helitugevuse regulaatori ülesannet (trioodi võrele juhitav helisageduspinge võetakse selle liugkontaktilt).

Amplituudmoduleeritud signaalide demoduleerimiseks mitmeelektroodilise elektronlambiga on põhiliselt kaks moodust — anood- ja võredetektor.

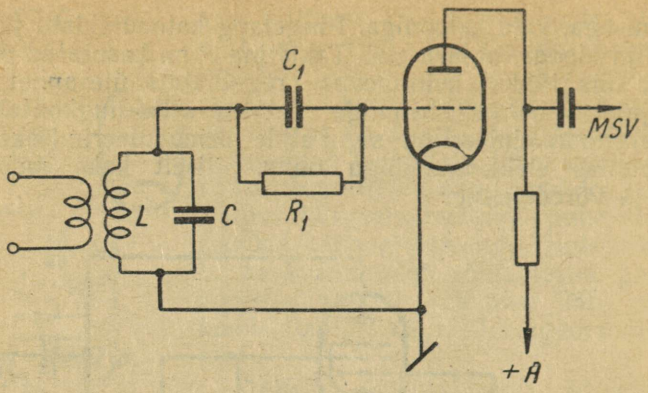


Joonis 21. 7. Anooddetektor.

Anooddetekteerimist teostatakse suurte sisendpingete puhul tavalist kõrgsagedusvõimendajat meenutavas lülituses pentoodiga (joonis 21. 7). Katoodring R_1-C_1 tekitab anoodvoolu alaliskomponendi mõjul püsiva võre-eelpinge, mis viib lambi talitluspunkti võrepinge-anoodvoolu tunnusjoone alumisele kõverusele. Anoodvahelduvvoolus ilmuvad siis tugevad moonutused — vool tekib tõugetena praktiliselt ainult positiivsetel võrevahelduvpinge poolperioodidel; negatiivsed poolperioodid lõigatakse anoodvoolus ära. Seega ilmub anoodvahelduvvool võimendatud, kuid ühesuunaliste, «alaldatud» voolupulssidena.

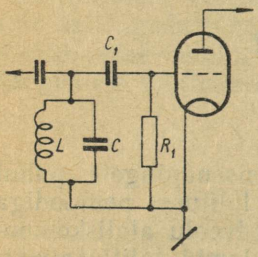
Mitteküllaldase eelpinge puhul, kui talitluspunkt jääb tunnusjoone sirgele osale, töötab lülitus lihtsalt kõrgsagedusvõimendajana ja detekteerimist ei toimu. Pikendatud tunnusjoonega elektronlambid pole anooddetektoriks sobivad.

Lihtsates mõnelambilistes otsevõimendusvastuvõtjates esinevate nõrkade signaalide demoduleerimiseks kasutatakse *võredetektorit* (joonis 21. 8), mis on palju tundlikum anooddetektorist. Selle lambi tüürvõrele eelpinget ei anta ja talitluspunkt asub võrepinge-anoodvoolu tunnusjoone sirgel osal. Elektronlambi võre ja katood toimivad siin dioodina, mis alaldab kõrgsagedusvoolu täiesti analoogiliselt joonisel 21. 5 esitatud skeemiga. Alaldatud voolu amplituudide keskväärtus, s. o. helisagedusvool, läbib võre-



Joonis 21. 8. Võredetektor.

takistit R_1 ja tekitab sellel pingelangu. Viimasega käsikäes hakkab muutuma ka tüürvõre pinge ning alaldatud kõrgsagedusvoolu helisageduslik komponent tüürib lambi anoodvoolu. Anoodringi koormustakistilt saab seega trioodis demoduleeritud ja võimendatud pinget.



Joonis 21.9. Võredetektor.

Võrekondensaator C_1 valitakse suurusega 50 kuni 200 pikofaradit. Võretakisti R_1 suurus on umbes üks megaoom ning teda võib lülitada rööbiti võrekondensaatorile või ka võre ja katoodi vahele (joonis 21. 9).

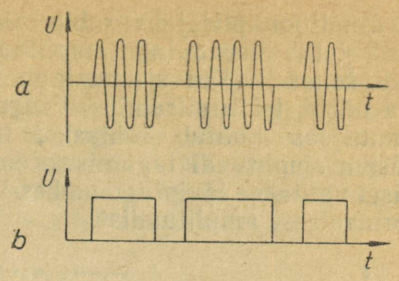
Vanemas kirjanduses nimetati võredetektorit audioniks.

Võredetektori heaks omaduseks on suur tundlikkus. Normaalne detekteerimine toimub selles lülituses võrele langeva kõrgsageduspinge amplituudi ulatumisel kõigest kümmekonna millivoldini. Kahjuks põhjustab võredetekteerimise protsess võrdlemisi suuri ebalineaarmoonutusi. Kaasaegsetes raadiovastuvõtjates kasutatakse võredetektorit harva, sest superheterodüünvastuvõtjas pole tarvidust suure võimendusega detektorastme järele: diooddetektor ühes eelneva vahesagedusvõimendajaga annab paremaid tulemusi.

§ 3. MANIPULEERITUD RAADIOTELEGRAAFISIGNAALI DETEKTEERIMINE

Juhul kui raadiotelegraafisaatja kiirgab välja pidevat kandelainet, mida moduleeritakse helisagedusvooluga morsemärkide rütmis, siis sobivad vastuvõtuks kõik tavalised eelmises paragrahvis kirjeldatud amplituuddetektori lülitused.

Telegraafisignaalide manipuleerimine saatjas võib toimuda moduleerimata kandelaine tekitamise ja katkestamisega vastavalt morsemärkidele. Pärast niisuguste signaalide (joonis 21. 10-*a*) detekteerimist saadakse morsemärkidele vastavad alalisvoolu impulsid (*b*), mis muidugi ei sobi vahetuks kuuldevastuvõtuks: telefon või valjuhääldaja alalisvoolule ei reageeri. Ainult voolu tekkimise ja katkemise momendil ilmub telefonis lühiajaline naksuv heli.



Joonis 21. 10. Moduleerimata telegraafisignaalide (*a*) alaldamisel saadavad vooluimpulsid (*b*).

Manipuleeritud kandelaine kuuldevastuvõtuks kasutatakse detektorastmes regeneratiivlülitusi [1] või väikest lampgeneraatorit, mis häälestatakse mõnesaja hertsi võrra kõrvale vastuvõetavast kandesagedusest (superheterodüünvastuvõtjas — vahesagedusest). Kandesageduse või vahesageduse ja lampgeneraatori võnkumiste vahel tekib interferents, mis avaldub helisagedusvõnkumisena. Viimase sagedus võrdub kummagi interfereeriva võnkumise sageduste vahega. Telefonis või valjuhääldajas ilmub kuuldav heli muidugi ainult ajal, kui korraga mõjuvad mõlemad kõrgsagedusvõnkumised.

§ 4. SAGEDUSMODULEERITUD SIGNAALI DETEKTEERIMINE

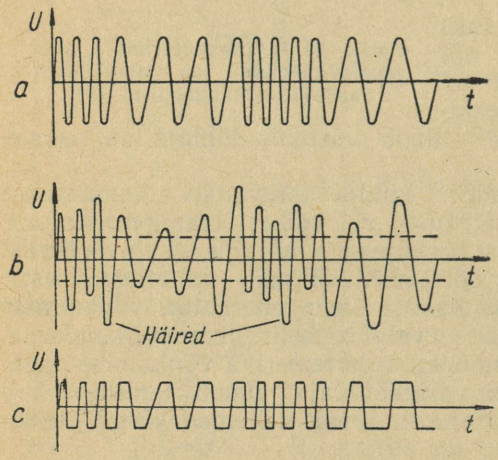
Sagedusmoduleeritud signaali detekteerimist võib jaotada kolmeks etapiks: amplituudi piiramiseks, sagedusmodulatsiooni muundamiseks amplituudmodulatsiooniks ja viimase alaldamiseks, s. o. tegelikuks detekteerimiseks.

Kuigi sagedusmoduleeritud saatja kiirgab püsiva amplituudiga elektromagnetilist võnkumist, mille sagedus muutub sõltuvuses moduleerivast helisagedusvoolust, mõjuvad vastuvõtuantenni indutseeritud pinge amplituudile mitmesuguse päritoluga raadiohäired. Selliselt kujuneb nagu kahekordne modulatsioon: kasulik sageduse osas ja kahjulik amplituudi osas. Viimasest vabanemiseks juhitakse võimendatud sagedusmoduleeritud signaal enne detekteerimist läbi amplituudipiiraja.

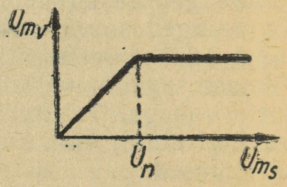
Amplituudipiiraja ülesandeks on kõikuva amplituudiga vahelduvpinge muutmine püsiva amplituudiga võnkumiseks. Joonisel 21. 11 on kujutatud sagedusmoduleeritud pinge saateantennis (*a*), sama ühes liitunud häirepingetega vastuvõtjas enne (*b*) ja pärast amplituudipiirajat (*c*).

[1] Regeneratiivlülitusi käsitletakse järgmises paragrahvis.

Amplituudipiirajaks sobib seadis, mille väljandpinge amplituud sõltub sisendpinge amplituudist joonisel 21. 12 toodud graafiku kohaselt. Kui sisendpinge ületab tunnusjoone tõusva sirge osa piirid, tekib piiramine. Pinget U_n, mille juures piirajalülituse tunnusjoon muutub rõhtsaks, nimetatakse piiraja lävipingeks. Püsiva amplituudi tagamiseks ka signaalipinge juhuslikul langemisel valitakse lävipinge umbes kolm korda väiksem signaalipinge normaalsest amplituudist.



Joonis 21. 11. Amplituudipiiraja toime sagedusmoduleeritud signaali vastuvõtjas: *a* — pinge saateantennis, *b* — vastuvõtuantennis, *c* — pärast piirajat.

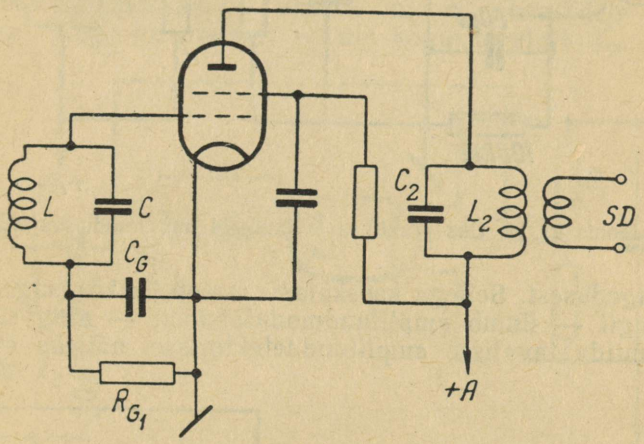


Joonis 21. 12. Amplituudipiiraja väljandpinge-sisendpinge tunnusjoon.

Sagedusmoduleeritud signaali vastuvõtul kasutatakse amplituudipiirajaks sobivas režiimis töötavat kõrgsagedusastet. Piiramine saavutatakse selles kas emissioonivoolu küllastumise või võrevoolu mõjul. On ka lülitusi, kus üheaegselt kasutatakse mõlemaid võimalusi.

Amplituudi piiramiseks võrevoolu mõjul varustatakse kõrgsagedusastme võrering suure takistiga R_{G_1} ja seda sildava kondensaatoriga C_G (joonis 21. 13). Võrele rakendatava signaalipinge tõttu tekib alaldamine ja takistil R_{G_1} ilmub pingelang, mis muudab võre potentsiaali seda negatiivsemaks, mida suurem on signaalipinge amplituud. Anoodvoolu vahelduvkomponent väheneb kooskõlas võre potentsiaaliga, millega seoses esimese maksimaalväärtused jäävad peaaegu püsivateks. Muidugi kaasneb amplituudi piiramise protsessiga väga tundúv ebalineaarmoonutus, sest anoodvool kaotab signaalile omase kuju. Tekkivad harmoonilised võnkumised sagedusmodulatsioonile siiski ebasoovitavat mõju ei avalda.

Teine piirajalülitus kasutab elektronlambi ületüürimist madala anoodpinge juures. Anoodvool langeb siis juba väikeste negatiivsete võrepingete juures nullini, kuid teiselt poolt piirab anoodvoolu pulsside amplituudi kasvu emissiooni küllastumine (pärast küllastatud olukorra saavutamist ei tugevne anoodvool võrepinge edasisel positiivsemaks muutumisel). Niiviisi jäävadki anoodvoolu pulsside tippväärtused piirajalülituse sisendpinge amplituudi teatava kõikumise juures püsivaks.

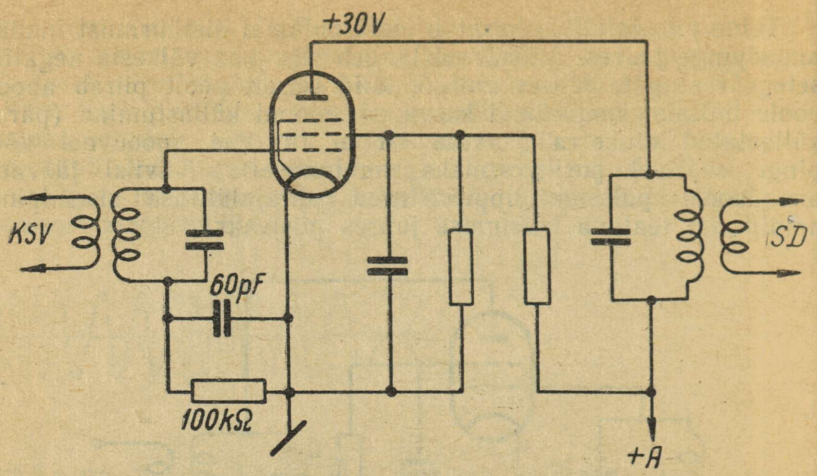


Joonis 21. 13. Võrevoolu toimel põhinev amplituudipiiraja.

Kombineeritud piirajad, mis töötavad nii anoodvoolu küllastumise kui ka võrevoolu mõjul, ning mitmeastmelised piirajad tagavad väga hea piiramisefekti. Üks kombineeritud piiraja levinum lülitus (joonisel 21. 14) annab püsiva amplituudiga väljandpinge ka siis, kui sisendpinge amplituud muutub kümneid kordi. Piiramine tekib umbes 1 kuni 2 voldi suurusel võrepingel; seetõttu tuleb enne piirajat võimendada signaalipinge väärtust 4 kuni 6 voldini. Lülituse väljandpinge on samuti väike — umbes 2 kuni 3 volti.

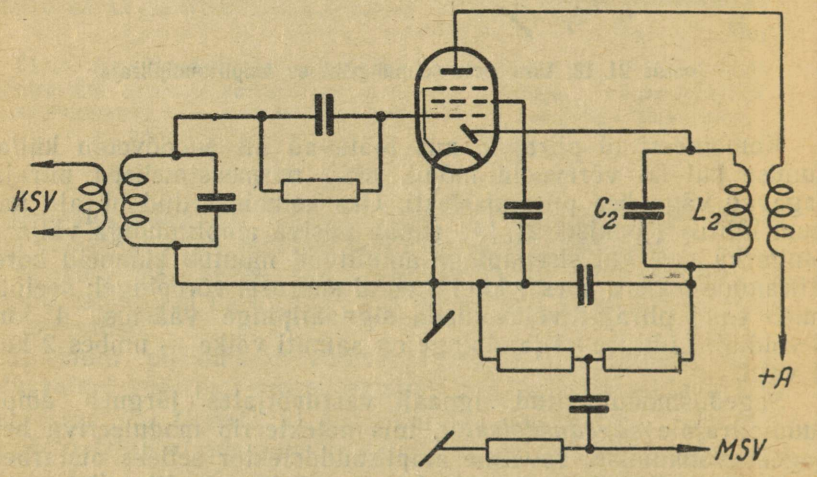
Sagedusmoduleeritud signaali vastuvõtjates järgneb amplituudipiirajale *sagedusdetektor,* mis detekteerib moduleeriva helisagedusvõnkumise. Tavaline amplituuddetektor selleks otstarbeks muidugi ei sobi, kuna temale langev püsiva amplituudiga sagedusmoduleeritud võnkumine annaks a m p l i t u u d i o s a s detekteeritult vaid puhta alalisvoolu.

Lihtsaim seade, mis demoduleerib sagedusmodulatsiooni, on võnkering, kui ta pole täpses resonantsis vastuvõetava moduleeritud võnkumise keskmise sagedusega, ühes sellele järgneva hariliku amplituuddetektoriga. Sageduse kõikumisel läheneb või kaugeneb signaalisagedus modulatsiooni rütmis võnkeringi reso-



Joonis 21. 14. Üks praktikas levinumaid amplituudipiirajaid.

nantsisagedusest. Sellega kooskõlas muutub ka kõrgsageduspinge võnkeringil — ilmub amplituudmodulatsioon — ning seda saab nüüd juhtida tavalisse amplituuddetektorisse, näiteks dioodi.

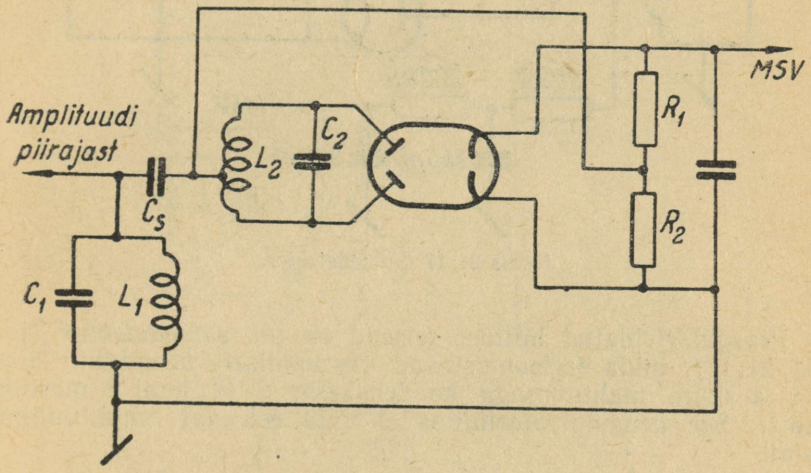


Joonis 21. 15. Amplituudipiiraja ja kõrvalehäälestatud võnkeringiga L_2-C_2 diskriminaatorlülitus diood-pentoodiga.

Skeemi diood-pentoodiga, milles pentood toimib amplituudi piirajana ja kõrvalehäälestatud võnkeringiga diood — detektorina, kujutab joonis 21. 15. Tekkivate ebalineaarmoonutuste vähendamiseks tuleb võnkering häälestada nii, et signaali kesk-

mine sagedus langeks resonantsikõvera sirgeima osa keskele. Tuleb märkida, et moonutustest vabanemine pole niisuguses lülituses tegelikult võimalik ja kvaliteetsetes seadmetes seda ei kasutata.

Täiuslikum sagedusdetektori lülitus, mida kasutatakse ringhäälinguvastuvõtjates, nn. *faasidiskriminaator*, sisaldab kaht omavahel induktiivselt sidestatud ja täpselt signaali keskmisele sagedusele häälestatud võnkeringi L_1-C_1 ja L_2-C_2 (joonis 21. 16). Lisaks induktiivsidestusele pääseb dioodi anoodidele esimese võnkeringi pinge ka otseselt — üle kondensaatori C_s. Dioodid

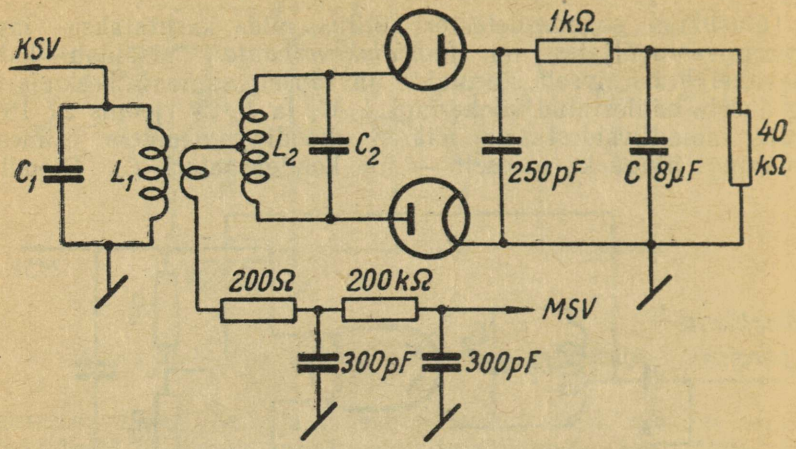


Joonis 21. 16. Sagedusdetektor kahe võnkeringiga ja kaksikdioodiga.

alaldavad kõrgsageduspingeid, mis nendele langevad korraga kummastki võnkeringist: ülemisele dioodile esimese võnkeringi ja teise võnkeringi ülemise poole pingete geomeetrilist summat [1] ning alumisele dioodile vastavalt esimese võnkeringi ja teise võnkeringi alumise poole pingete geomeetrilist summat. Esimese võnkeringi pinge langeb kummalegi anoodile samas faasis ja teise võnkeringi poolpinged — vastasfaasis. Teoreetiliselt saab näidata, et pingelangud kummalgi dioodi võrdse suurusega koormustakistustel R_1 ja R_2 osutuvad võrdseteks (ja vastupidisteks) ning väljandpinge puudub siis, kui võnkesagedus langeb täpselt ühte võnkeringide resonantsisagedusega. Kui signaalisagedus sellest erineb, siis ei osutu dioodide voolud enam võrdseteks ja ilmub ühe või teise polaarsusega väljandpinge. Sagedusmodulee-

[1] Need pinged tuleb liita geomeetriliselt, s. o. arvestades faasinihet. Induktiivselt sidestatud võnkeringides on resonantsi korral primaar- ja sekundaarpinge vahel veerandperioodine faasinihe.

ritud signaali puhul järgib kirjeldatava lülituse väljandpinge praktiliselt üsna täpselt moduleerivat võnkumist, ilma ebalineaarmoonutuste lisandumiseta.



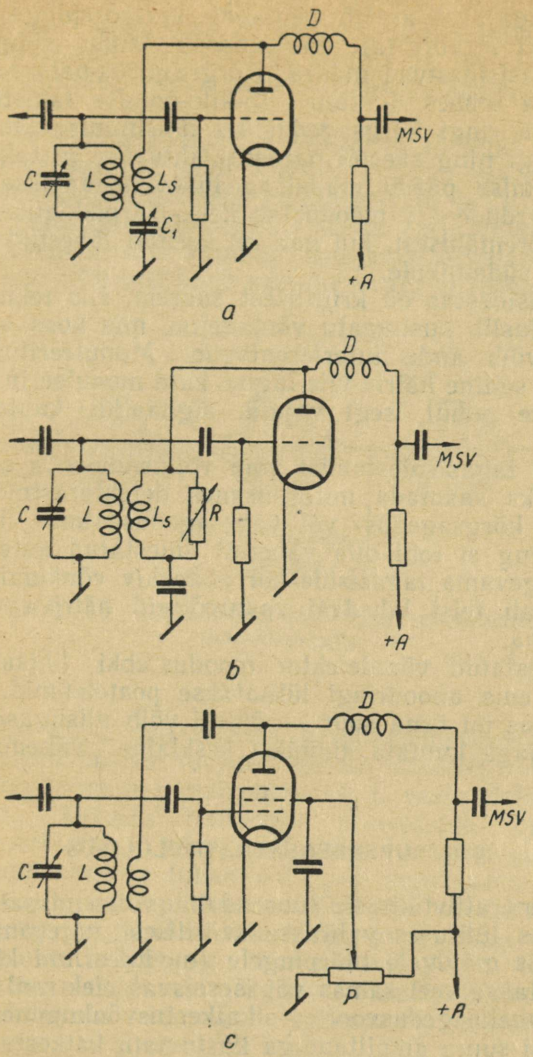
Joonis 21. 17. Suhtedetektor.

Praegukirjeldatud lülituse teisend on nn. *suhtedetektor* (joonis 21. 17), mida iseloomustavad vastupidiselt ühendatud dioodid ja suure mahtuvusega kondensaator C (2 kuni 8 mikrofaradit). See demodulaatorlülitus ei vaja eelnevat amplituudipiirajat.

§ 5. REGENERATIIVLÜLITUSES VÕREDETEKTOR

Väikese lampide arvuga otsevastuvõtja detektorastmes kasutatakse tundlikkuse ja selektiivsuse tõstmiseks regeneratiivlülituses võredetektorit, mille iseärasuseks on positiivne kõrgsageduslik tagasiside anood- ja võreringi vahel (joonis 21. 18). Tagasisidestuse kaudu juhitakse osa võimendatud energiat anoodringist võreringi samas faasis tagasi. Niisugune lülitus meenutab induktiivselt sidestatud kõrgsagedusgeneraatorit ja ta ongi võimeline kustumatu võnkumise tekitamiseks, kui muuta sidestus võrevõnkeringi pooli L ja anoodringi pooli L_s vahel teatavast kriitilisest väärtusest tugevamaks.

Amplituudmoduleeritud raadiosaate vastuvõtul reguleeritakse tagasiside pisut nõrgemaks kriitilisest. Siis omavõnkumist veel ei teki, kuid võreringi tagasijuhitav pinge toetab antennist või eelnevast võimendusastmest saadud kõrgsagedusvõnkumist. Pingeamplituudid võrel suurenevad ning ühenduses sellega kasvab märgatavalt ka võredetektorastme üldine võimendus. Tagasisidestus nagu vähendaks võnkeringi sumbuvust ja tõstaks hüve-



Joonis 21. 18. Regeneratiivlülituses võredetektor.

tegurit. Selle tulemusena aheneb võnkeringi resonantsikõver ja vastuvõtja selektiivsus suureneb.

Tagasisidestatud võredetektoris arenevad ebalineaarmoonutused, mis halvimal juhul küünivad arvuliselt kuni 25 protsendini.

Tagasisidestuse reguleerimiseks on mitmeid võimalusi. Lihtsaim viis selleks on poolide asendi muutmine, kuid kasutatakse ka väikest muudetava mahtuvusega kondensaatorit C_1 (joonis 21. 18-*a*) või reguleeritavat takistit R_1 (*b*) tagasisideringis.

Üsna häid tagajärgi annab pentoodi varivõrepinge muutmine potentsiomeetri P abil (c), mis määrab lambi võimenduse ja seega ka tagasisidestuse määra. Kõrgsagedus-paispool D, mida võib asendada umbes 5- kuni 15-kilo-oomise takistiga, väldib tagasisidestuse ringi kõrgsagedusliku ühistumise läbi järgneva astme võreringi ning skeemi parasiitmahtuvuse ja takistab kõrgsagedusvõnkumise pääsu madalsagedusvõimendajasse. Sidestusmähise L_s keerdude arv moodustab kesk- ja pikklaine piirkonnas $^1/_3$ kuni $^1/_5$ võremähisest, kui nad on keritud lähestikku või ülestikku ühisele südamikule.

Kui tagasisidestus on kriitilisest suurem, siis tekib võnkeringis omasageduslik kustumatu võnkumine, mis koos saatja põhisagedusega võib anda interferentsvile. Moduleeritud signaali vastuvõtul on selline häiriv vile liigne, kuid moduleerimata raadiotelegraafisaate puhul isegi vajalik signaalide kuuldavakstegemiseks.

Positiivset tagasisidestamist võib võimenduse ja selektiivsuse suurendamiseks kasutada mitte üksnes detektorastmes, vaid ka mõnes teises kõrgsagedus- või vahesagedusastmes. Tagasisidestatud võnkering ei tohi olla vahetult sidestatud antenniga, sest kriitilisest tugevama tagasiside korral tekkiv võnkumine kiirguks antennist laiali teisi lähedasi vastuvõtjaid häiriva elektromagnetilise lainena.

Tagasisidestatud võredetektor moodustabki lihtsaima lampvastuvõtja. Tema anoodringi lülitatakse peatelefonid. Selle lülituse tundlikkus on üsna suur — õhtuti võib niisuguse ühelambilise vastuvõtjaga kuulata ainuüksi kesklaineil vähemalt kümmekond saatjat.

§ 6. SUPERREGENERATIIVLÜLITUS

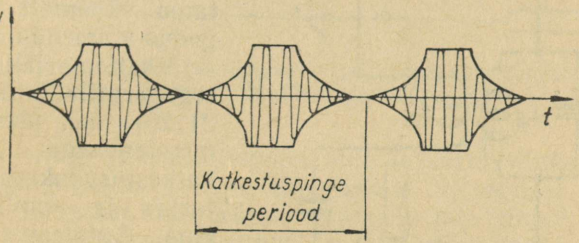
Superregeneratiivlülitus suurendab võimendusastme tundlikkust. Selles lülituses valitakse kriitilisest tugevam tagasiside ja võnkeringis mõjuvale tüürpingele (moduleeritud kõrgsagedus-pingele) lisatakse veel samas või iseseisvas elektronlambis genereeritud ultrahelisagedusvool [1] — katkestusvõnkumine.

Võrdlemisi suure amplituudiga kustumatu katkestusvõnkumine mõjub nagu kõikuv võre-eelpinge, mis muudab pidevalt lambi talitluspunkti asendit tunnusjoonel. Negatiivse poolperioodi ajal on talitluspunkt vasakul kõverusel, lambi tõus on väike ja kõrgsageduslik tagasiside on langenud alla kriitilise väärtuse. Muidugi lakkab siis ka kõrgsagedusvõnkumise genereerimine seniks, kuni tõus on positiivsemaks muutunud võrepotentsiaali tõttu taas muutunud küllaldaseks, et hoida kõrgsagedusvõnkumist alal. Kir-

[1] Ultraheliks loetakse kõrvaga mittetajutavaid võnkumisi sagedusega üle 20 kilohertsi; nendele vastavaid vahelduvvoole võib nimetada ultrahelisagedusvooluks.

jeldatud protsess hakkab korduma: võrevõnkeringis tekivad katkestusvõnkumise sagedusel kõrgsagedusliku omavõnkumise seeriad, mis sumbuvad üsna kiiresti (joonis 21. 19). Ultrahelivõnkumine nagu «lülitab» perioodiliselt kõrgsagedusgeneraatorit sisse ja välja.

Katkestusvõnkumise sagedus valitakse 15 kuni 200 kilohertsi piires, kuid vähemalt 5 kuni 6 korda suurem vastuvõetavas signaalis sisalduvast kõrgeimast moduleerivast helisagedusest. Teisest küljest peab katkestussagedus olema palju väiksem vastuvõetavast kandesagedusest. Kumbagi tingimust arvestades selgub, et superregeneratiivlülitust saab kasutada vaid ultralühi- ja lühilaine astmikes.



Joonis 21. 19. Võnkumisprotsess superregeneratiivlülituse võrevõnkeringis.

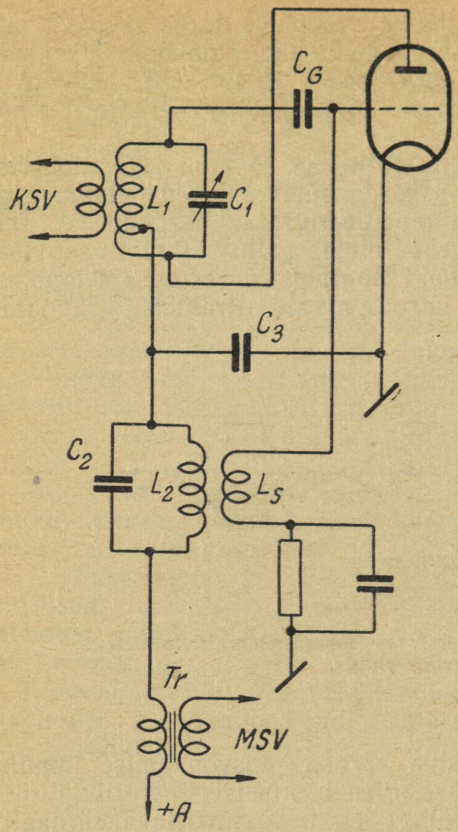
Aeg, mille vältel iga tekkiva kõrgsagedusvõnkumise impulsi amplituud omab püsiva suuruse, oleneb superregeneratiivlülituse võrevõnkeringile mõjuva tüürpinge (s. t. vastuvõetava signaali) amplituudist. Lülituses toimuvate protsesside lõpptulemusena kujuneb genereeritava kõrgsagedusliku vahelduvpinge impulsside amplituud sadu ja tuhandeid kordi suuremaks seda tüüriva sisendsignaali pingeamplituudist. Katkeva võnkumise generaator töötab seega väga efektiivse kõrgsagedusvõimendajana.

Superregeneratiivlülituses võimendatud pinge detekteeritakse enamasti samas lambis või järgnevas dioodidetektoris ning saadakse moduleerivale võnkumisele rohkem või vähem vastav helipinge.

Superregeneratiivlülituses ilmuvad, eriti signaalipinge puudumisel, tugevad häirekahinad.

Talitlusrežiimilt eristatakse lineaarset ja ebalineaarset superregeneratiivset võimendamist. Esimese puhul moonutusi peaaegu ei teki ja see sobib ka kunstiliste raadiosaadete vastuvõtuks; teise puhul ulatuvad ebalineaarmoonutused 30 protsendini. See tagab küll kõne arusaadavuse, kuid ei võimalda muidugi kunstiliste saadete ülekannet. Ebalineaarne režiim leiab kasutamist tema suurema stabiilsuse tõttu.

Lineaarses režiimis töötav superregeneratiiv-võimendusaste



Joonis 21.20. Superregeneratiivlülituses võredetektor.

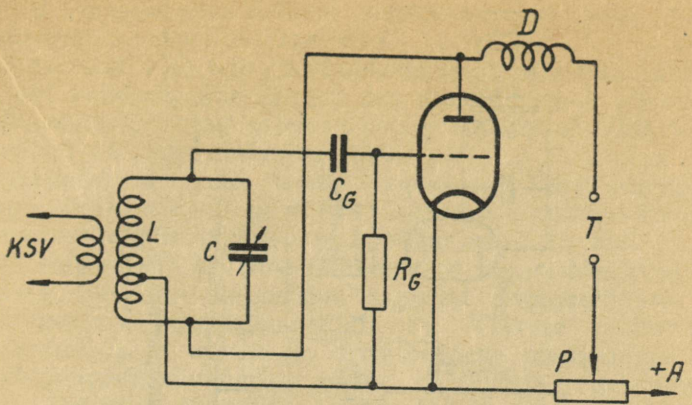
on väga tundlik toitepingete muutumise suhtes ning vajab nende stabiliseerimist. Normaalseks talitluseks vajab superregeneratiivaste umbes 20-voldist anoodpinget.

Superregeneratiivlülituse kasutamist vastuvõtja esimeses astmes ei saa lubada, et vältida genereeritava võnkumise väljakiirgamist antenni kaudu. Antenni ja superregeneratiivastet peab lahutama vähemalt üks kõrgsagedus-võimendusaste.

Vaatleme lähemalt superregeneratiivlülitust (joonis 21.20), mis üheaegselt võimendamisega toimib veel katkestusvõnkumise generaatorina ja amplituuddetektorina. Autotransformatoorselt tagasisidestatud võnkering L_1-C_1 häälestatakse vastuvõetavale sagedusele; katkestussageduse määrab anoodringis asuv võnkering L_2-C_2, mis on võrega sidestatud pooli L_s abil. Anoodring sisaldab veel helisagedustrafot *Tr*, mille abil superregeneratiivaste sidestatakse järgneva madalsagedusvõimendajaga või telefoniga.

Katkestatud kõrgsagedusvõnkumist saab tekitada ka ilma võnkeringita, *R-C*-lülituse abil väga tugevasti tagasisidestatud võredetektori võreringis (joonis 21.21). Katkestussageduse määrab siin võrekondensaatori C_G ja -takisti R_G ajakonstant; katkestused tekivad võrevoolu mõjul. Lülituse kõrgsageduslikku omavõnkumist saatev võrevool tekitab võretakistil üha suureneva pingelangu ja võrekondensaator laadub. Sellega nihkub lambi talitluspunkt vasakule, tõus väheneb ning genereerimine ja võrevool lakkab. Võrekondensaator hakkab nüüd tühjenema läbi takisti (sellest ka katkestussageduse sõltuvus ajakonstandist!), võre muutub positiivsemaks, kõrgsagedusvõnkumine koos võrevooluga ilmub taas ning katkestusprotsess hakkab perioodiliselt korduma.

Superregeneratiivlülituses võib kasutada ka mitmevõrelist elektronlampi (näiteks heptoodi), mille kaks esimest võret toi-



Joonis 21.21. Katkestusvõnkumise tekitamine superregeneratiivastme võreringi lülituselementidega R_G-C_G.

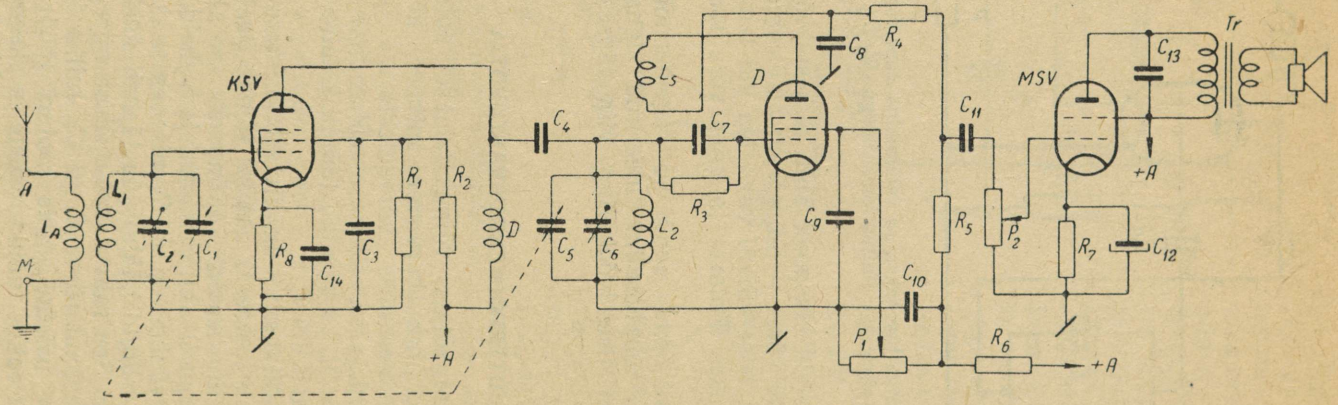
mivad võnkeringi ja sidestuspooli abil katkestusvõnkumise generaatorina ning neljas võre — tüürvõrena. Niisugusel juhul tuleb vahemikku katoodist teise võreni vaadelda kui trioodi; teine võre täidab siin anoodi aset. Kolmas ja viies võre toimivad lihtsate varivõredena.

Superregeneratiivdetektor sobib ka sagedusmoduleeritud signaali muundamiseks amplituudmoduleeritud signaaliks ja selle detekteerimiseks, kui sisendvõnkering viia täpsest häälestusest pisut kõrvale.

§ 7. OTSEVÕIMENDUSVASTUVÕTJA

Otsevõimendusvastuvõtjas võimendatakse antennist saadav elektromotoorne jõud ühes (harvemini mitmes) kõrgsagedus-võimendusastmes, detekteeritakse võredetektoriga ja suunatakse madalsagedusvõimendajasse. Viimase väljandiga on ühendatud valjuhääldaja. Joonis 21.22 kujutab tüüpilist kolmeastmelist otsevõimendusvastuvõtja lülitust.

Antenn A sidestatakse induktiivselt esimese võnkeringiga L_1-C_1 pooli L_A kaudu. Esimeses astmes toimib pentood kõrgsagedusvõimendajana, mille anoodi koormuseks on alalisvoolu suhtes kõrgsagedus-paispooli aktiivtakistus ja vahelduvvoolu suhtes järgmise astme võrevõnkeringi L_2-C_5 resonantsitakistus. Muidugi tuleb mõlemad võnkeringid häälestada täpselt ühele, s. o. vastuvõetavale sagedusele. See saavutatakse ühise agregaadi moodustamisega pöördkondensaatoritest C_1 ja C_5, milles kummagi mahtuvused on omavahel võrdsed igas rootori (pööravate plaatide komplekti) asendis. Poolide induktiivsuste ja skeemi parasiitmahtuvuste võrdsustamiseks kasutatakse kummaski võnkeringis regu-



Joonis 21. 22. Kolmeastmelise otsevõimendusvastuvõtja lülitusskeem

leeritavaid magnet-dielektrikust poolisüdamikke ning väikese mahtuvusega seadekondensaatoreid C_2 ja C_6.

Esimest astet võib teisega sidestada ka teisiti, näiteks induktiivselt või vahetult. Siis langeb ära anoodpaispool ühes sidestuskondensaatoriga ning esimese astme anoodvool läbib väikest sidestuspooli või võrevõnkeringi pooli.

Kõrgsagedusaste saab vajaliku suurusega varivõrepinge üle pingejagajalülituse R_1-R_2 ja sellele elektroodile antakse vahelduvpinge suhtes katoodi potentsiaal kondensaatori C_3 abil.

Teine aste toimib tavalise induktiivselt tagasisidestatud võredetektorina, kusjuures tagasiside tugevust reguleeritakse varivõret pingestava potentsiomeetriga P_1. Väikese mahtuvusega kondensaator C_8 ja takisti R_4 detektorastme anoodringis takistavad kõrgsagedusvõnkumise pääsu vastuvõtja madalsagedusastmesse. Detektori anoodkoormusena toimib takisti R_5; kondensaator C_{10} ja takisti R_6 moodustavad lahtisidestusfiltri, mis väldib madalsagedusliku tagasisidestumise tekkimise võimaluse anoodvooluallika kaudu.

Sidestuskondensaatori C_{11} kaudu langeb detektorastmes demoduleeritud ja võimendatud madalsageduspinge helitugevust reguleerivale potentsiomeetrile P_2, mis on ühtlasi ka lõppastme võretakistiks. Võre-eelpinge antakse sellele astmele katoodtakistil R_7 tekkiva ja suuremahtuvusliku kondensaatori C_{12} poolt silutava pingelanguna, mille võrra katood muutub üldmiinuse (ja võre) suhtes positiivsemaks. Lõppastme anoodringis on väljandtrafo *Tr*, mille sekundaarmähis toidab dünaamilise valjuhääldaja võnkepooli. Väljandtrafo primaarmähist sildav kondensaator C_{13} vähendab väljandvõimsust kõrgematel helisagedustel. Lõppastme varivõrele antakse anoodvooluallika täispinge.

Käsitletavasse lihtsasse vastuvõtjasse sobivad paljud lambitüübid. Võredetektorina on soovitav kasutada lühikese tunnusjoonega pentoodi ja lõppastmena suure tõusuga jugatetroodi või võimsuspentoodi.

Kirjeldatud kolmeastmelise otsevastuvõtja lülituse üksikosade orienteerivad elektrilised suurused on: C_1 ja $C_5 = 500$ pF, C_2 ja $C_6 = 15$ pF, $C_3 = 0{,}02$ μF, $C_4 = 30$ pF, $C_7 = 100$ pF, $C_8 = 100$ pF, $C_9 = 0{,}2$ μF, $C_{10} = 0{,}5$ μF, $C_{11} = 0{,}02$ μF, $C_{12} = 50$ μF, C_{13} ja $C_{14} = 5000$ pF; $R_1 = 50$ kΩ, $R_2 = 50$ kΩ, $R_3 = 1$ MΩ, $R_4 = 5$ kΩ, $R_5 = 100$ kΩ, $R_6 = 50$ kΩ, $P_1 = 100$ kΩ, $P_2 = 1$ MΩ. Kõrgsagedus- ja lõppastme katoodtakistuste R_7 ning R_8 suurused olenevad kasutatavate lambitüüpide kohta ettekirjutatud võre-eelpingetest.

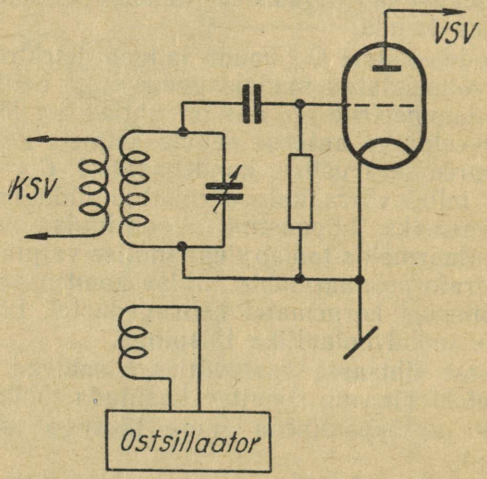
Lülitusele võib tarviduse kohaselt lisada veelgi võimendusastmeid. Suurem kõrgsagedusastmete arv annab suurema tundlikkuse ja parema selektiivsuse, sest siis kasvab ka häälestatavate võnkeringide arv. Madalsagedusastmete lisamine võimaldab välja tüürida võimsamat lõppastet ja saavutada suuremat helitugevust. Siiski kasutatakse koos võredetektoriga ainult harva rohkem

kui ühte kõrgsagedus- ja madalsagedusastet, sest tunduvalt otstarbekam on neljalambilise otsevastuvõtja asemel ehitada sama lampide arvuga superheterodüünvastuvõtja.

§ 8. SUPERHETERODÜÜNVASTUVÕTJA

Otsevõimendusvastuvõtja kõrgsagedusosa kaks või kolm võnkeringi ei taga küllaldast selektiivsust, kuid ka nende arvu suurendamine ei annaks oodatud tagajärgi häälestamise ebatäpsuste tõttu; pealegi tuleks siis kasutada kallist ja mõõtmetelt suurt kolmest või rohkemast üksikust sektsioonist koosnevat pöördkondensaatorit.

Nendest puudustest vabas superheterodüünlülituses kasutatakse kõigest kahte või kolme ümberhäälestatavat võnkeringi ja antennist saadud signaali kandesagedus muundatakse uueks, ena-

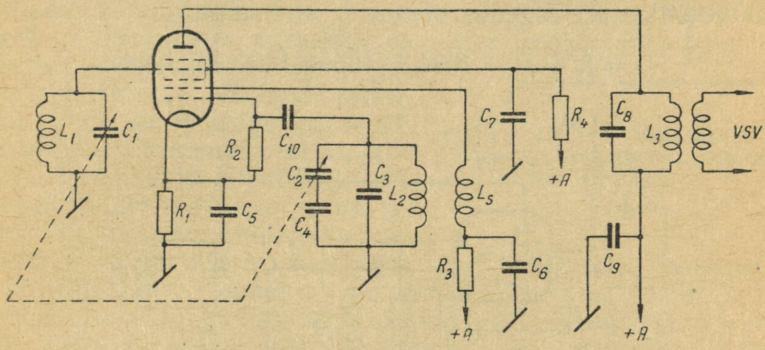


Joonis 21.23. Superheterodüünlülituse segustusaste (põhimõtteliselt).

masti madalama sagedusega nn. vahesagedusvõnkumiseks. Viimase sagedus on igal vastuvõtjal täiesti püsiv suurus. Vahesagedusvõnkumist on väga kerge võimendada mitmeastmelises mittehäälestatavate võnkeringidega võimendajas, nn. *vahesagedusvõimendajas,* mille omadused määravad vastuvõtja tundlikkuse, selektiivsuse ja ribalaiuse.

Signaali sageduse muundamiseks, s. o. vahesagedusvõnkumise tekitamiseks, kasutatakse elektronlampi. Superheterodüünlülituses ringhäälingu-vastuvõtja muundusaste töötab heptoodil, oktoodil, triood-heksoodil või triood-heptoodil, kusjuures muundav ostsil-

laatorvõnkumine tekitatakse iseseisvas generaatorastmes (joonis 21. 23) või samas elektronlambis. Esimesel juhul on tegemist *segustusastmega* ja teisel juhul *muundusastmega*. Joonis 21. 24 kujutab heptood-muundaja skeemi, mis täidab segustusastme ja ostsillaatori ülesandeid. Katood ühes võredega G_1 ja G_2 moodustab trioodi, mis ühes võnkeringiga L_2-C_2 toimib kõrgsagedusgeneraatorina. Ostsillaatori anoodile, s. o. heptoodi teisele võrele, antakse positiivne pinge üle sidestuspooli L_s ja eeltakisti R_3. Tekitatud võnkumise edasipääsu vooluallikasse väldib kondensaator C_6.



Joonis 21. 24. Superheterodüünlülituse muundusaste heptoodiga.

Ostsillaatori võrele ühendatud kondensaator C_{10} ja takisti R_2 piiravad genereeritava võnkumise amplituudi. Võnkumist saadab võrevool ja pingelang takistil R_2 viib lambi tunnusjoonel talitluspunkti seda rohkem vasakule, mida tugevam on võnkeamplituud. See vähendab võimendust ja vooluamplituud ostsillaatori anoodil (s. o. võrel G_2) jääb peaaegu konstantseks.

Muundusheptoodi esimesi võresid läbiv ja anoodile suunduv osa anoodvoolust omandab ostsillaatori sagedusega vahelduvkomponendi. Võnkuvat anoodvoolu tüürib veelkordselt neljandale võrele juhitav vastuvõetav signaal. Kahekordse tüürimise tulemusena ilmuvad anoodvoolus vahelduvkomponendid sagedustega

$$f_0,\ f_s,\ f_0 - f_s \text{ ja } f_0 + f_s,$$

kus f_0 on ostsillaatori sagedus ning f_s — vastuvõetava signaali sagedus.

Võred G_3 ja G_5 toimivad varivõredena, vähendades parasiitmahtuvust ühelt poolt anoodi ja tüürvõre vahel C_{AG_4} ja teiselt poolt ostsillaatorosa ja tüürvõre vahel $C_{G_2G_4}$. Varivõred pingestatakse positiivselt ja ühendatakse kõrgsageduslikuks lühistamiseks kondensaatori C_7 kaudu katoodi või üldmiinusega. Takisti R_1 ja kondensaatori C_5 abil antakse tüürvõrele G_4 vajalik püsiv

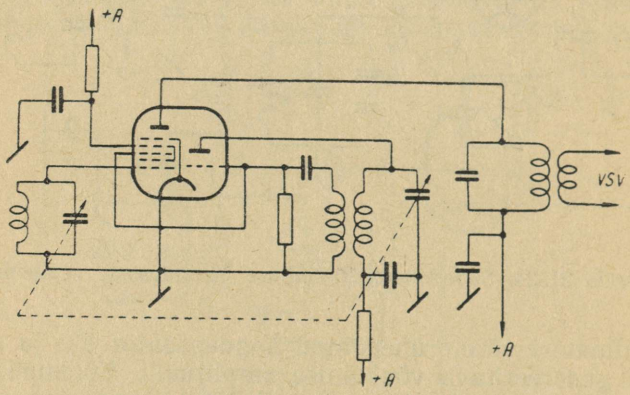
negatiivne eelpinge. Ostsillaatori võretakisti R_2 ühendatakse katoodiga, mitte aga üldmiinusega, selleks et katoodtakistil tekkiv pingelang ei mõjuks tarbetu eelpingena ka sellele võrele.

Supervastuvõtja võnkeringide häälestamisel pöördkondensaatorite agregaadi abil tuleb ostsillaatori võnkering hoida pidevalt vahesageduse võrra kõrgemal vastuvõetava signaali sagedusest:

$$f_o = f_s + f_v, \text{ kus } f_v = \text{const.}$$

Kui näiteks vastuvõetava signaali sagedus $f_s = 1034$ kilohertsi ja vastuvõtjas kasutatav vahesagedus $f_v = 465$ kilohertsi, siis peab ostsillaatori sagedus olema

$$f_o = f_s + f_v = 1034 + 465 = 1499 \text{ kilohertsi.}$$



Joonis 21. 25. Superheterodüünlülituse muundusaste triood-heptoodiga.

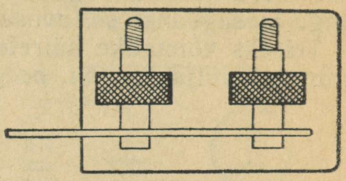
Püsiva vahe saamiseks sisendi võnkeringi ja ostsillaatori häälestuse vahel pöördkondensaatorite agregaadi rootori igas asendis ühendatakse ostsillaatori võnkeringi lisakondensaatorid C_3 ja C_4. Nendest esimene on enamasti väikesemahtuvuseline trimmerkondensaator, mis võimaldab vastuvõtja esialgsel reguleerimisel võnkeringide algmahtuvuste sobitamist. Täpse arvutuse teel määratav kondensaatori C_4 mahtuvus on väga kriitiline suurus, millest oleneb võnkeringide «kokkujooks» lainepiirkonna ulatuses, s. o. resonantsisageduste vahe (vahesageduse) konstantsus. Kesklaineastmikus on selle kondensaatori mahtuvus umbes 500 pikofaradit.

Parimaid tulemusi muunduslambina annavad (eriti lühilainetel) triood-heksood ja triood-heptood (joonis 21. 25), milledes iseseisev trioodisüsteem toimib ostsillaatorina ja heksood või heptood — segustajana. Viimatimainitud süsteemi esimene võre on kasutusel tüürvõrena, millele antakse signaalipinge, kolmas võre

saab pinge ostsillaatori võrelt. Teine ja neljas võre on varivõred ja heptoodi puhul viies võre — katoodi potentsiaali kandev sulgvõre.

Muundusastme anoodkoormuseks on vahesagedusele $f_o - f_s$ häälestatud võnkering, mis selekteerib kõikidest anoodvoolu vahelduvkomponentidest välja just selle sagedusega võnkumised.

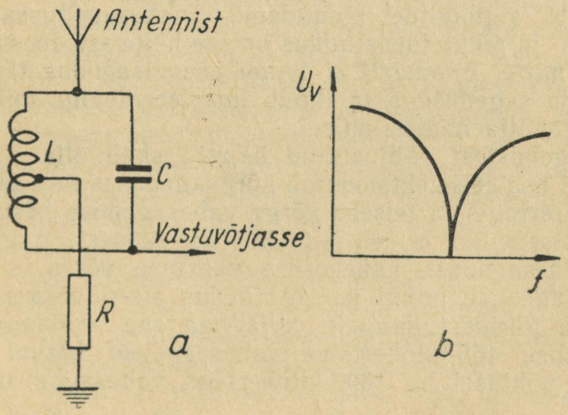
Muundusastmele järgneva vahesagedusvõimendaja astmed sidestatakse ribafiltrite abil, millede primaarsed võnkeringid asuvad eelmiste astmete anoodringides ja sekundaarsed — järgmistes võreringides. Vahesagedusvõimendaja ribafiltrite poolid sidestatakse enamasti induktiivselt, kuid on mõeldav ka nende vooluringide sidestamine teisiti, näiteks mahtuvuslikult. Ribafiltrite esialgne väljahäälestamine toimub magnet-dielektrikust poolisüdamiku või (vanemates vastuvõtjates) trimmerkondensaatori abil. Vahesageduse ribafiltri üht võimalikku konstruktsiooni kujutab joonis 21. 26. Omavaheliste parasiitsidestuste vältimiseks tuleb üksikud ribafiltrid katta alumiiniumist peekrikujuliste varjetega. Induktiivselt sidestatud poolide vahekaugus ribafiltris on mõni sentimeeter.



Joonis 21. 26. Vahesagedusvõimendaja induktiivselt sidestatud ribafilter.

Supervastuvõtja vahesagedusvõimendajale järgneb harilik diooddetektor, madalsagedusvõimendaja ja üks või mitu valjuhääldajat.

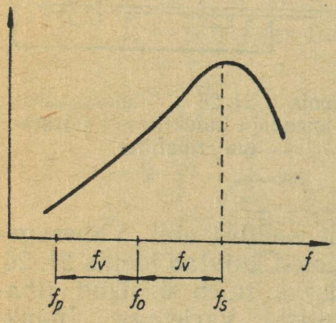
Supervastuvõtja olulisimaks puuduseks on iseloomulike häirete ilmumise võimalus. Juhul kui mõne tugeva raadiosaatja sage-



Joonis 21. 27. Supervastuvõtja vahesagedusele häälestatud antennifilter (*a*) ja tema läbilaskekõver (*b*).

dus on lähedane vastuvõtjas kasutatavale vahesagedusele ja sisendvõnkeringi selektiivsus pole küllaldane, toimub segustusastmes nende signaalide lihtne võimendamine, mis väljandis annabki segava läbikostvuse või interferentsvile. Sellelaadse häire mõju vähendamiseks kasutatakse vastuvõtja sisendis enne esimest võnkeringi täpselt vahesagedusele häälestatud erilist joonisel 21.27 antud väga selektiivset *L-C-R*-filtrit, mille väljandpinge ja sageduse sõltuvuse graafik on ära toodud samas.

Teiseks võimalike häirete sissetungimise allikaks superheterodüünvastuvõtjas on nn. *peegelkanali* olemasolu.



Joonis 21.28. Ostsillaatori- (f_o), kande- (f_s) ning peegelsageduse (f_p) paiknemine supervastuvõtja sisendvõnkeringi resonantsikõveral vastavalt kasutatavale vahesagedusele f_v.

Kuna signaalisagedus peab vahesageduse saamiseks erinema ostsillaatorisagedusest just vahesageduse võrra, siis tekib vahesageduslik võnkumine ühe ja sama ostsillaatorisageduse juures kahe erineva signaalisageduse f_s ja f_p puhul. Nendest üks on ostsillaatorisagedusest vahesageduse võrra madalam ja teine kõrgem:

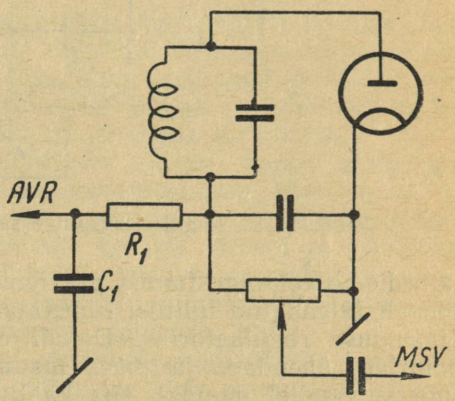
$$f_s = f_o - f_v \text{ ja } f_p = f_o + f_v.$$

Vastuvõtuks mittekasutatavat signaalisagedust f_p, mis on ostsillaatorisagedusest vahesageduse võrra kõrgem, nimetatakse *peegelsageduseks*. Seega erineb peegelsagedus vastuvõetavast sagedusest kahekordse vahesageduse võrra. Vastuvõtja sisendvõnkering peab evima küllaldast selektiivsust, et vältida juhuslikult peegelsagedustel töötavate saatjate signaalide muundamist vahesageduseks (joonis 21.28). Kesk- ja pikklaineastmikus on see hõlpsasti teostatav, kuid lühilainetel mitte. Enamasti ei lange peegelsagedus täpselt ühte segava saatja sagedusega ja ilmub interferentsvile, mille kõrgus muutub vastuvõtja häälestamisel.

Peegelsagedustest põhjustatud häireid saab alla suruda esiteks muidugi hea eelselektsiooniga kõrgsagedusastmes ning muundusastme võreringis ja teiseks kõrge vahesageduse kasutamisega. Kuna peegelsagedus erineb signaali sagedusest, nagu eespool selgitati, vahesageduse kahekordse väärtuse võrra, siis langeb kõrge vahesageduse puhul peegelsagedus sisendvõnkeringi resonantsikõvera piiridest kaugele välja ega saa avaldada häirivat mõju. Tavalise 465-kilohertsise vahesageduse kõrval rakendatakse sellel põhjusel ka 1600-kilohertsist vahesagedust.

§ 9. AUTOMAATNE VÕIMENDUSE REGULEERIMINE

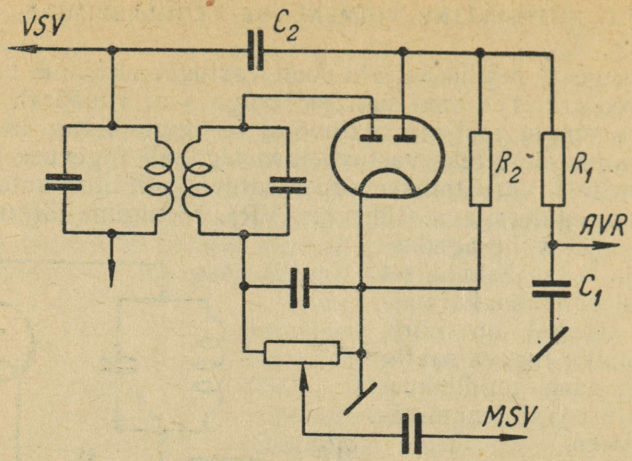
Mitmesuguste raadiosaatjate poolt vastuvõtuantennis indutseeritud pinged erinevad oma suuruselt väga suurel määral. Samuti ilmneb kaugemate saatjate vastuvõtul feedingunähtus. Et vastuvõtu helivaljus ei sõltuks vastuvõetava signaali tugevuse juhuslikest muutustest, varustatakse supervastuvõtja lülitus automaatse võimenduse reguleerijaga (lühend: AVR). Niisugune lülitus kasutab kõrg- ja vahesagedusvõimendaja maksimaalset tundlikkust vaid siis, kui vastuvõetav signaal on nõrk, ning vastupidi: tugeva saatja puhul vähendab tundlikkust ja helivaljus jääb enam-vähem püsivaks.



Joonis 21. 29. Pinge saamine astmete võimenduse automaatseks reguleerimiseks amplituuddetektori dioodilt.

Automaatseks võimenduse reguleerimiseks amplituudmoduleeritud saate vastuvõtul ei sobi ükski amplituudipiiraja, sest selles läheks modulatsioon täielikult kaduma. Selleks otstarbeks kasutatakse detektorastme dioodil ilmuvat alaldatud pinget, mille alaliskomponendi suurus on võrdeline vastuvõetava signaali kandevõnkumise amplituudiga (joonis 21. 29). Sageli kasutatakse reguleerimispinge saamiseks täiesti iseseisvat dioodi, mida samuti toidetakse vahesagedusvõimendaja väljandist (joonis 21. 30). Takistist R_1 ja kondensaatorist C_1 koosnev filter vabastab reguleeriva pinge vahelduvatest (nii helisagedus- kui ka kõrgsagedus-) komponentidest. Seda üldmiinuse suhtes negatiivset pinget kasutatakse kõrg- ja vahesagedusastmete elektronlampide võre-eelpingena. Mida suurem on vastuvõetava kandevõnkumise amplituud, seda suurem on ka nendele astmetele antav negatiivne eelpinge ja seal kasutatavate muudetava tõusuga pentoodide võimendustegur väheneb. Takisti R_1 tavaline suurus on 0,5 kuni 1,0 megaoomi ja kondensaator C_1 — 0,05 kuni 0,02 mikrofaradit. Liiga suur filterkondensaator ja -takisti ei lase reguleerimispingel küllaldaselt kiiresti järgida signaali tugevuse muutusi; nende lülituselementide liiga väikeste väärtuste puhul võib aga reguleerimispingesse jääda mittevajalik madalsageduslik vahelduvkomponent, mis hakkaks mõjuma nagu omapärase vastusidestusena. Filtri ajakonstant valitakse umbes 0,05 sekundit.

Reguleerimispinge tekkimise vältimiseks nõrkade saatjate vastuvõtul, mis asjatult vähendaks võimendust, kasutatakse regu-

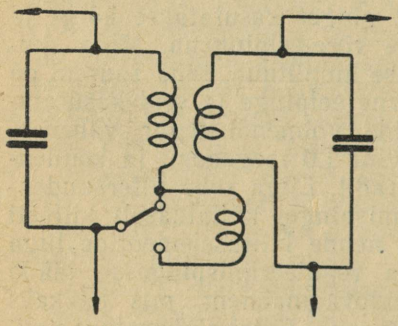


Joonis 21. 30. Reguleerimispinge saamine iseseisvalt dioodilt.

laatordioodi eelpingestamist paarivoldise negatiivse alalispingega. Selliselt täiendatud lülitust nimetatakse viivitusega automaatseks võimenduse regulaatoriks. Dioodi eelpingestamiseks võib tema vooluringi ühendada järgneva madalsagedusastme katoodtakisti; pingelang sellel muudab siis ka dioodi katoodi üldmiinuse (ja anoodi) suhtes positiivseks.

§ 10. RIBALAIUSE REGULEERIMINE VAHESAGEDUSVÕIMENDAJAS

Kuna supervastuvõtja selektiivsuse, s. o. ribalaiuse, määrab just tema vahesagedusvõimendaja, siis saab ribafiltrite sidestustugevuse muutmisega seda hõlpsalt reguleerida. Laiemat riba kasutatakse kohalike ja tugevate saatjate vastuvõtul, kui pole tarvidust suure selektiivsuse järele. Lai riba tagab kõigi külgsageduste ühtlasema võimenduse ja seega parema helikvaliteedi kõrgemate helisageduste osas. Kaugemate nõrkade saatjate vastuvõtul tuleb naabersagedustel töötavatest saatjatest tingitud häirete allasurumiseks loobuda laiast helisagedusribast ja ahendada vahesagedusvõimendaja ribalaiust. Mõnikord tehakse seda koos kõrgemate helide võimenduse täiendava vähendamisega madalsagedusvõimendajas.



Joonis 21. 31. Selektiivsuse reguleerimine sidestuse muutmisega supervastuvõtja vahesagedusvõimendaja ribafiltrites.

Ribalaiuse reguleerimiseks võib ribafiltrid varustada väikeste ümberlülitatavate sidestuspoolidega (joonisel 21.31 toodud lülituses suureneb kummagi võnkeringi vaheline sidestus lüliti alumise asendi puhul). Sama tulemuse annab ka kummagi võnkeringi poolide omavahelise asendi või kauguse muutmine. Kui poolide teljed ristuvad, on sidestus nõrgem.

§ 11. OPTILINE HÄÄLESTUSTÄPSUSE INDIKAATOR

Täpse häälestamise hõlbustamiseks kasutatakse *optilist indikaatorit* — erilist elektronlampi. Optiline indikaator koosneb väikesest trioodist, koonusekujulisest fluorestseerivast ekraanist, mis helendub temale langevate elektronide mõjul, ja juhtelektroodist, milleks on trioodi anoodiga ühendatud kitsas metallriba.

Häälestusindikaatori trioodi võrele antakse pinge alaliskomponent vastuvõtja detektordioodi koormustakistilt, kui ei kasutata eraldi AVR dioodi; anood ühendatakse suure takisti kaudu anoodpingeallikaga ning ekraan vahetult sellega. Anood ja juhtelektrood osutuvad seega anoodtakistil tekkiva pingelangu võrra ekraani suhtes negatiivsemaks. Häälestusindikaatori tüürpingena kasutatakse AVR dioodilt saadavat reguleerivpinget.

Katoodilt ekraanile liikuvad elektronid eemalduvad juhtelektroodist seda rohkem, mida madalam on tema potentsiaal ekraani suhtes ja ekraanil jääb kitsam või laiem sektor tumedaks. Mida negatiivsem on trioodi võre potentsiaal, seda väiksemaks kujuneb anoodvool, seda vähem erinevad juhtelektroodi ja ekraani potentsiaalid ning seda kitsamaks jääb mittehelendav sektor ekraanil. Täpsele häälestusele vastab niisiis kitsaim tume sektor häälestusindikaatori ekraanil.

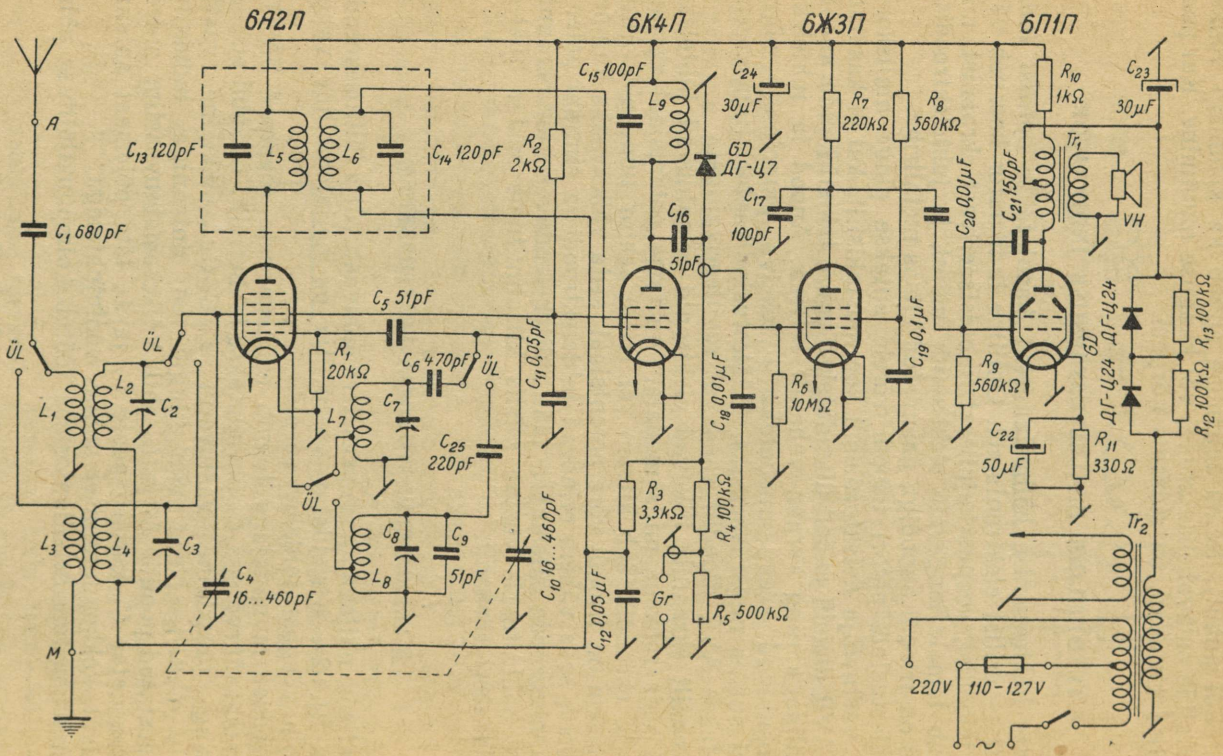
§ 12. SUPERVASTUVÕTJA LÜLITUSSKEEM

Vaatleme näitena ühe superheterodüünvastuvõtja lülitusskeemi [1] (joonis 21.32). Kirjeldatav vastuvõtja on neljalambiline vahelduvvoolu võrgust toidetav seadis.

Sageduse muundajana toimib esimene aste (heptood 6A2П). Selle lambi tüürvõrega G_3 ühendatakse ümberlüliti *ÜL* abil sisendvõnkering (kesklaine vastuvõtul L_2-C_2-C_4; pikklaine vastuvõtul L_4-C_3-C_4). Need võnkeringid on antenniga induktiivselt sidestatud poolide L_1 ja L_3 abil. Väikesemahtuvuseline antennikondensaator C_1 kaitseb poole L_1 ja L_3 läbi põlemast antenni juhuslikul kokkupuutumisel mõne voolujuhtmega.

Muundusastme ostsillaator-osa töötab kolmpunktlülituse põhi-

[1] M. Gansburgi ja D. Skorospelovi artiklist «Простой супергетеродин» ajakirjas «Радио» nr. 5/1956.



Joonis 21.32. Mitmeastmelise supervastuvõtja lülitusskeem.

mõttel. Ostsillaatori anood (selle ülesannet täidab varivõre) on vahelduvpinge mõttes maandatud. Võnkering L_7-C_7-C_6-C_{10} toimib vastavalt ümberlüliti *ÜL* asendile kesklainel ja võnkering L_8-C_8-C_9-C_{25}-C_{10} — pikklainel.

Sisend- ja ostsillaatorvõnkeringide häälestamine toimub üheaegselt — kahekordse pöördkondensaatori C_4-C_{10} abil.

Muundusastme anoodringi on ühendatud esimese vahesagedusribafiltri primaarne võnkering L_5-C_{13}, mis on häälestatud sagedusele 465 kHz. Vahesagedus-ribafiltri samale sagedusele häälestatud sekundaarsesse võnkeringi indutseerunud pinge kandub teise astme — vahesagedusvõimendaja lambi (6К4П) tüürvõrele. Selle lambi anoodkoormuse moodustab vahesagedusele häälestatud võnkering L_9-C_{15}.

Sidestuskondensaatori C_{16} kaudu kandub võimendatud pinge dioodi vooluringi. Antud juhul kasutatakse demoduleerimiseks ja võimenduse automaatse reguleerimispinge saamiseks germaaniumdioodi ДГ-Ц7 (*GD*). Detektori koormuseks on takisti R_4 ja potentsiomeeter R_5 (viimane on ühtlasi ka helitugevuse regulaatoriks). Helisageduspinge juhitakse potentsiomeetri liugkontaktilt kondensaatori C_{18} kaudu madalsagedusvõimendaja esimese astme lambi (6Ж3П) tüürvõrele.

Selles astmes puudub võre-eelpinge saamiseks tavaliselt kasutatav katoodtakisti ühes seda sildava suuremahtuvuselise kondensaatoriga. Lambi normaalseks tööks vajalik negatiivne eelpinge saadakse siin väga suure võre-äravoolutakistuse R_6 kasutamisega. Tühiselt väike võrevool, mis lambis tekib üksikute elektronide langemisel võrele, läbib takistit R_6 ja tekitabki sellel pingelangu, mida kasutatakse eelpingena. Võretakistuse suurus peab sellisel juhul olema umbes kümmekond megaoomi.

Kolmandas lambis võimendatud helisageduspinge kandub tavalise takisti-kondensaator-sidestuse (R_7-C_{20}-R_9) kaudu lõppastme (lambi 6П1П) tüürvõrele. Selle anoodkoormuse moodustab väljandtrafo Tr_1 kaudu valjuhääldaja *VH*.

Kahe esimese lambi varivõredele antakse sobiv alalispinge ühise eeltakisti R_2 kaudu ja kolmanda lambi varivõrele eeltakisti R_8 kaudu. Vahelduvpinge mõttes maandavad varivõresid kondensaatorid C_{11} ja C_{19}.

Automaatne võimenduse reguleerimine toimub esimese ja teise astme lampide eelpinge muutmise teel. Reguleerimispinge saadakse detektori koormuselt ja juhitakse lahtisidestusfiltri R_3-C_{12} kaudu lampide 6А2П ja 6К4П tüürvõredele. Tugevama sisendsignaali puhul kujuneb reguleerimispinge suuremaks ja lampide talitluspunktid kanduvad rohkem vasakule — väiksema tõusu piirkonda tunnusjoonel.

Lõppaste saab võre-eelpinge katoodtakistil R_{11} tekkiva ja kondensaatoriga C_{22} silutava pingelanguna.

Helikvaliteedi parandamiseks on vastuvõtja madalsagedusvõimendaja lõppastmes kasutatud negatiivset tagasisidestust anoodi

ja tüürvõre vahele lülitatud kondensaatori C_{21} abil. Saadav vastusidestus ühtlustab võimendaja sageduskarakteristikut.

Vastuvõtja lampide küttepinge saadakse võrgutrafo Tr_2 6,3-voldisest sekundaarmähisest. Anoodpinge saadakse 220-voldisest sekundaarmähisest kahe järjestikuse pooljuhtalaldaja ДГ-Ц24 kaudu.

Ebaühtlase koormamise vältimiseks vastupingega tõkestaval poolperioodil on kumbki alaldaja-element sillatud 100-kilo-oomise takistusega (R_{12} ja R_{13}).

Alaldatud anoodpinget silub filter, mis koosneb suuremahtuvuselistest elektrolüütkondensaatoritest C_{23} ja C_{24}. Filtri paispooli ülesannet täidab osa väljandtrafo Tr_1 primaarmähisest. Sellega on järjestikku ühendatud veel takisti R_{10}.

Elektrigrammofoni helipea ühendamiseks vastuvõtja madalsagedusvõimendaja sisendisse on ette nähtud ühenduskontakt «*Gr*».

22. PEATÜKK

TRANSISTORID

§ 1. ÜLDKÜSIMUSED

Peale varemkäsitletud pooljuhtseadiste — vaskoksüüd-, seleen- ja germaaniumdioodide, s. o. alaldavate lülituselementide, on kaasaegse tehnika kiire areng juurutamas raadiotehnikasse ka mitme elektroodiga pooljuhtseadiseid (germaanium- ja siliitsiumtrioode ning -tetroode), mis võivad suurel määral asendada elektronlampe.

Pooljuhttrioodide ehk *transistorite* kasutamise edasised perspektiivid on väga avarad, sest nad omavad elektronlampidega võrreldes rida eeliseid. Transistor töötab võimendajana märksa ökonoomsemalt elektronlambist, sest ta ei tarbi küttevõimsust ega vaja kõrget anoodpinget. Real juhtudel piisab transistorvõimendaja ainsa toiteallikana 1,5-voldisest kuivelemendist. Samuti ka asjaolu, et transistori vooluringides on enamasti tühised voolud ja väikesed pingelangud (välja arvatud muidugi võimsustransistorid), lubab kasutada tavalisest märksa väiksemate mõõdetega trafosid, takisteid ja kondensaatoreid ning «suruda» terve võimendaja kokku väga väikesesse ruumalasse.

Väikese toitevoolu ja -pinge tõttu tarbib transistorvõimendaja vaid üsna väikest võimsust, kuid annab väljandisse lülitatud tarbijale (näiteks valjuhääldajale) küllaltki suure osa sellest kasuliku võimsusena. Seega on transistorseadise kasutegur (kasuliku väljandvõimsuse ja toiteallikast võetava võimsuse suhe) kõrge — kuni 50% lampvõimendaja 3 . . . 15% asemel.

Transistorit iseloomustab veel võrratult pikem eluiga kui elekt-

ronlambil. Kui viimaste normaalseks talitluseaks loetakse umbes 1000 tundi, siis uuemad transistorid võivad töötada aja vältel, mis on juba täiesti võrreldav teiste raadiodetailide (takistid, kondensaatorid) elueaga. Ka on transistorid elektronlambist märksa väiksemad, kergemad ja mehaaniliselt vastupidavamad.

Praegu raskendab pooljuhttrioodide kasutamist rida nende juures esinevaid puudusi, mis on valmistamise tehnoloogia edasisel täiustamisel kindlasti kas suuremal või vähemal määral välditavad. Nendeks on peamiselt mõnevõrra piiratud sagedusala, parameetrite sõltuvus talitlustemperatuurist ja väga suur tundlikkus ülekoormamise suhtes.

Teatava piirsageduse ületamisel hakkab transistorvõimendaja võimendustegur järsult vähenema.

Pooljuhtseadiste puuduseks on parameetrite järsk halvenemine temperatuuri tõusmisel. Näitena võib tuua, et germaaniumdioodi tõkkesuunaline sisetakistus väheneb kümme korda temperatuuri tõusmisel 40 . . . 50° võrra.

Võimenduslülitustes transistoritega kasutatakse erilisi lülitusskeeme, mis võimaldavad vähendada parameetrite muutumist temperatuuri mõjul. Lihtsamal juhul ühendatakse selleks mõne elektroodi vooluringi lisatakisti, millel ilmub koos temperatuuriga muutunud voolu tõttu lisa-pingelang; see muudab vastava elektroodi talitluspinget ja taastab enam-vähem lülituse esialgsed omadused. Pooljuhttrioodid ei talu ülekoormust nii hästi kui näiteks elektronlambid. See tingib transistorite kasutamisel erilist ettevaatust — täpset talitluspingetest ja -vooludest kinnipidamist. Igas pooljuhtseadiste talitlusandmete tabelis on toodud nende maksimaalne koormatavus üksikutel elektroodidel, mida ei tohi ületada.

Võimenduslülitused transistoritega omavad madalamat sisendtakistust kui elektronlampidega lülitused. See võib tekitada mõnesuguseid raskusi astmete sidestamisel ja sisendpingeallika sobitamisel. Samal põhjusel on praegu veel raske korralikult rakendada transistorit tööle näiteks helisagedusvõimendaja sisendastmes, mida tüürib väga suure sisetakistusega kondensaatormikrofon, grammofoni piesoelektriline helipea või kristallmikrofon. Ka lisandub transistori omaduste tõttu võimendatavasse signaali häirekahin, mis kaasaegsetel kristalltrioodidel on mõnevõrra suurem lampvõimendaja omakahinast.

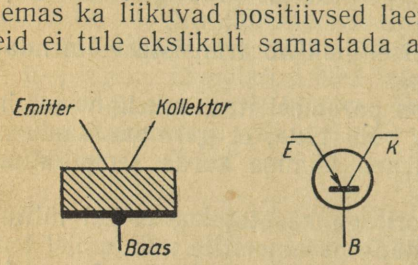
Kuna pooljuhtseadiste tootmine nõuab ülitäpset tehnoloogilist protsessi, siis on loomulik, et samatüübiliste transistorite üksikute eksemplaride parameetrid ei ühti veel kuigi täpselt. Need erinevused muidugi raskendavad pooljuhttrioodide massilist kasutamist.

Transistorvõimendusastme sisendring tarbib teatavat võimsust, sest tüürimine toimub siin v o o l u abil, vastandina lampvõimendajale, kus tüürpinge võrel üldiselt voolu ei tekita. Suurima võimenduse saamiseks tuleb transistorastmete sidestuselemendid valida niiviisi, et kanduks üle maksimaalne v õ i m s u s. (Lamp-

võimendaja puhul, mis töötab võrevooluta, s. o. võrepingete negatiivses alas, püütakse sidestuselementide abil üle kanda järgmisele astmele maksimaalne tüürp i n g e.)

§ 2. TRANSISTORI TALITLUSPÕHIMÕTE

Transistoris kasutatakse asjaolu, et elektrivool pooljuhis toimub kahte liiki laengukandjate ümberpaiknemisena. Negatiivsete laengukandjate (tähis: *n*), s. o. elektronide kõrval on pooljuhis olemas ka liikuvad positiivsed laengukandjad [1] (tähis: *p*). Viimaseid ei tule ekslikult samastada aatomi positiivset laengut kandvate koostisosadega — prootonitega, mis tahkes pooljuhis siiski liikuvad pole.



Joonis 22. 1. Punkttransistori põhimõtteline ehitus (*a*) ja transistori skeemitähis (*b*).

Positiivset laengukandjat tuleb siin vaadelda kui pooljuhi aine molekulaarse ehituse «riket», kui kohta, kus p e a k s olema elektron. Niisugused «augud» (elektrilaengu ruumilise jagunemise mõttes) võivad liikuda difusiooni [2] teel nagu elektronidki läbi pooljuhi kristalli ja moodustada voolu. Aukude kui positiivsete «laenguosakeste» liikumissuund pooljuhi kristallis on positiivselt potentsiaalilt negatiivsele.

Teatava muu keemilise elemendi tühine lisand pooljuhi kristallis võib esile kutsuda kas ülekaaluka elektron- või aukjuhtivuse. Niiviisi saab soovikohaselt valida terve pooljuhi kristalli või selle mõne tsooni (piirkonna) juhtivuse iseloomu. Ülekaaluka elektronjuhtivuse korral kõneldakse *n-tüüpi* ja aukjuhtivuse korral *p-tüüpi* pooljuhist või selle üksikust tsoonist.

Transistore liigitatakse tsoonide järjestuse, elektroodide kuju, samuti ka pooljuhi materjali järgi. Kontaktpindade iseloomu järgi eristatakse siin, nagu pooljuhtdioodidegi puhul, punkt- ja pindtrioode.

Punkttrioodi põhimõttelist ehitust kujutab joonis 22. 1. Samas on toodud ka transistori skeemitähis. Punkttriood sarnaneb ehituselt punktdioodiga, mida kirjeldati 17. peatüki 5. paragrahvis. Germaaniumi kristallikese pinda puudutab kaks väga lähestikust (mõnikümmend mikronit) metallelektroodi — *emitter* (tähis *E*) ja *kollektor* (*K*); kumbki annab germaaniumiga unipolaarse (s. o.

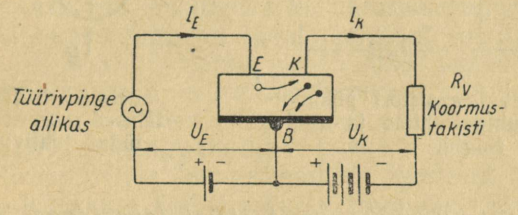
[1] Neid tegelikult pole, kuid pooljuhtides toimuvad protsessid on kirjeldatavad sellise hüpoteesiga.

[2] Difusioon — ühe aine osakeste (antud juhul laengukandjate) segunemine teise aine osakestega (antud juhul pooljuhi molekulidega), mis toimub molekulide soojusliku liikumise tulemusena, väliste jõudude kaasabita.

ühes suunas eelistatuma) juhtivusega kontakti. Kolmas elektrood — *baas* (*B*) moodustab kristalliga suurepinnalise ühenduse. Germaaniumi kristallis, mis omab *n*-juhtivust, tekitatakse kontakt-elektroodide juures erilise töötlemise teel *p*-juhtivusega alad — emitteri ja kollektori tsoonid.

Emitteri ja kollektori alaldavad omadused ilmnevad germaaniumis tekkivate elektriliste tõkkekihtide tõttu. Juhtivas (ava-) suunas on tõkkekihi takistus mõnisada oomi, kuid tõkestavas (tõkke-) suunas mitu tuhat korda suurem.

Kui *n*-tüüpi juhtivusega punkttransistori kollektorile anda tõkkesuunaline negatiivne potentsiaal, siis selle elektroodi tõkkekiht avaldab suurt takistust ja pooljuhis suundub kollektorilt baasile nõrk elektronide vool (joonis 22. 2). Emitteri pingestamisel



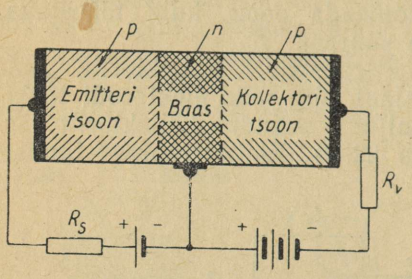
Joonis 22. 2. Transistori pingestamine ja vooluringid.

baasi suhtes väikese avasuunalise positiivse pingega injekteerub emitteri lähedusest germaaniumi kristalli muusse osasse auke (joonisel on elektronid kujutatud mustade ja augud valgete ringikestena), mis suunduvad kollektorile, selle elektroodi voolu suurendades. Augu elektriliseks neutraliseerimiseks vajalik elektron võetakse kollektorilt, seega välisest vooluringist.

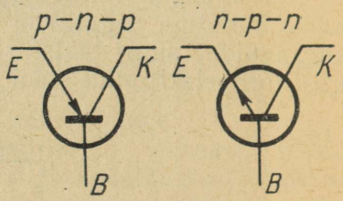
Iga emitterilt injekteerunud auk, mis läbib kollektori tõkkekihti, kergendab elektronidel tõkkekihi läbimist ja suurendab seega ka kollektorilt baasile suunduvat elektronide voolu. Selle tagajärjel kutsub emitteri voolu muutmine esile ka kollektorilt baasile suunduva voolu muutuse. Taoline nähtus on suurel määral analoogiline protsessidega elektronlambis, kus võre potentsiaal tüürib katoodilt emiteerunud elektronide anoodile suunduvat voolu.

Punkttrioodide kõrval kasutatakse sagedustel kuni paari megahertsini kihilise ehitusega *pindtrioode*. Joonisel 22. 3 skemaatiliselt kujutatava pindtrioodi *p*-tüüpi germaaniumkristalli keskosas on loodud õhuke 0,1 kuni 0,01 millimeetri paksune *n*-tüüpi germaaniumi kiht. Kristall jaguneb seega kolmeks osaks. Erineva juhtivusiseloomuga kihtide järjestuselt kuulub vaadeldav triood *p-n-p*-tüüpi, kuid on ka *n-p-n*-tüüpi transistoreid, kus emitterit ja kollektorit ümbritsevad kihid omavad elektronjuhtivust ja keskmine, baasi ümbritsev kiht — aukjuhtivust.

Erinevasse juhtivustüüpi kuuluvate transistorite elektroodidele antakse vastupidised talitluspinged. Kui *p-n-p*-tüüpi pooljuhttrioodi emitter pingestatakse baasi suhtes positiivselt ja kollektor negatiivselt, siis *n-p-n*-tüüpi pooljuhttrioodi emitter saab negatiivse ja kollektor positiivse talitluspinge. Erinevuse rõhutamiseks kasutatakse kummagi tüübi jaoks pisut lahkuminevat skeemitähist (joonis 22. 4).



Joonis 22. 3. Pindtransistori põhimõtteline ehitus, pingestamine ja vooluringid.



Joonis 22. 4. Transistori skeemitähised *p-n-p*-tüüpi (*a*) ja *n-p-n*-tüüpi juhtivuse puhul (*b*).

Pindtransistoril on erinevat tüüpi tsoonidega liidetud mittealaldavad kontaktid ning kristalli iga osa osutub tervikuna võttes vastavalt emitteriks, baasiks või kollektoriks.

Kui kollektoril on tõkkesuunaline pinge, s. t. kui *p-n-p*-transistori kollektor on baasi suhtes negatiivne (joonis 22. 3), siis voolab läbi kollektori tõkkekihi nõrk vool. Kui pingestada ka emitter, siis injekteerub kristalli läbi emitteri tõkkekihi auke, mis tõmbuvad kollektorile, suurendades voolu selle elektroodi ringis.

Voolu abil kristalltrioodi emitteri ringis on järelikult võimalik tüürida voolu kollektori ringis. Kollektori voolu I_K ja emitteri voolu I_E muutuste suhe

$$\alpha = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E}$$

on pooljuhttrioodi *vooluvõimendustegur*. See on suurusjärgus $\alpha = 0{,}8 \ldots 0{,}98$ pindtrioodidel ja $\alpha = 1{,}5 \ldots 5$ punkttrioodidel [1]. Kuigi transistori vooluvõimendustegur pole suur, saadakse võimendaja lülituse sisend- ja väljandringide takistuste erinevuse tõttu siiski tunduv võimendus pinge ja võimsuse osas (transistori kollektori ringi takistus on tunduvalt suurem emitteri ringi takistusest, sest esimene pingestatakse tõkke- ja teine avasuunas).

Samas mõttes eristatakse ka transistorlülituse pingevõimen-

[1] Esimesed ei anna seega vooluvõimendust, kuid nendega võib saada suure pinge- ja võimsusevõimenduse. Teised annavad ka vooluvõimenduse.

dust K_u ja võimsusevõimendust K_p, samuti ka vooluvõimendust K_i. Omavahel on need seotud järgmiselt:

$$K_p = K_i K_u.$$

Need kolm suurust iseloomustavad transistorlülitust kui tervikut ning olenevad võimendusastme talitlusrežiimist — takistuste suurustest vooluringides, elektroodide pingetest, vooludest jne. Nii võiks transistorastme võimendust K_u teataval määral samastada elektronlamp-võimendusastme võimendusega K.

Elektronlambi ja transistori kui võimendajate võrdlemisel selgub ka nende põhiline erinevus. Kui elektronlambi anoodvoolu mõjutamine võrepingega kaudu võib toimuda tüürvõimsuseta, siis transistori kollektorvoolu tüürimiseks tuleb emitteri vooluringi aktiivtakistusel alati tarvitada teatavat võimsust. Sellest tingituna tulebki kasutada arvutustes ka võimsusevõimendust K_p.

Elektronlampides liiguvad laengukandjad (emiteerunud elektronid) katoodilt anoodile nende elektroodide vahelise elektrostaatilise välja mõjul. Voolu muutmine toimub siin katoodi ümbruses asuva elektrivälja mõjutamise teel võre potentsiaaliga. Pooljuhttrioodides liiguvad laengukandjad (elektronid või augud) emitterilt kollektorile nende laengukandjate kontsentratsiooni erinevuste tõttu elektroode ümbritsevates tsoonides. Emitteri tsoonis on laengukandjate tihedus suurem, mistõttu nad liiguvad sealt difusiooni teel mööda kristalli laiali. Muidugi toimub see protsess märksa aeglasemalt kui vabade elektronide liikumine elektronlambi elektroodide vahelises tühjas ruumis tugeva elektrivälja mõjul. Laengukandjate aeglane liikumine ongi peamiseks põhjuseks, mis takistab praeguste transistorite kasutamist kõrgematel sagedustel.

Transistori kollektorvoolu tüürimine toimub laengukandjate kontsentratsiooni muutmisega. Selleks kuluv energia võetakse tüürpingeallikast (laengukandjate kontsentratsiooni muutmine kristallis võib toimuda ainult voolu abil!).

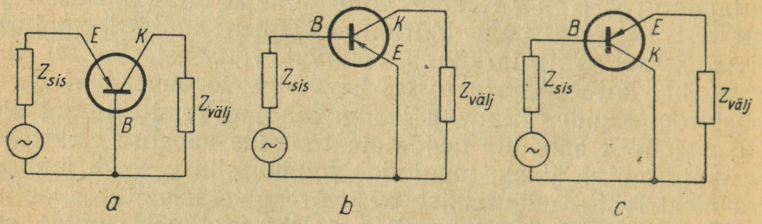
Lülitusskeemid pooljuhttrioodidega jagunevad oma iseloomult kolme rühma, sõltuvalt sellest, milline tema elektroodidest kuulub üheaegselt nii sisend- kui ka väljandringi. Joonis 22.5 kujutab neid võimalusi. Ülevaatlikkuse mõttes pole toitepingeallikaid sellel joonisel kujutatud, sest elektroodide pingestamine võib toimuda mitmeti, nagu edaspidi näeme.

Transistori lülitus ühise (vahelduvvoolu mõttes maandatud) baasiga, nn. *baaslülitus* (joonis 22.5-*a*) sarnaneb elektronlambi lülitusega, kus võre on maandatud ja anoodvoolu tüürimine toimub katoodi potentsiaali muutmisega. Kuna pindtransistori kollektorvool ja emittervool kuuluvad samasse suurusjärku, siis ilmub baasil ainult võrdlemisi nõrk nende vahega võrduv vool. See annab võimaluse transistorlülituse tüürimiseks baasi kaudu, kui vahelduvvoolu mõttes maandada emitter või kollektor.

Ühise (maandatud) emitteriga lülitus, nn. *emitterlülitus* (joo-

nis 22.5-*b*) vastab lamptrioodi tavalisele kasutamisviisile, kus katood on ühiseks elektroodiks sisend- (võre-) ja väljand- (anood-) ringides.

Viimane, s. o. *kollektorlülitus* (joonis 22.5-*c*), vastab lampvõimendajale, mille koormustakisti asub katoodringis, s. o. katood-väljandiga astmele. Selle puhul on transistorvõimendaja lülituse sisendtakistus märksa suurem väljandtakistusest ja võimendus on väike. Maandatud kollektoriga transistoraste leiab kasutamist erineva takistusega vooluringide sobitajana, võimaldades vajaduse korral saada võimendaja esimeses astmes suuremat sisendtakistust.



Joonis 22.5. Baaslülitus (*a*), emitterlülitus (*b*) ja kollektorlülitus (*c*). Toiteallikaid pole näidatud.

Teatava koormustakistuse R_k juures on sisendtakistus Z_{sis} minimaalne baaslülituse puhul ja maksimaalne kollektorlülituse puhul. Näiteks pindtrioodi П1Б puhul, kui $R_k = 10$ kilo-oomi, on sisendimpedants Z_{sis} kolme lülituse jaoks vastavalt 60, 500 ja 150 000 oomi [1].

Väljandimpedants $Z_{välj}$ on maksimaalne baaslülituse puhul ja minimaalne kollektorlülituse puhul. Kui tüürpingeallika sisetakistus (või eelneva astme väljandtakistus) on 1000 oomi, siis trioodi П1Б väljandtakistus on kolme lülituse jaoks vastavalt 600 000, 70 000 ja 150 oomi [1].

Vooluvõimendus K_i on baaslülituse puhul võrdne α-ga ning emitter- ja kollektorlülituse juures omavahel peaaegu võrdsed (näiteks pindtrioodi П1Б puhul $\alpha = 0{,}93$ juures on K_i viimaste lülituste puhul võrdne vastavalt 15 ja 16). Baas- ja emitterlülituse puhul on pingevõimendused K_u praktiliselt võrdsed ja kollektorlülituse pingevõimendus on pisut väiksem ühest. Suurima võimsusevõimenduse K_p annab enamasti emitterlülitus. Lisaks sellele hõlbustab emitterlülituse kasutamine astmete sidestamist, kuna sellel juhul erinevad Z_{sis} ja $Z_{välj}$ kõige vähem teineteisest ja astmete sobitamine lihtsustub. Seevastu on baaslülitus seni ainsaks skeemiks, mis võimaldab punkttrioodidega küllaldaselt stabiilset võimendust kõrgsagedustel.

[1] Andmed on võetud brošüürist Е. В. Гершзон и И. Ф. Николаевский. «Полупроводниковые триоды в схемах радиовещательной и телевизионной аппаратуры» (Массовая радиобиблиотека, № 266).

Pindtriood annab küll suurema väljandvõimsuse, samuti on temas tekkivad häirepinged (kahinad) väiksemad kui punkttrioodil, kuid tema halvaks omaduseks on võimenduse vähenemine kõrgematel sagedustel. See on tingitud sisemahtuvusest, laengukandjate liikumiskiiruste ebaühtlusest, nende mitteküllaldasest liikuvusest kristallis ning muudestki teguritest.

Transistorite parameetrite tabelites antakse iga tüübi kohta piirsagedus f_{piir}, s. o. sagedus, mille ületamisel võimendus langeb juba alla 70 protsendi normaalsest võimendusest madalatel sagedustel (tavaliselt 1000 hertsi puhul).

Nagu elektronlampe, nii iseloomustatakse transistoreidki tunnusjoonte abil. Kuid siin tuleb märkida mõningaid erinevusi.

Pooljuhttrioodide puhul esineb väljandringi tagasimõju sisendringile, mida põhjustab ühise (s. o. vahelduvvoolu mõttes maandatud) elektroodi ja selle tsooni üleminekutakistus (teatav osa seadise sisetakistusest). Ka tarbib transistor tüürvõimsust. Seepärast ei piisa transistorlülituse režiimi ja parameetrite määramiseks ühest sarjast tunnusjoontest, nagu lampskeemide puhul.

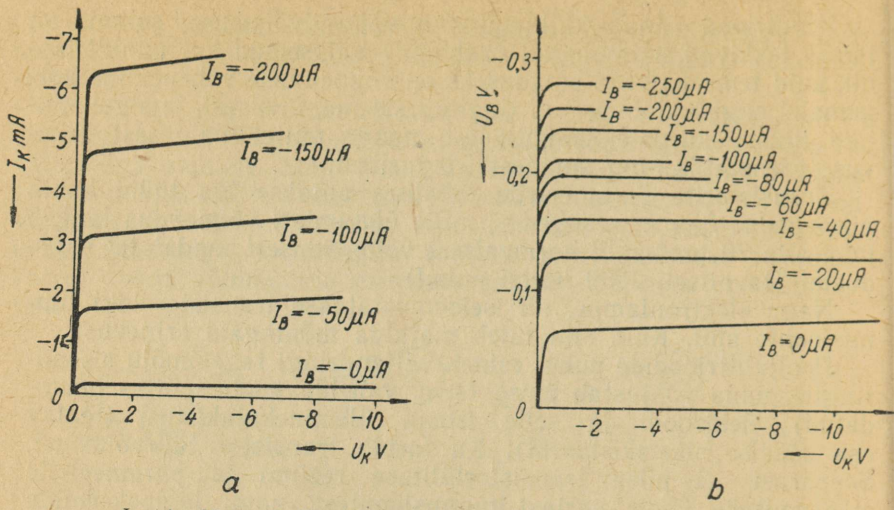
Lülitustes transistoritega tuleb olulist tähelepanu omistada tüürimisrežiimile, kuna siinsel juhul on tegemist palju väiksemasse suurusjärku kuuluva sisendtakistusega kui lülitustes elektronlampidega. Transistorit saab tüürida pingega või vooluga, vastavalt tüüriva generaatori sisetakistusele. Väga väikese sisetakistusega tüüriva vahelduvpinge generaatori puhul tuleb vaadelda seda tüür p i n g e allikana ja väga suure sisetakistuse puhul tüür v o o l u allikana. Praktiliselt töötab iga transistorlülituse sisendring mingis nende kahe äärmusliku olukorra vahelises režiimis ning tüürimisprotsessis tarbitakse tüürivast generaatorist võetavat võimsust. Sellel põhjusel ei saa transistorlülituse tööprotsessi kirjeldada üheainsa tunnusjoonte sarja abil, nagu elektronlampide puhul, vaid selleks peab kasutama kahte sarja — sisendringi ja väljandringi kohta eraldi.

Joonis 22.6 kujutab ühe emitterlülituses transistori tüüpilisi tunnusjoonte sarju. Nendest sari *a* iseloomustab lülituse kollektorpinge U_K (väljandpinge) ja kollektorvoolu I_K (väljandvoolu) omavahelist sõltuvust baasvoolu I_B (sisend- e. tüürvoolu) mitmesuguste väärtuste juures.

Tunnusjoonte sari *b* samal joonisel iseloomustab selle transistori kollektorpinge U_K (lülituse väljandpinge) ja baaspinge U_B (lülituse sisendpinge) omavahelist sõltuvust mitmesuguste baasvoolude I_B (lülituse sisendvoolude) puhul.

Staatilised tunnusjooned sobivad talitluspunkti määramiseks, kuid nende abil on tülikas leida skeemi võimendust ning sisend- ja väljandtakistust [1].

[1] Nende suuruste määramist käesolevas õpikus ei käsitleta. Vajaduse korral tuleb pöörduda spetsiaalsema kirjanduse poole.



Joonis 22.6. Emitterlülituses transistori tunnusjoonte sarjad.

Enamasti antakse pooljuhttrioodide tunnusjoonte sarjad emitterlülituse jaoks, sest seda kasutatakse kõige rohkem ja nendest on parameetrid kõige täpsemini määratavad [1].

§ 3. NSV LIIDUS TOODETAVATE TRANSISTORITE ISELOOMUSTUSI

Nõukogude Liidus toodetavate transistorite tähised koosnevad kahest tähest ja nende vahel asuvast numbrist. Esimene täht määrab liigi: C tähistab punkt- ja П — pindtrioode.

Number määrab grupi ja viimane täht — üksiku tüübi vastavas grupis. Kõik ühisesse gruppi kuuluvad tüübid on mõeldud kasutamiseks samalaadsetes tingimustes.

Gruppi C1 kuuluvad trioodid omavad suhteliselt väikest vooluvõimendustegurit ($\alpha = 1{,}2 \ldots 1{,}5$) ning gruppi C2 kuuluvad trioodid mõnevõrra suuremat ($\alpha = 1{,}5 \ldots 1{,}6$). Esimesed on mõeldud võimendajateks ja teised — generaatoriteks (piirsagedustega 0,5 kuni 5 MHz, olenevalt tüübist).

Grupi П1 moodustavad väikese võimsusega (kuni 50 mW) pindtrioodid, mis töötavad helisagedus- või vahesagedusastmetes (piirsagedused 100 kuni 465 kHz). Gruppi П2 kuuluvad madalsagedusvõimendaja lõppastmes kasutatavad väikesevõimsuselised trioodid ja П3 ning П4 — suurema võimsusega lõpptransistorid.

---

[1] Andmeid NSV Liidus toodetavate transistorite tunnusjoonte kohta vt. Р. Ф. Ши. «Усилители звуковой частоты на полупроводниковых триодах», 1957.

Gruppidesse П5 ja П6 kuuluvad universaalsed transistorid, mis sobivad kasutamiseks nii madal- (eelastmena) kui ka vahesagedusvõimendajates.

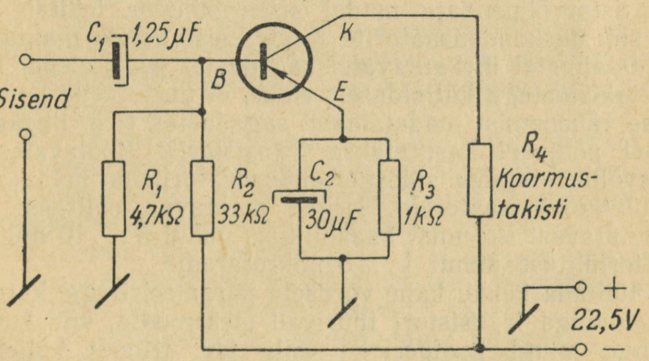
§ 4. MADALSAGEDUSLÜLITUSED

Põhiliseks küsimuseks mitmeastmelise madalsagedusvõimendaja konstrueerimisel on üksikute astmete transistorite sisend- ja väljandringide omavaheline sobitamine maksimaalse võimsuse ülekandeks (vt. 18. peatüki 2. paragrahvi) ning võimendaja sisendi ja väljandi sobitamine vastavalt helipinge allikaga ja tarbijaga. Lampvõimendaja puhul võib enamasti minna mööda sisendtakistuse mõju arvestamisest, sest võreringis puudub vool. Transistorvõimendaja astme sisendtakistus on aga üldiselt (olenevalt lülitusest) tunduvalt väiksem tema väljandtakistusest ja tavaliselt ka väiksem koormustakistusest kollektorringis. Niisiis on iga aste koormatud järgneva astme sisendtakistusega, mida ei saa jätta arvestamata. (Erandi moodustab siin muidugi kollektorlülitus oma suure sisend- ja väikese väljandtakistusega.)

Helisagedusvõimendajad varustatakse pindtrioodidega, kuna nende omakahinad on märksa nõrgemad kui punkttrioodidel. Selle kõrval on nende muudki omadused — võimendus ja stabiilsus — paremad. Ühtlasi ei tule just helisagedusvõimendajate konstrueerimisel arvesse punkttrioodi iseloomulik paremus — kõrgem piirsagedus.

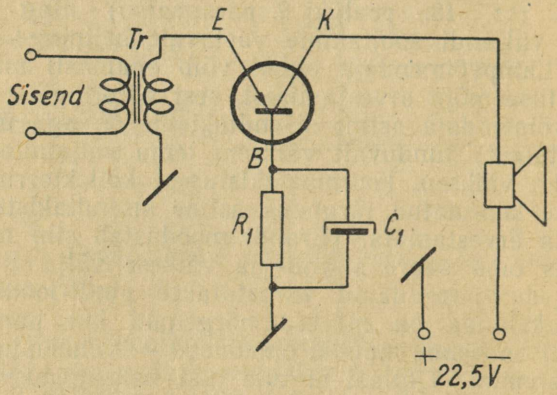
Eelastmetes, kus toimub nõrkade tüürvoolu amplituudide võimendamine, kasutatakse emitterlülitust (joonis 22. 5-*b*), mis annab suurima võimenduse ja suhteliselt suure sisendtakistuse.

Joonisel 22. 7 toome näitena emitterlülituses üheastmelise helisagedusvõimendaja skeemi. Tüürvool läbib sidestuskondensaatori C_1, transistori baasi ja emitteri vahelise sisetakistuse ning kondensaatori C_2. Signaaliallika sisetakistus peab siin olema väike, sest pooljuhttrioodi tüürimine toimub vooluga, mitte pin-



Joonis 22. 7. Helisageduse emitterlülituses võimendusaste.

gega. Kollektorringis tekkiva voolu vahelduvkomponent annab koormustakistil R_4 väljandpinge. Takistid R_1 ja R_2 moodustavad pingejagaja, mis koos takistiga R_3 määrab baasi negatiivse eelpinge emitteri suhtes (ehk emitteri positiivse pinge baasi suhtes). Tänu nendele saab lülitust toita ühest pingeallikast. Maandatud baasiga üheastmelise transistorvõimendaja lülituse näitena esitame skeemi joonisel 22. 8. Emitteri positiivne eelpinge baasi suhtes saadakse siin kollektorvoolu poolt tekitatava pingelanguna

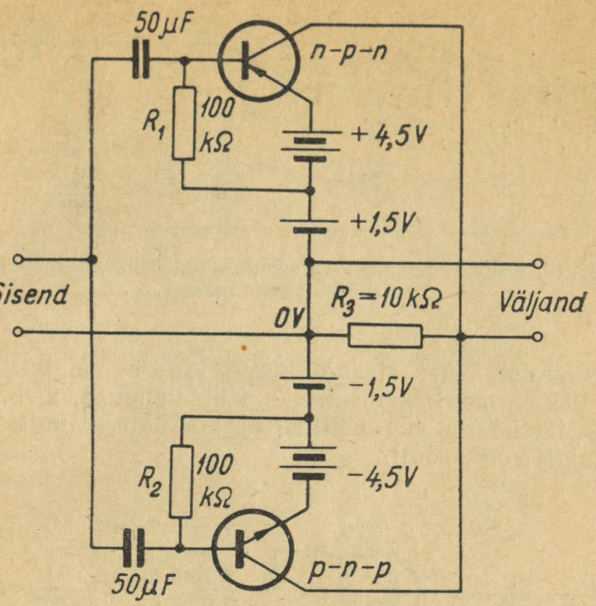


Joonis 22. 8. Helisageduse baaslülituses võimendusaste.

takistil R_1, mida silub suuremahtuvuseline kondensaator C_1. Maandatud baasiga transistori sisendtakistus on mõnevõrra väiksem kui maandatud emitteriga lülitusel; sisendpinge võib küündida 60 kuni 70 millivoldini, võimendustegur 60-ni ja sagedus-karakteristik on 100 kuni 10 000 hertsi vahemikus küllaldaselt ühtlane.

Transistorvõimendaja madal sisendtakistus tekitab vajaduse suurte sidestuskondensaatorite järele, sest nende mahtuvustakistus madalaimatel ülekantavatel sagedustel peab olema võrreldes skeemi takistustega küllaldaselt väike, et mitte esile kutsuda võimenduse vähenemist madalamatel sagedustel, s. o. lineaarmoonutust. Sel põhjusel kasutatakse transistoritel töötavates madalsagedusvõimendajates sidestuskondensaatoritena madalapingelisi elektrolüütkondensaatoreid. Nende mahtuvus valitakse sõltuvuses kasutatavast skeemist baaslülituse puhul 5 . . . 10 mikrofaradit ja emitterlülituse puhul 1 . . . 5 mikrofaradit.

Kui lülitada kokku kahe võrdsete parameetritega, kuid erineva juhtivustüübiga transistori tüürivad elektroodid, siis kutsub signaalipinge mingi poolperiood esile ühe trioodi kollektorvoolu suurenemise ja teise samaaegse vähenemise. Seega võib erinevat juhtivustüüpi trioodide paari kasutada omapärases vastastakt-



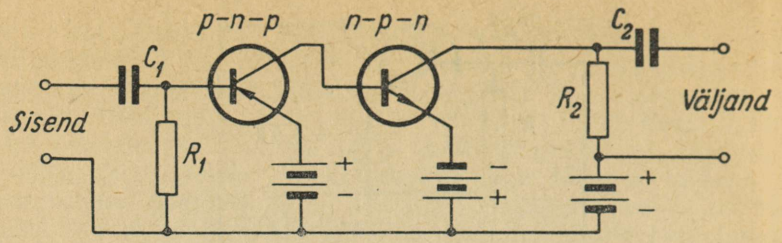
Joonis 22. 9. Vastastaktlülitus erinevat juhtivusiseloomu omavate transistoritega.

lülituses, ilma et oleks vaja faasipöörajat või väljavõttega väljandtrafot (joonis 22.9). Sisendsignaali positiivse poolperioodi vältel väheneb kollektori ja emitteri vaheline takistus *n-p-n*-tüüpi transistoril ja suureneb *p-n-p*-tüüpi transistoril ning kummagi kollektorid muutuvad negatiivsemaks. Analoogiliselt väheneb sisendsignaali negatiivne poolperiood sisetakistust *p-n-p*-tüüpi trioodil ja suurendab seda *n-p-n*-tüüpi trioodil, mille tõttu kollektorid muutuvad positiivsemaks. Väljandpinge saadakse kollektorite vooluringi ühiselt koormustakistilt R_3.

Kuna taoline lülitus annab umbes paarisaja kordse võimenduse, sagedusriba ulatub 10 000 hertsini ja väljandvõimsusest piisab valjuhääldaja toitmiseks, siis on ta sobiv helisagedusvõimendaja lõppastmeks.

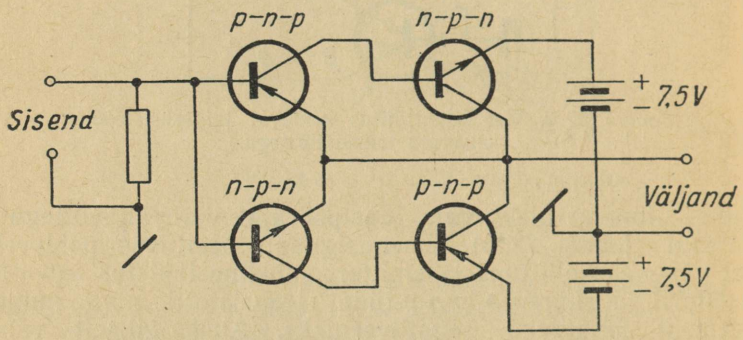
Kahe erineva juhtivustüübiga transistori kasutamisel järjestikustes võimendusastmetes saab vältida sidestuselemente. Kuigi sarnane lülitus (joonis 22. 10) annab «normaalses» takisti-kondensaator-sidestuses astmetega võrreldes tunduvalt väiksema võimenduse (astme võimendustegur on alla 25), on tema eeliseks lihtsus. Samade toiteallikate kasutamisel saab tarviduse kohaselt lisada järjestikku mitu niisugust astmete paari.

Samalaadne otsesidestuses skeem, mida kasutatakse B-klassi režiimis töötavas vastastakt-lõppastmes, on antud joonisel 22. 11. Selleski lülituses puudub sisend- ja väljandtrafo ning faasipöö-



Joonis 22. 10. Kaks järjestikust võimendusastet erinevat juhtivusiseloomu omavate transistoritega.

raja. Võrdlemisi suure sisendtakistuse juures on väljandtakistus seevastu väga madal: koormuseks võib vahetult, s. o. ilma sobitustrafota, ühendada dünaamilise valjuhääldaja umbes 16-oomise impedantsiga võnkepooli.

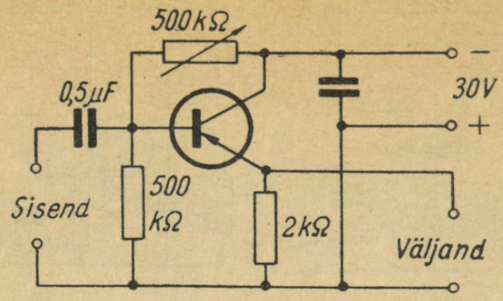


Joonis 22. 11. Otsesidestuses B-klassi lõppaste erinevat juhtivusiseloomu omavate transistoritega.

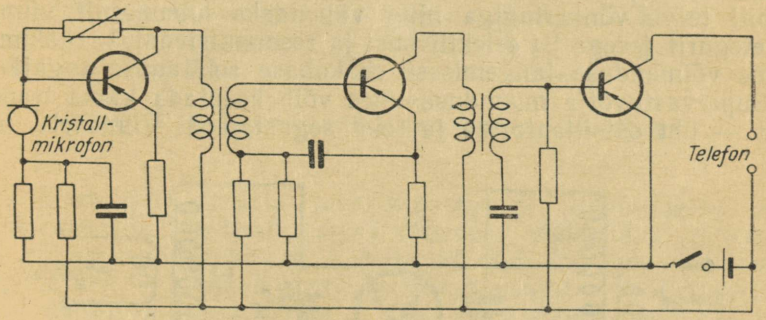
Sisendsignaali puudumisel tarbitav vool on tühine, seega töötab võimendaja eriti ökonoomses režiimis. Lülituse pingevõimendus on pisut alla ühe, kuid võimsusvõimendus ületab 25 detsibelli.

Kõrgeoomiliste tüürpingeallikate (näiteks kristallmikrofonide ja -helipeade) sobitamiseks madala sisendtakistusega transistorvõimendaja astmetega võib kasutada kollektorlülituses eelastet, kus koormus on emitteri vooluringis (joonis 22. 12). Niisugune lülitus mõjub justkui «sisendtrafona». Pinge vähenemine sellises «transformaatoris» pole märgatav, kuid takistuse muutus «sekundaarses» (s. o. väljand-) ringis on «primaarse» (s. o. sisend-) ringiga võrreldes väga tunduv.

Näitena transistorvõimendaja astmete trafosidestusest toome ühe kuuldeaparaadi lülitusskeemi (joonis 22. 13).



Joonis 22. 12. Suure sisendimpedantsiga ja väikese väljandimpedantsiga transistorlülitus (kollektorlülitus).



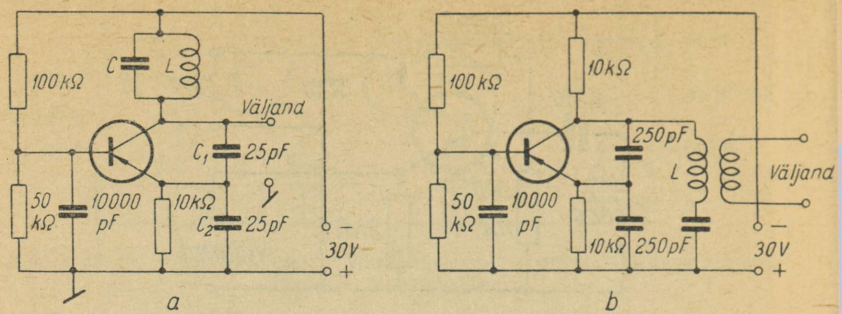
Joonis 22. 13. Trafosidestuses transistorvõimendaja (kuuldeaparaadi) lülitusskeem.

§ 5. KÕRGSAGEDUSLÜLITUSED

Sobivalt tagasisidestatud pooljuhttrioodi vooluringides saab tekitada kustumatut võnkumist. Joonis 22. 14-*a* kujutab supervastuvõtjas kasutatavat ostsillaatorlülitust. Võnkering *L-C* on kollektori vooluringi koormuseks ning tagasiside emitterile antakse mahtuvusliku pingejagaja C_1-C_2 kaudu. Nende kondensaatorite mahtuvuste suhe määrab tagasiside tugevuse. Teine samalaadne ostsillaatorlülitus on kujutatud joonisel 22. 14-*b*.

Kõrgsagedusvõimendaja ehitamisel, nagu madalsagedusvõimendaja puhulgi, on põhiliseks küsimuseks astmete väljand- ja sisendtakistuste sobitamine. Selleks kasutatakse enamasti väljavõtetega võnkeringe, s. t. autotransformatoorset sidestust.

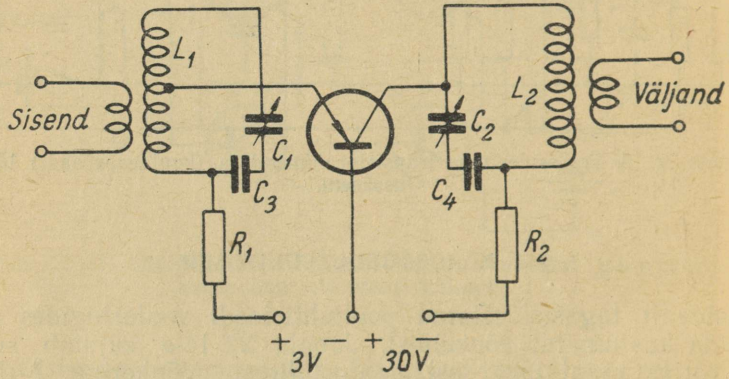
Lülitus transistoriga, mille emitteri vooluringis on sisendvõnkering ja kollektori ringis on väljandvõnkering, moodustab kõrgsagedusvõimendaja. Kuna transistorvõimendaja sisendtakistus on võnkeringi resonantsitakistusega võrreldes küllaltki väike, siis võetakse sisendpinge võnkeringilt L_1-C_1 autotransformatoorselt



Joonis 22. 14. Supervastuvõtjates kasutatavaid ostsillaatorlülitusi transistoritega.

(joonis 22. 15). Vastasel korral mõjuks transistori sisendtakistus rööbiti terve võnkeringiga ning vähendaks lubamatult viimase hüvetegurit (seega ka selektiivsust ja resonantsivoolu), rääkimata astme võimenduse langemisest ebakohase sobitamise tagajärjel.

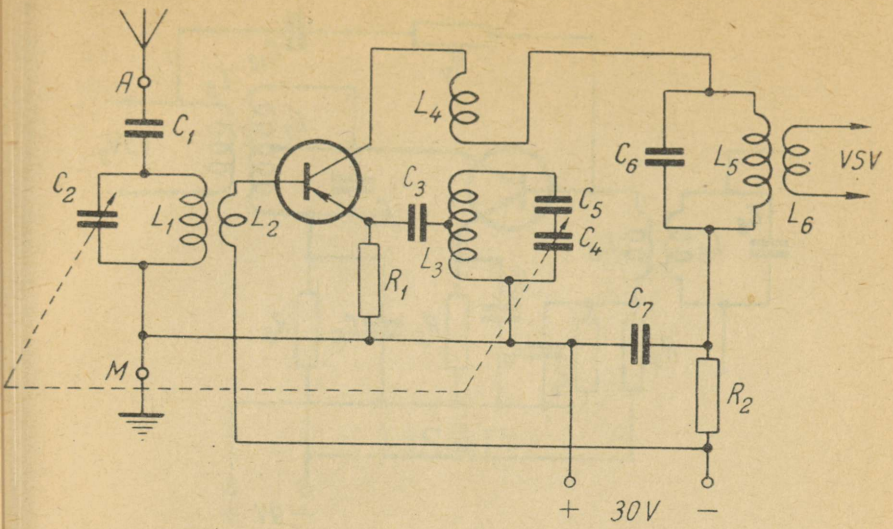
Supervastuvõtja muundusastmes võib kasutada kahte transistorit — üht ostsillaatorina ja teist segustajana. Viimasele juhi-



Joonis 22. 15. Kõrg- või vahesagedusvõimendaja aste transistoriga.

takse sisendsignaal ja ostsillaatorvool. Segustaja ülesannet võib täita ka pooljuhtdiood. Levinud on ka muunduslülitused transistoriga (joonis 22. 16), mis töötab ühtaegu nii ostsillaatorsageduse generaatorina kui ka segustajana. Segustajana või muundajana töötava transistori talitluspunkt viiakse emitteri tunnusjoonte suurima kõverusega piirkonda. Signaali ja ostsillaatori voolu võib anda ühele ja samale elektroodile, näiteks induktiivse sidestuse teel, või ka erinevatele elektroodidele.

Praegukirjeldatava lülituse sisendvõnkering L_1-C_2 on sidestatud antenniga kondensaatori C_1 kaudu. Võnkeringi pinge tuleb

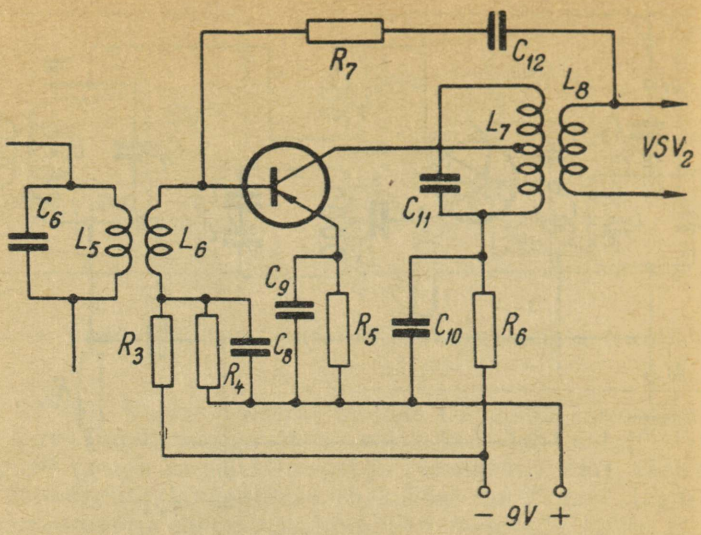


Joonis 22. 16. Supervastuvõtja muundusaste transistoriga.

siingi transistori madala sisendtakistusega sobitamiseks alla transformeerida, vastasel korral väheneks võimendus ja suureneks võnkeringi sumbuvus. Sobitamist võib teostada autotransformatoorselt — väljavõttega võnkeringi poolilt — või induktiivselt — iseseisva sidestuspooli L_2 abil, nagu antud juhul. Eralduskondensaator C_3 väldib emittertakisti R_1 lühistumist (alalisvoolu mõttes) läbi ostsillaatori pooli ning takistid R_1 ja R_2 on elektroodide pingestamiseks. Muundusastme transistori baasile antakse emitteri suhtes mõne kümnendiku voldi suurune negatiivne pinge ning kogu lülitus vajab 10 ... 30-voldist talitluspinget. Ostsillaatorsagedusele häälestatud võnkering L_3-C_4-C_5 emitteri vooluringis saab võimendatud energiat kollektorringist tagasi pooli L_4 kaudu ning küllaldase tagasiside puhul tekib võnkumine. Kondensaator C_5 on kokkujooksu saavutamiseks sisend- ja ostsillaatorvõnkeringi vahel nende üheaegsel häälestamisel kahekordse pöördkondensaatoriga C_2-C_4.

Kollektorvoolu vahesageduskomponent kandub sellele sagedusele häälestatud võnkeringi C_6-L_5 ja sidestuspooli L_6 kaudu esimese vahesagedusastme sisendisse. Muundusastme soovimatu sidestumise vältimiseks toiteallika kaudu teiste astmetega kasutatakse toiteringis lahtisidestusfiltrit R_2-C_7.

Vahesagedusvõimendajas kasutatakse maandatud emitteriga transistorlülitust (joonis 22. 17), mille kõrgsagedustransformaatorite L_5-L_6 ja L_7-L_8 ülekandetegurid valitakse tunduvalt väiksemad ühest. Pingejagaja R_3-R_4 baasi vooluringis ja takistid R_5 ning R_6 määravad transistori talitlusrežiimi.



Joonis 22. 17. Supervastuvõtja vahesagedusaste transistoriga.

Kuna baasi ja emitteri vaheline sisetakistus ning sisemahtuvus sõltuvad voolust, siis esineb teatav tagasimõju (positiivse või negatiivse tagasisidena) transistoris eneses. Selle neutraliseerimine, mis on vajalik kõrg- või vahesagedusvõimendaja talitlusrežiimi stabiliseerimiseks (näiteks endaergutuse vältimiseks soovimatul positiivsel tagasisidestumisel), teostatakse järjestikuse takisti R_7 ja kondensaatori C_{12} abil vastavalt skeemile. Selle kõrval on kasutusel ka teisi neutraliseerimisviise.

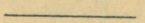
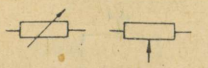
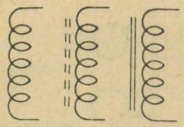
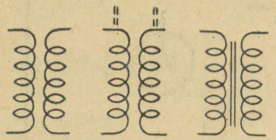
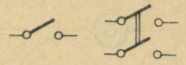
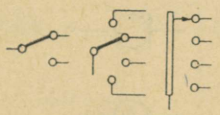
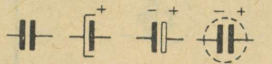
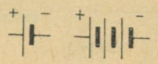
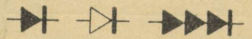
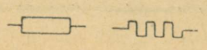
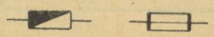
Kahele või kolmele vahesagedusastmele järgneb transistorsuperis detektor — näiteks germaaniumdiood — ja madalsagedusvõimendaja.

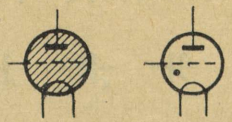
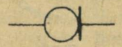
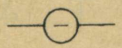
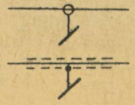
Supervastuvõtja vahesagedus valitakse olenevalt kasutatavast transistori tüübist. Triood П1Е on arvestatud töötamiseks sagedusel 465 kHz (või selle ümbruses). Vahesagedusastmetesse sobivad ka gruppidesse П5 ja П6 kuuluvad transistorid.

Madala vahesageduse juures saab täielikumalt kasutada transistori võimendusomadusi, mis sageduse tõusmisel teatavasti halvenevad. Kuid madala vahesageduse puhul on peegelsagedus suhteliselt lähedane vastuvõetava saatja sagedusele (ja sisendvõnkeringi omasagedusele); seega mitteküllaldase eelselektsiooni puhul kõrgsagedusosas võivad ilmuda häired läbikostvuse ja interferentsvilede näol.

LISAD

SKEEMITÄHISED

Tähis	Lülituselement	Tähis	Lülituselement
	Elektrijuhe		Reguleeritav aktiivtakisti ja potentsiomeeter
	Elektrijuhe hargnemisega		Induktsioonipoolid (õhk-, magnetdielektrik- ja raudsüdamikuga)
	Lihtklemm ja kruviklemm		
	Antenn ja maandus		
	Ühendus šassiiga (üldmiinusega)		Transformaator (õhk-, magnetdielektrik- ja raudsüdamikuga)
	Lülitid (ühe- ja kahepooluseline)		
	Ümberlüliti ja valiklülitid		Kondensaator ja elektrolüütkondensaatorid
	Elektrihõõglamp		Pöördkondensaator ja trimmerkondensaatorid
	Keemilised vooluallikad (üksik element ja järjestikune patarei)		Pooljuhtalaldaja (üksikud elemendid ja järjestikune patarei)
	Aktiivtakistid		Liigvoolukaitse, sulavkaitse

Tähis	Lülituselement	Tähis	Lülituselement
	Elektrimõõteriist (täht märgib otstarbe: V — voltmeeter, A — ampermeeter jne.)		Gaaslahendustriood (tiratron)
	Mikrofon		Magnetofoni helipea (täht märgib otstarbe: S — salvestus-, T — taastamis-, K — kustutuspea)
	Telefon		Pooljuhttriood (transistor)
	Valjuhääldaja		Grammofoni helipea
	Alalisvoolu generaator (üldiselt)		Grammofoni lõikepea (rekorder)
	Vahelduvvoolu generaator (üldiselt)		Maandatud varjestusega ümbritsetud osa lülitusskeemist
	Kõrgsagedusvoolu generaator (üldiselt)		
	Elektronlamp (antud juhul kaudselt köetav triood)		Sassiiga ühendatud varjestusega ümbritsetud elektrijuhe

ELEKTRIMÕÕTÜHIKUD

(Põhiühikud on jämekirjas)

Suurus	Tähis	Eesti keeles		Vene keeles		Märkusi
		Ühik	Lühend	Ühik	Lühend	
Laeng, elektrihulk	*Q*	**kulon**	C	кулон	*к*	1 C = 6,3 · 10^{18} elektroni laeng 1 C = 1 ampersekund
Vool	*I, i*	kiloamper	kA	килоампер	*ка*	1 kA = 1000 A
		amper	A	ампер	*а*	1 A = 1 C/sek
		milliamper	mA	миллиампер	*ма*	1 mA = 0,001 A
		mikroamper	μA	микроампер	*мка*	1 μA = 0,000 001 A
Elektromotoorne jõud ja pinge	*E, e* *U, u*	kilovolt	kV	киловольт	*кв*	1 kV = 1000 V
		volt	V	вольт	*в*	
		millivolt	mV	милливольт	*мв*	1 mV = 0,001 V
		mikrovolt	μV	микровольт	*мкв*	1 μV = 0,000 001 V
Takistus	*R, r*	megaoom	MΩ	мегом	*мгом*	1 MΩ = 1 000 000 Ω
		kilo-oom	kΩ	килоом	*ком*	1 kΩ = 1000 Ω
		oom	Ω	ом	*ом*	
Juhtivus	$\frac{1}{R}$	**siimens**	$\frac{1}{\Omega}$; S	—	$\frac{1}{ом}$	—
Mahtuvus	*C*	**farad**	F	фарад	*ф*	1 F = 1 C/V
		mikrofarad	μF	микрофарад	*мкф*	1 μF = 0,000 001 F
		nanofarad	nF	нанофарад	*нф*	1 nF = 0,000 000 001 F
		pikofarad	pF	пикофарад	*пф*	1 pF = 0,000 000 000 001 F
			μμF	микромикрофарад	*мкмкф*	1 pF = 1 μμF

Suurus	Tähis	Eesti keeles		Vene keeles		Märkusi
		Ühik	Lühend	Ühik	Lühend	
Induktiivsus	*L*	**henri**	H	генри	*гн*	1 H = 1 $\frac{\text{V sek}}{\text{A}}$ = Ω sek
		millihenri	mH	миллигенри	*мгн*	1 mH = 0,001 H
		mikrohenri	μH	микрогенри	*мкгн*	1 μH = 0,000001 H
Sagedus	*f*	megaherts	MHz	мегагерц	*мгц*	1 MHz = 1 000 000 Hz
		kiloherts	kHz	килогерц	*кгц*	1 kHz = 1000 Hz
		herts	Hz	герц	*гц*	1 Hz = 1 $\frac{\text{periood}}{\text{sek}}$
Võimsus	*P* (*N*)	megavatt	MW	мегаватт	*мгвт*	1 MW = 1 000 000 W
		kilovatt	kW	киловатт	*квт*	1 kW = 1000 W
		vatt	W	ватт	*вт*	1 W = 1 džaul/sek
		millivatt	mW	милливатт	*мвт*	1 mW = 0,001 W
Töö	*A*	kilovatt-tund	kWh	киловатт-час	*квтч*	1 kWh = 1000 Wh = = 3 600 000 J
		vatt-tund	Wh	ватт-час	*втч*	1 Wh = 3600 J
		džaul	J	джауль	*дж*	1 J = 1 Wsek = $\frac{1}{3600}$ Wh

NURGAKOOSINUSED

(Võimsusteguri määramiseks vahelduvvooluringis)

Nurk kraadides (pinge- ja voolufaasi vaheline nihkenurk φ)	Koosinuse väärtus (võimsustegur cos φ)	Nurk kraadides (pinge- ja voolufaasi vaheline nihkenurk φ)	Koosinuse väärtus (võimsustegur cos φ)
0	1,000	62	0,469
3	0,999	64	0,438
6	0,995	66	0,407
9	0,988	68	0,375
12	0,978	70	0,342
15	0,966	72	0,309
18	0,951	74	0,276
21	0,934	76	0,242
24	0,913	78	0,208
27	0,891	80	0,1736
30	0,866	81	0,1564
33	0,839	82	0,1392
36	0,809	83	0,1219
39	0,777	84	0,1045
42	0,743	85	0,0872
45	0,707	86	0,0698
48	0,669	87	0,0523
51	0,629	88	0,0349
54	0,588	89	0,0175
57	0,545	90	0,000
60	0,500		

RUUDUD JA RUUTJUURED

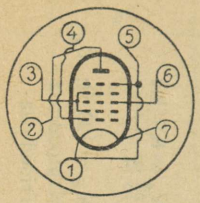
Arv	Arvu ruut-väärtus	Ruutjuur arvust	Arv	Arvu ruut-väärtus	Ruutjuur arvust
a	a^2	$\sqrt{a}$	a	a^2	$\sqrt{a}$
1	1	1	38	1 444	6,16
2	4	1,41	40	1 600	6,32
3	9	1,73	43	1 819	6,56
4	16	2,00	46	2 116	6,78
5	25	2,24	50	2 500	7,07
6	36	2,45	53	2 809	7,28
7	49	2,65	56	3 136	7,48
8	64	2,83	60	3 600	7,75
9	81	3,00	63	3 969	7,94
10	100	3,16	66	4 356	8,12
11	121	3,32	70	4 900	8,37
12	144	3,46	75	5 625	8,66
13	169	3,61	80	6 400	8,94
14	196	3,74	85	7 225	9,22
15	225	3,87	90	8 100	9,49
16	256	4,00	95	9 025	9,75
17	289	4,12	100	10 000	10,0
18	324	4,24	110	12 100	10,5
19	361	4,36	120	14 400	11,0
20	400	4,47	130	16 900	11,4
21	441	4,58	140	19 600	11,8
22	484	4,69	150	22 500	12,3
23	529	4,80	170	28 900	13,0
24	576	4,90	200	40 000	14,1
25	625	5,00	250	62 500	15,9
26	676	5,10	300	90 000	17,3
27	729	5,20	400	160 000	20,0
28	784	5,29	500	250 000	22,4
29	841	5,39	600	360 000	24,5
30	900	5,48	700	490 000	26,5
32	1024	5,66	800	640 000	28,3
34	1156	5,83	900	810 000	30,0
36	1296	6,00	1000	1 000 000	31,6

TÄHTSAMATE ELEKTRONLAMPIDE ANDMED (NÄIDISREŽIIMID)

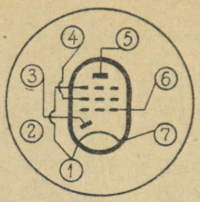
Tüüp	Kasutamise otstarve	U_F V	I_F A	U_A V	I_A mA	U_{G_1} (U_{G_3}) V	U_{G_2} (ja U_{G_1}) V	I_{G_2} (ja I_{G_1}) mA	S mA/V	R_i MΩ	$P_{A\max}$ W	Märkusi
1А1П	7 O + S; S	1,2	0,06	90	0,8	— 9	45	1,9	0,25	0,8		
				45	0,7	— 9	45	1,9	0,235	0,6		
1Б1П	2 + 5 D + MSV	1,2	0,06	68	1,6	0	68	0,4	0,625	0,6		
1К1П	5 KSV; VSV	1,2	0,06	90	1,8	0	45	0,65	0,75	0,75		
				45	1,7	0	45	0,7	0,7	0,35		
2П1П	5 MSVV	2,4	0,06	90	9,5	— 4,5	90	2,1	2,15	0,1	0,85	
		1,2	0,12									
6Ж8	5 KSV; MSV	6,3	0,5	250	10	— 2,4	100	2,5	7,5	2,0		
6П3С	4 MSVV	6,3	0,9	250	75		250	5,4			6,5	$R_K = 170\ \Omega$; $R_A = 2{,}5$ kΩ
6П6С	5 MSVV	6,3	0,7	250	34	—16,5	250	7	2,5	0,078	3,1	$R_K = 410\ \Omega$; $R_A = 7{,}0$ kΩ
6К4П	5 KSV; VSV	6,3	0,3	250	11		100	4,2	4,4	1,5	3,0	
6Н2П	2 × 3 MSV	6,3	0,3	250	2,3	— 1,5			2,0	0,05	1,0	
6А10С	7 O + S; S	6,3	0,3	250	3,5		100	8,5	0,45	1,0	1,0	
				100	3,3		100	8,5	0,425	0,5	1,0	
6Н7С	2 × 3 MSVV	6,3	0,8	300	3,5						5,5	$R_A = 8{,}0$ kΩ
6Н8С	2 × 3 MSV	6,3	0,6	250	2 × 9	— 8			2,6	0,0077	2,5	
6Н9С	2 × 3 MSV	6,3	0,3	250	2 × 2,3	— 2			1,6	0,0044	1,0	
6П14П	5 MSVV	6,3	0,76	250	48	— 6	250	5	11,3		12,0	$R_K = 120\ \Omega$; $R_A = 4{,}0 \ldots 5{,}2$ kΩ
6И1П	3 + 7 O + S	6,3	0,3	250	3,2	— 2	100	6,0	0,78	1,0	1,7	Heptood-osa
				100	4,5	— 10	—		3,7		0,8	Triood-osa

Märkus. Lühendid tähistavad: 2 — diood, 3 — triood, 4 — jugatetrood, 5 — pentood, 7 — heptood; O — ostsillaator, S — segustusaste, D — detektoraste, MSV — madalsagedusaste, MSVV — võimsusevõimendusaste, KSV — kõrgsagedusaste, VSV — vahesagedusaste.

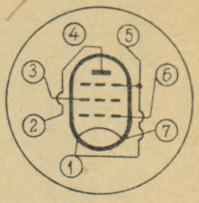
TÄHTSAMATE ELEKTRONLAMPIDE SOKLILÜLITUSED
(vaade lambile alt)



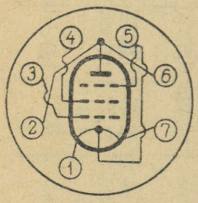
1А1П



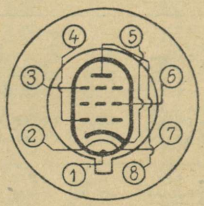
1Б1П



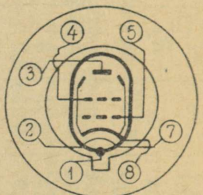
1К1П



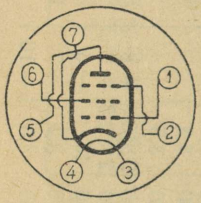
2П1П



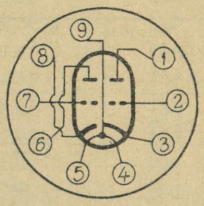
6Ж8



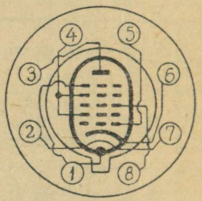
6П6С, 6П3С



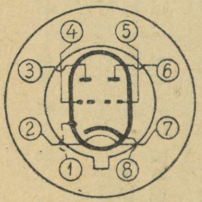
6К4П



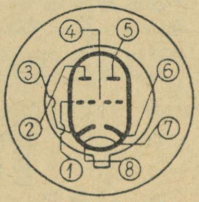
6Н2П



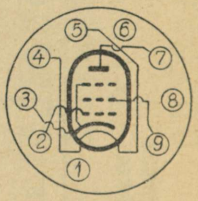
6А10С



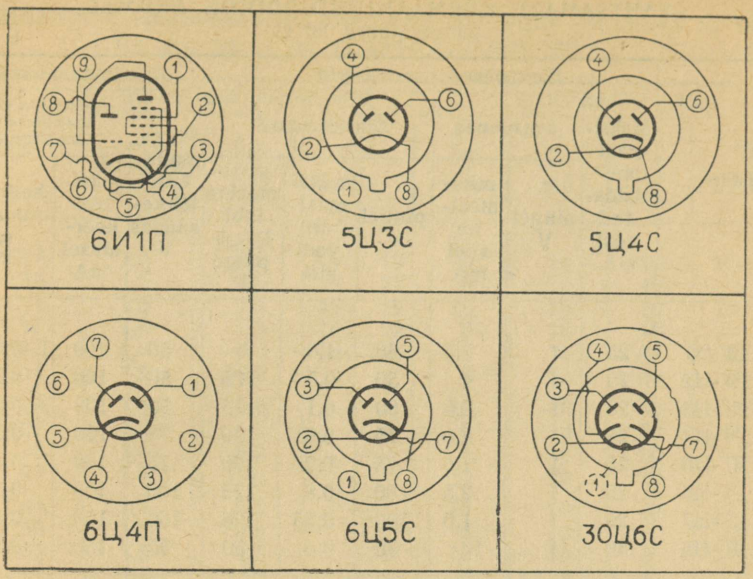
6Н7С



6Н8С,6Н9С



6П14П



Lisa 7

TÄHTSAMATE ALALDAJALAMPIDE ANDMED

Tüüp	U_F V	I_F A	U_A V	Maksimaalrežiim		
				Vastupinge V	Alaldatud vool mA	Alaldatud pinge V
5Ц3С	5,0	3,0	2 × 500	1700	230	570
5Ц4С	5,0	2,0	2 × 500	1350	120	450
6Ц4П	6,3	0,6	2 × 350	1000	75	400
6Ц5С	6,3	0,6	2 × 400	1375	70	460
30Ц6С	30	0,3	2 × 150	500	120	200

TÄHTSAMATE GERMAANIUMDIOODIDE ANDMED

temperatuuril 20° C

	Tüüp	Elektrilised parameetrid						Maksimaalne režiim			
		Maksimaalne alaldatud vool mA	avasuunas		tõkkesuunas			Pingeamplituud tõkkesuunas V	Alaldatava voolu maksimaalne amplituud		
			pingel V	minimaalne vool mA	pingel V	maksimaalne vool mA	minimaalne läbilöögipinge V		püsival koormusel mA	hetkelisel koormusel A	
Punktdioodid	ДГ-Ц1	25	1	2,5	50	1,0	—	50	100	0,3	1 sekundi vältel
	ДГ-Ц2	25	1	4	50	0,5	75	50	100	0,3	
	ДГ-Ц3	25	1	2,5	50	0,1	75	50	100	0,3	
	ДГ-Ц4	25	1	2,5	75	0,8	100	75	100	0,3	
	ДГ-Ц5	25	1	1,0	75	0,25	100	75	100	0,3	
	ДГ-Ц6	25	1	2,5	100	0,8	125	100	100	0,3	
	ДГ-Ц7	25	1	1,0	100	0,25	125	100	100	0,3	
	ДГ-Ц8	50	1	10	30	0,5	50	30	150	0,5	
Pinddioodid	ДГ-Ц21	300	0,5	300	50	0,5	75	50	—	25	0,1 sekundi vältel
	ДГ-Ц22	300	0,5	300	100	0,5	150	100	—	25	
	ДГ-Ц23	300	0,5	300	150	0,5	225	150	—	25	
	ДГ-Ц24	300	0,5	300	200	0,5	300	200	—	25	
	ДГ-Ц25	100	0,3	100	300	0,3	450	300	—	25	
	ДГ-Ц26	100	0,3	100	350	0,3	525	350	—	25	
	ДГ-Ц27	100	0,3	100	400	0,3	600	400	—	25	

TÄHTSAMATE GERMAANIUMTRIOODIDE ANDMED (SEERIAD C, П1, П2, П3, П5 ja П6 TEMPERATUURIL 20° C)

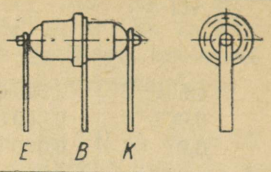
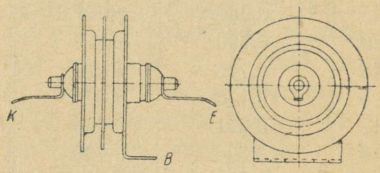
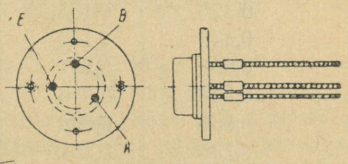
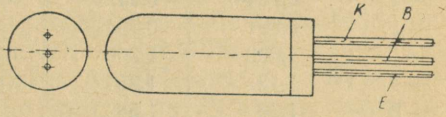
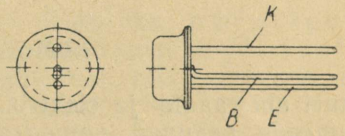
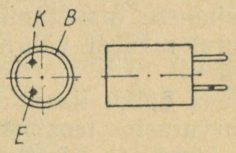
	Tüüp	Elektrilised parameetrid			Maksimaalne režiim				
		α minimaalselt	f_{piir} MHz	K_p dB	I_K mA	I_E mA	U_K V	P_K mV	
Punkttrioodid	С1А	1,2	0,5	15...19	10	10	40	100	Andmed baaslülitusel
	С1Б	1,5	0,5	18...22	6	10	40	50	
	С1В	1,5	1,5	15...19	10	10	40	100	
	С1Г	1,5	1,5	18...22	6	10	40	50	
	С1Д	1,5	5,0	15...22	6	10	40	50	
	С1Е	1,5	10,0	—	6	10	40	50	
	С2А	1,5	0,5	—	10	10	30	100	
	С2Б	1,6	1,5	—	6	10	20	50	
	С2В	1,6	5,0	—	6	10	20	50	
	С2Г	1,6	10,0	—	6	10	20	50	
	С3А	1,2	0,5	—	10	10	40	100	
	С3Б	1,5	0,5	—	6	10	40	50	
	С3В	1,5	1,5	—	10	10	40	100	
	С3Г	1,5	1,5	—	6	10	40	50	
	С3Д	1,5	5,0	—	6	10	40	50	
	С3Е	1,5	10	—	6	10	40	50	
	С4А	1,5	0,5	—	10	10	30	100	
	С4Б	1,6	1,5	—	6	10	20	50	
	С4В	1,6	5,0	—	6	10	20	50	
	С4Г	1,6	10	—	6	10	20	50	
Pindtrioodid	П1А	0,9	0,1	30	5	5	20	50	
	П1Б	0,93	0,1	33	5	5	20	50	
	П1В	0,93	0,1	37	5	5	20	50	
	П1Г	0,96	0,1	33	5	5	20	50	
	П1Д	0,94	0,1	33	5	5	20	50	
	П1Е	0,94	0,465	30	5	5	20	50	
	П2А	0,85	0,05	17	10	10	100	250	
	П2Б	0,90		17	25	25	50	250	
	П3А	0,80	0,02	17...20	150	—	50	3500	
	П3Б	0,80	0,02	20...25	250	—	50	3500	
	П3В	0,80	0,02	25...30	450	—	50	3500	
	П5А	0,93	—	—	10	—	10	25	
	П5Б	0,95	0,3	—	10	—	10	25	
	П5В	0,97	0,3	—	10	—	10	25	
	П5Г	0,97	0,3	—	10	—	10	25	
	П5Е	0,95	0,3	—	10	—	10	25	
	П6А	—	0,1	30	10	10	30	150	
	П6Б	—	0,465	34	10	10	30	30	
	П6В	—	0,465	34	10	10	30	30	
	П6Г	—	1,0	37	10	10	30	30	

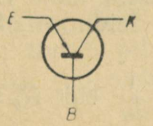
TÄHTSAMATE GERMAANIUMTRIOODIDE ANDMED (SEERIA П4)

Tüüp	Maksimaalne režiim						Elektrilised parameetrid		
	Kollektori vool I_K A	Baasi vool I_B A	Kollektori pinge U_K			Kaovõimsus kollektoril P_K	Vooluvõimendustegur α	Võimsusevõimendustegur K_p dB	Tarbijale antav võimsus W
			Baaslülitusel V	Emitterlülitusel V	Kollektorlülitusel V				
П4А	5	1,2	60	50	40	25	5	20	10
П4Б	5	1,2	70	60	50	30	8...20	23	10
П4В	5	1,2	50	35	25	30	10		10
П4Г	5	1,2	60	50	40	30	10...20	27	10
П4Д	5	1,2	60	50	40	30	20	30	10

Vooluvõimendustegur on tabelis antud emitterlülituse ja lühise režiimi puhul, kui $U_K = -10$ V; $I_K = 2$ A; $f = 1000$ Hz. Võimsusevõimendustegur on antud emitterlülituse puhul A-klassi režiimis, kui $U_K = -26$ V; $I_K = 1$ A (trioodidel П4А; П4Б; П4В ja П4Г) või $I_K = 2$ A (trioodil П4Д); $f = 1000$ Hz; generaatori sisetakistus $R_{gen} = 15\ \Omega$ ja tarbija sisetakistus $R_{tarbija} = 25\ \Omega$.

TÄHTSAMATE GERMAANIUMTRIOODIDE ELEKTROODID

Tüüp			Vaade ja soklilülitus
П1А П1Б П1В П1Г П1Е	П2А П2Б		
П3А П3Б П3В			
П4А П4Б П4В П4Г П4Д			
П5А П5Б П5В П5Г П5Д			
П6А П6Б П6В П6Г П6Д	С3А С3Б С3В С3Г С3Д С3Е	С4А С4Б С4В С4Г	
С1А С1Б С1В С1Г С1Д	С2А С2Б С2В		



Lisa 12

PINGETE VÕI VOOLUDE JA VÕIMSUSTE SUHTEARVUD DETSIBELLIDES

Detsibellide arv K	Pingete või voolude suhe $\frac{U_2}{U_1}$ või $\frac{I_2}{I_1}$	Võimsuste suhe $\frac{P_2}{P_1}$	Detsibellide arv K	Pingete või voolude suhe $\frac{U_2}{U_1}$ või $\frac{I_2}{I_1}$	Võimsuste suhe $\frac{P_2}{P_1}$
−60	0,001	0,000 001	+3	1,41	1,99
−50	0,003	0,000 01	+4	1,58	2,51
−40	0,01	0,000 1	+5	1,78	3,16
−30	0,032	0,001	+6	1,99	3,98
−25	0,056	0,001 6	+7	2,24	5,01
−20	0,100	0,010	+8	2,51	6,31
−18	0,126	0,016	+9	2,82	7,94
−15	0,178	0,032	+10	3,16	10,0
−12	0,251	0,063	+12	3,98	15,8
−10	0,316	0,100	+15	5,62	31,6
−9	0,355	0,126	+18	7,94	63,1
−8	0,398	0,158	+20	10,0	100,0
−7	0,447	0,199	+25	17,7	316
−6	0,501	0,251	+30	31,6	1 000
−5	0,562	0,316	+35	56,0	3 160
−4	0,631	0,398	+40	100	10 000
−3	0,708	0,501	+45	177	31 600
−2	0,794	0,631	+50	316	100 000
−1	0,891	0,794	+55	560	316 000
0	1,000	1,000	+60	1000	1 000 000
+1	1,12	1,26	+70	3160	10 000 000
+2	1,26	1,58			

Lisa 13

NOMOGRAAFIAST

Suurt abi raadio- ja elektriala praktikas ettetulevate arvutuste teostamisele pakuvad nomograafilised arvutusvahendid. *Nomogrammide* kasutamine on lihtne ja arvutustulemus saadakse praktiliste küsimuste otsustamiseks küllaldase täpsusega, kusjuures on ka suurel määral välditud juhuslike arvutusvigade tekkimise võimalused.

Käesoleva õpiku lisana on toodud kolm nomogrammi mitmesuguste arvutuste teostamiseks elektrotehnika selles valdkonnas, mida puudutab käsitletud kursus.

Nomogrammi 1 kasutatakse kahe või enama paralleelselt lülitatud takisti kogutakistuse leidmisel. See nomogramm on konstrueeritud valemi

$$\frac{1}{R_p} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad \text{ehk} \quad R_p = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

alusel. Kui ühendada sirgjoonega äärmistel skaaladel (S_1 ja S_2) paralleelsete takistite suurustele vastavad punktid, siis selle joone lõikumispunkt keskmise skaalaga annabki otsitava kogutakistuse suuruse. Muidugi peavad kõik takistused olema mõõdetud samades ühikutes.

Punktiirjoonega on nomogrammil kujutatud kasutamisnäide paralleelsete takistite $R_1 = 950\ \Omega$ ja $R_2 = 250\ \Omega$ kogutakistuse leidmiseks. Selleks osutub $R = 200\ \Omega$. Tegeliku arvutuse järgi on kogutakistus 196 Ω. Tekkinud mõneprotsendiline ebatäpsus pole praktikas oluline.

Teise näitena leiame takistite $R_1 = 50$ kΩ ja $R_2 = 70$ kΩ kogutakistuse. Võiksime kasutada skaala ühikutena kilo-oome. Kuid siis tuleks vastus leida skaala alguses, kus aga küllaldast täpsust ei saavutata. Otstarbekas on siinsel juhul iga skaala ühiku kohta lugeda kokkuleppeliselt 100 oomi (s. o. mõttes lisandada igale arvule skaalal kaks nulli). Siis on 50 kilo-oomile vastav koht skaalal arvu 500 juures ja 70 kilo-oomile vastav koht arvu 700 juures. Neid ühendav sirge annab keskmisel skaalal arvu 291. Sellelegi arvule tuleb lisandada nüüd kaks nulli ja nii kujuneb ülesandes antud paralleeltakistite kogutakistuseks 29 100 oomi ehk 29,1 kilo-oomi.

Rohkem kui kahe paralleelse takisti kogutakistuse otsimisel leiame esmalt nendest k a h e takisti kogutakistuse, mille võtame nagu iseseisvaks takistuseks. Kolmanda takistuse suuruse ja leitud kahe esimese takisti kogutakistuse abil saame nomogrammilt juba kolme takisti kogutakistuse. Nii edasi toimides saame lõpuks kõigi paralleelsete takistite kogutakistuse. Selle kohta toome praktilise näite. Tuleb leida paralleelsete takistite $R_1 = 70\ \Omega$, $R_2 = 30\ \Omega$ ja $R_3 = 53\ \Omega$ kogutakistus. Algul leiame R_1 ja R_2 takistuse, milleks osutub 21 oomi. Leitud suuruse ja R_3 kaudu saame kõigi kolme takisti takistuseks 15 oomi.

Sama nomogramm võimaldab leida ka p a r a l l e e l s e l t lülitatud induktsioonipoolide koguinduktiivsust ja j ä r j e s t i k k u lülitatud kondensaatorite kogumahtuvust, mis teatavasti avalduvad analoogilistest valemitest, vastavalt:

$$\frac{1}{L_p} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} \text{ ja } \frac{1}{C_j} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}.$$

Nomogramm 2 võimaldab teostada arvutusi traadi takistuse leidmiseks valemi

$$R = \frac{\varrho l}{q} = \frac{0{,}0175\, l}{q}$$

kohaselt vasktraatide kohta, kui nendest seoses olevatest suurustest on teada kaks: traadi pikkus l (mõõdetud meetrites) ning traadi ristlõikepindala q (ruutmillimeetrites) või läbimõõt d (millimeetrites).

Otsitud suurus asub vastaval skaalal tuntud suurusi ühendaval sirgel. Parempoolne skaala kannab kahte rida jaotusi. Vasakpoolsed jaotused vastavad traadi ristlõikepindalale ja parempoolsed jaotused vastavad ümartraadi puhul tema läbimõõdule (läbimõõt d ja ristlõikepindala q on teatavasti omavahel seoses $q = \pi d^2$).

Nomogrammil on näitena toodud 20 meetri pikkuse vasest ümartraadi läbimõõdu leidmine, kui on teada, et traadi takistus peab olema umbes 1 oom. Leitud $d = 0{,}67$ millimeetrit, millele vastav ristlõikepind on $q = 0{,}36$ ruutmillimeetrit.

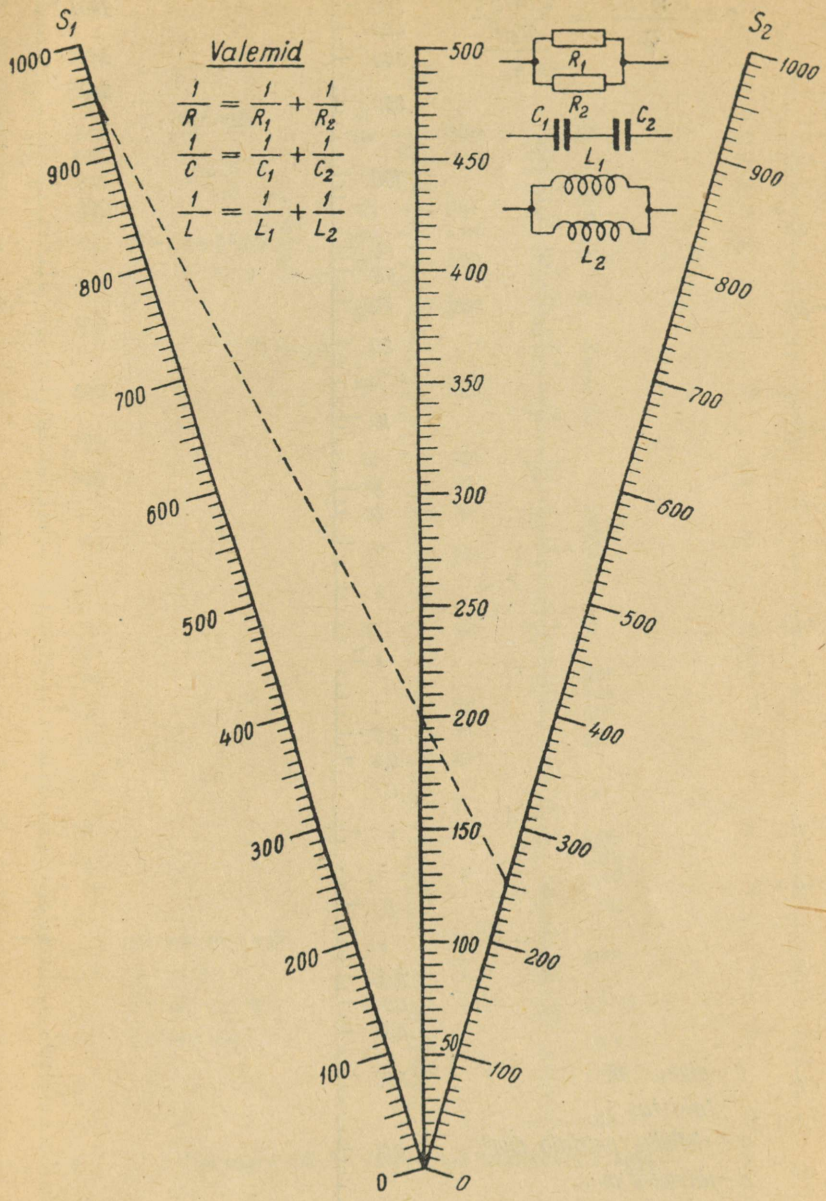
Nomogramm 3 seob nelja alalisvoolu põhisuurust — takistust, pinget, võimsust ja voolu. Teades kahte nendest suurustest, on võimalik arvutada ülejäänuid valemite abil, mis on kokkuvõtlikult esitatud tabelis 3. Kõik seoses olevad suurused asuvad sellelgi nomogrammil ühel sirgel, mis lõikab nende vastavaid arvulisi väärtusi väljendavaid punkte telgedel.

Sellele nomogrammile on kantud takistused kilo-oomides, pinged voltides, võimsused vattides ja voolud milliamprites. Kõikidel skaaladel, välja arvatud võimsuse skaala, on kaks rida arve (A- ja B-skaala). Vastavalt vajadusele tuleb üksikute arvuliste suuruste kohaselt iga kord otsustada, milliseid skaalasid tuleb kasutada. Vasakpoolsed skaalad (s. o. A-skaalad) vastavad väiksematele takistustele, suurematele pingetele ja suurematele vooludele. Parempoolseid skaalasid (s. o. B-skaalasid) tuleb kasutada suuremate takistuste ja väiksemate voolude ning pingete puhul. Võimsuse skaala jääb kummalgi juhul samaks.

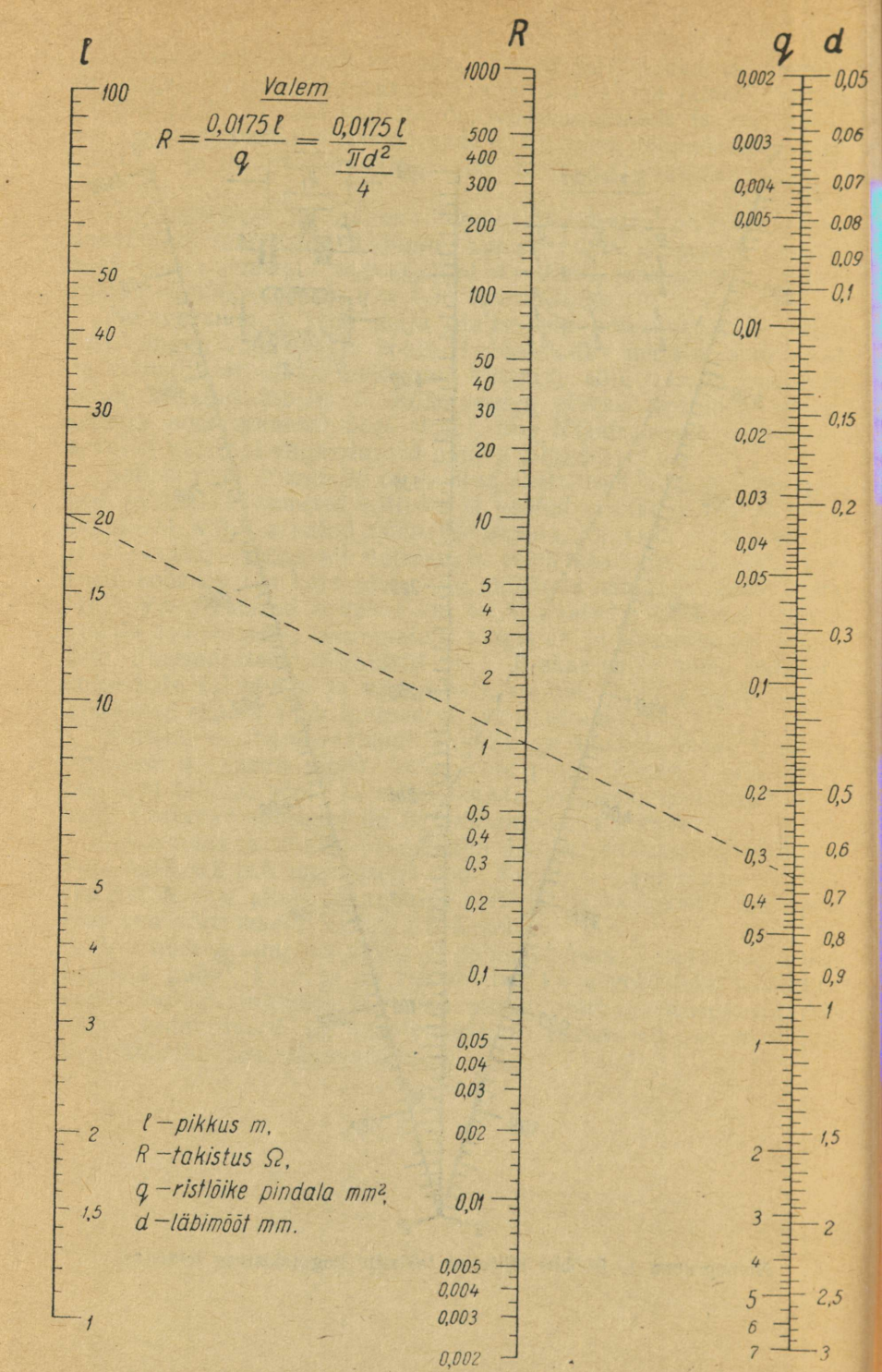
Näitena on nomogrammil punktiiriga toodud olukord, milles otsitakse (A-skaala abil) 100-voldise pinge juures 5-kilo-oomist takistust läbivat voolu ja sellel takistil soojuseks muutuvat võimsust. Vastavad suurused on 20 milliamprit ja 2 vatti.

Teise näitena leiame pingelangu 150 kΩ suurusel takistil, kui seda läbib 0,3 mA tugevusega vool. Kasutades parempoolset (B-) skaalat, leiame pinge suuruse 45 volti ja lisaks takistil soojusena eralduva võimsusena umbes 0,015 vatti.

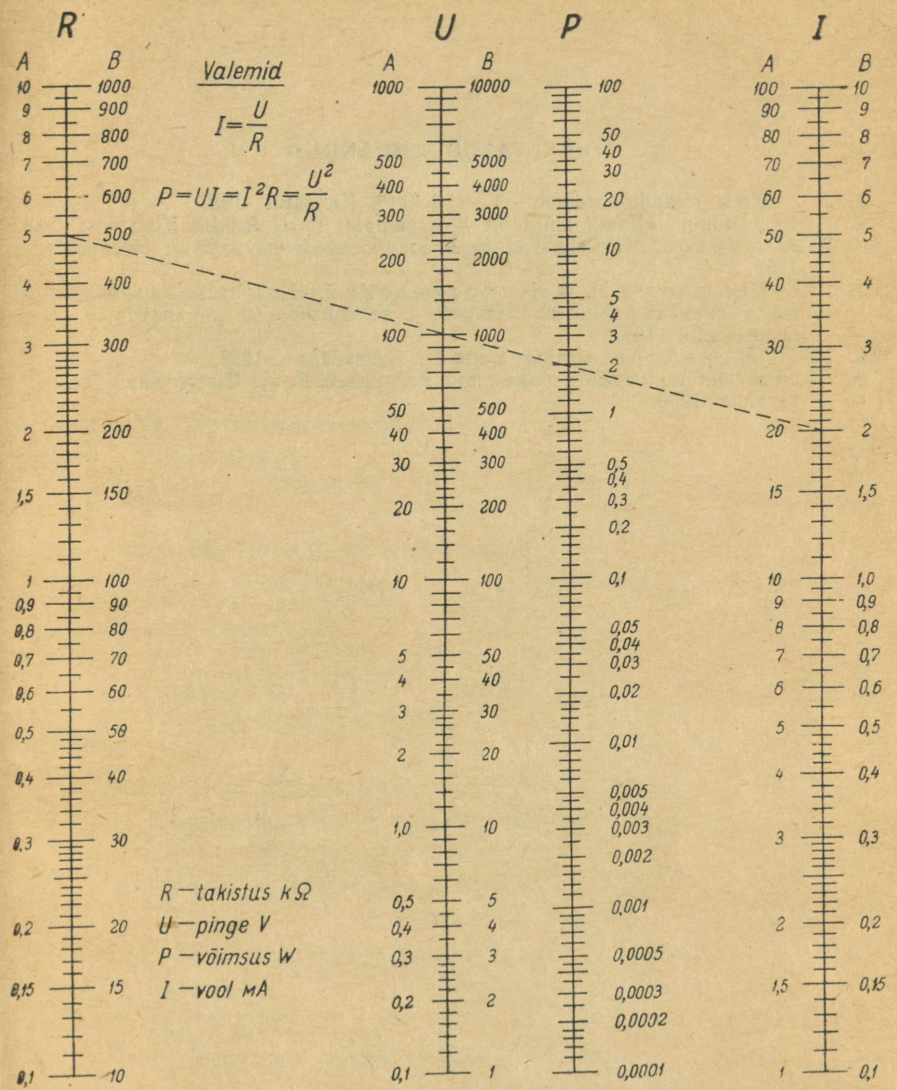
See nomogramm on mõeldud põhimõtteliselt kasutamiseks alalisvoolu puhul, kuid ta on rakendatav ka arvutusteks vahelduvvooluringides, milledes esinevad ainult aktiivtakistused või milledes induktiivsed ja mahtuvuslikud takistused on võrreldes aktiivtakistustega väga väikesed.



Nomogramm 1. Rööbiti lülitatud takistite kogutakistuse leidmine.



Nomogramm 2. Vaskjuhtme takistuse määramine.



Nomogramm 3. Arvutused alalisvooluringis.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. J. Elgas. «Raadioseadmed», Eesti Riiklik Kirjastus, 1953.
2. A. Isotamm. «Raadioamatööri käsiraamat», Eesti Riiklik Kirjastus, 1958.
3. В. А. Бургов. «Основы записи и воспроизведения звука», «Искусство», 1954.
4. Е. В. Гершзон и И. Ф. Николаевский. «Полупроводниковые триоды в схемах радиовещательной и телевизионной аппаратуры», Госэнергоиздат, 1957.
5. И. П. Жеребцов. «Радиотехника», Связьиздат, 1953.
6. «Справочник по радиотехнике» под редакцией Б. А. Смиренина, Госэнергоиздат, 1950.

SISUKORD

Saateks 3

I osa — ELEKTROTEHNIKA

1. peatükk. **Elektrotehnika ja elektriside arengust** 7

§ 1. Sissejuhatuseks 7
§ 2. Raadiotehnika ajaloost 9
§ 3. Raadiotehnika Nõukogude Liidus 10

2. peatükk. **Elektriteooria algmed** 12

§ 1. Elektrilaengud 12
§ 2. Aatomid ja molekulid 13
§ 3. Ioonid 15

3. peatükk. **Elektrihulk, vool ja pinge; takistus** 17

§ 1. Kehade elektrijuhtivus 17
§ 2. Elektrivool metalljuhtmes 17
§ 3. Elektrihulk; kulon 18
§ 4. Elektrivoolu tugevus; amper 19
§ 5. Pinge, elektromotoorne jõud; volt 20
§ 6. Takistus; oom 24
§ 7. Takistuse temperatuuritegur 27
Olulisim 28

4. peatükk. **Voolu, pinge ja takistuse põhiseosed** 29

§ 1. Elektrivoolu, pinge ja vooluringi takistuse vaheline seos . . . 29
§ 2. Voolu hargnemine 32
§ 3. Pingelang vooluringis 36
§ 4. Pingejagaja-lülitus 38
Olulisim 40

5. peatükk. **Alalis- ja vahelduvvool** 42

§ 1. Alalisvool 42
§ 2. Vahelduvvool 43
§ 3. Liitvoolud 45
§ 4. Vahelduvvoolu mõõtmine; efektiivväärtused 46
Olulisim 47

6. peatükk. **Alalisvoolu töö ja võimsus** 48

§ 1. Elektrivoolu töö 48
§ 2. Elektrivoolu võimsus 49
§ 3. Lühis vooluringis 52

§ 4. Võimsuse arvutamine alalisvooluringis ja aktiivtakistusega vahelduvvooluringis . . . 52
Olulisim . . . 56

7. peatükk. **Keemilised vooluallikad** . . . 57
§ 1. Elektrolüüs . . . 57
§ 2. Galvaani elemendid . . . 58
§ 3. Keemilise vooluallika elektromotoorne jõud, pinge ja mahutavus 60
§ 4. Praktikas kasutatavaid galvaani elemente . . . 65
§ 5. Aku . . . 67
§ 6. Plii- ehk happeakud . . . 68
§ 7. Leelisakud . . . 72
Olulisim . . . 73

8. peatükk. **Elektriväli** . . . 74
§ 1. Elektriväli . . . 74
§ 2. Elektriline induktsioon ja dielektriku polarisatsioon . . . 76
§ 3. Elektriline mahtuvus; farad . . . 77
§ 4. Kondensaator . . . 78
§ 5. Kondensaatorite ühendamine . . . 82
§ 6. Kondensaatorite tüüpe . . . 86
Olulisim . . . 89

9. peatükk. **Magnetväli** . . . 90
§ 1. Magnetinähtused . . . 90
§ 2. Magnetväli . . . 91
§ 3. Elektrivoolu magnetiline mõju . . . 96
§ 4. Elementaarmagnetite teooria . . . 98
§ 5. Voolujuhe magnetväljas . . . 99
§ 6. Elektromagnetiline induktsioon . . . 100
§ 7. Vastastikune induktsioon . . . 103
§ 8. Endainduktsioon . . . 104
Olulisim . . . 107

10. peatükk. **Mahtuvus- ja induktiivtakistus** . . . 108
§ 1. Mahtuvus alalisvooluringis . . . 108
§ 2. Vooluringi ajakonstant . . . 110
§ 3. Mahtuvus vahelduvvooluringis; mahtuvuslik reaktiivtakistus . . 112
§ 4. Faasinihe mahtuvustakistusel . . . 114
§ 5. Induktiivsus vahelduvvooluringis; induktiivne reaktiivtakistus . 116
§ 6. Faasinihe induktiivtakistusel . . . 117
§ 7. Aktiiv- ja reaktiivtakistus . . . 118
§ 8. Aktiiv- ja reaktiivtakistus vahelduvvooluringis . . . 119
§ 9. Filterlülitused . . . 125
Olulisim . . . 129

11. peatükk. **Transformaator** . . . 130
§ 1. Transformaatori talitlusprintsiip ja ehitus . . . 130
§ 2. Trafo ülekandetegur . . . 132
§ 3. Koormuseta trafo . . . 133
§ 4. Koormatud trafo . . . 134
§ 5. Autotrafo . . . 137
Olulisim . . . 139

12. peatükk. **Elektrotehnilised mõõtmised** . . . 140
§ 1. Elektri mõõtmine ja mõõteriistad . . . 140
§ 2. Magnetelektrilised mõõtemehhanismid . . . 141
§ 3. Elektromagnetilised mõõtemehhanismid . . . 145

§ 4. Vibreerivat tüüpi mõõtemehhanismid 147
§ 5. Mõõtemehhanismide parameetrid 148
§ 6. Alalisvoolu ampermeeter; mõõtepiirkonna laiendamine 148
§ 7. Alalisvoolu voltmeeter; mõõtepiirkonna laiendamine 151
§ 8. Võimsuse mõõtmine; elektrodünaamiline vattmeeter 154
§ 9. Takistuse mõõtmine; oommeeter 154
§ 10. Vahelduvvoolu ja -pinge mõõtmine pöördpool-mõõtemehhanismiga 157
§ 11. Universaalsed mõõteriistad 160
Olulisim 161

13. peatükk. **Elektriseadmed** 162

§ 1. Elektrivalgustus 162
§ 2. Leeklahendus; keevitamine 164
§ 3. Elektrisoojendusriistad 165
§ 4. Releed 165
§ 5. Helisignaalseadised 167
§ 6. Galvanotehnika 168
§ 7. Elektrimasinad 168
§ 8. Vahelduvvoolumasinad 169
§ 9. Alalisvoolumasinad 173

II osa — RAADIOTEHNIKA

14. peatükk. **Võnkeringid** 179

§ 1. Elektromagnetilised lained 179
§ 2. Võnkering; vabavõnkumine 180
§ 3. Sundvõnkumine 183
§ 4. Pingeresonants 185
§ 5. Vooluresonants 188
§ 6. Energiakaod võnkeringis 190
§ 7. Võnkeringi hüvetegur 192
§ 8. Võnkeringi eraldusvõime ja ribalaius 193
§ 9. Võnkeringi häälestamine 195
§ 10. Võnkeringide sidestamine 197
§ 11. Vooluringide varjestamine 201

15. peatükk. **Antennid** 202

§ 1. Jaotatud parameetritega võnkering 202
§ 2. Antenni omasagedus ja lainepikkus 204
§ 3. Vastuvõtuantennid 205
§ 4. Maandus; vastukaal 207
§ 5. Raadiolainete levimine 208
§ 6. Raam- ja magnetantennid 211
§ 7. Raadiohäired 212

16. peatükk. **Elektron- ja ioonseadised** 215

§ 1. Üldküsimused 215
§ 2. Termoelektrooniline emissioon; katood 216
§ 3. Diood 219
§ 4. Triood 221
§ 5. Dioodi ja trioodi staatilised tunnusjooned 222
§ 6. Trioodi staatilised parameetrid 225
§ 7. Trioodi parameetrite määramine 226
§ 8. Elektronlambi anoodi kaovõimsus 228
§ 9. Mitme võrega elektronlambid 229

§ 10. Tetrood 229
§ 11. Pentood 231
§ 12. Jugatetrood 233
§ 13. Liitlambid ja pikendatud tunnusjoonega lambid 234
§ 14. Gaaslahendusseadised 235

17. peatükk. **Raadioseadmete toitmine** 236

§ 1. Toitepinged; patareitoide 236
§ 2. Toide vahelduvvooluvõrgust 237
§ 3. Silumisfiltrid 239
§ 4. Pinge stabiliseerimine 241
§ 5. Pooljuhtalaldajad 244
§ 6. Mehaanilised muundajad 247

18. peatükk. **Helisagedusvõimendajad** 249

§ 1. Võimendaja iseloomustussuurused 249
§ 2. Tarbija sobitamine vooluallikaga 251
§ 3. Pingevõimendusaste; elektronlambi dünaamiline tunnusjoon . 254
§ 4. Helisagedusvõimendaja astmete sidestamine 259
§ 5. Elektronlambi eelpingestamine; võimsusvõimendaja talitluspunkti valik 261
§ 6. Mitmeastmeline helisagedusvõimendaja 265
§ 7. Negatiivne tagasisidestus helisagedusvõimendajas 268
§ 8. Helisagedusvõimendaja sageduskarakteristiku muutmine . . . 270
§ 9. Helisagedusgeneraator 275

19. peatükk. **Elektroakustilised seadised** 278

§ 1. Üldmõisted 278
§ 2. Mikrofonid 280
§ 3. Valjuhääldajad 285
§ 4. Helisalvestusseadised 288
§ 5. Heli magnetiline salvestamine 289
§ 6. Magnetofoni ehitus 291
§ 7. Elektrigrammofonide mehhanismid 293
§ 8. Mitmekanalilised ja stereofoonilised elektroakustilised seadised 294

20. peatükk. **Raadiosaatjad** 296

§ 1. Üldküsimused 296
§ 2. Endaergutusega lampgeneraator 296
§ 3. Kõrgsagedusvõimendaja 301
§ 4. Amplituudmodulatsioon 303
§ 5. Sagedusmodulatsioon 307
§ 6. Ribalaius 309

21. peatükk. **Raadiovastuvõtjad** 311

§ 1. Üldküsimused 311
§ 2. Amplituudmoduleeritud signaali detekteerimine 312
§ 3. Manipuleeritud raadiotelegraafisignaali detekteerimine . . . 316
§ 4. Sagedusmoduleeritud signaali detekteerimine 317
§ 5. Regeneratiivlülituses võredetektor 322
§ 6. Superregeneratiivlülitus 324
§ 7. Otsevõimendusvastuvõtja 327
§ 8. Superheterodüünvastuvõtja 330
§ 9. Automaatne võimenduse reguleerimine 335
§ 10. Ribalaiuse reguleerimine vahesagedusvõimendajas 336
§ 11. Optiline häälestustäpsuse indikaator 337
§ 12. Supervastuvõtja lülitusskeem 337

22. peatükk. **Transistorid** 340

§ 1. Üldküsimused 340
§ 2. Transistori talitluspõhimõte 342
§ 3. NSV Liidus toodetavate transistorite iseloomustusi 348
§ 4. Madalsageduslülitused 349
§ 5. Kõrgsageduslülitused 353

LISAD

Lisa 1. Skeemitähised 359
Lisa 2. Elektrimõõtühikud 361
Lisa 3. Nurgakoosinused 363
Lisa 4. Ruudud ja ruutjuured 364
Lisa 5. Tähtsamate elektronlampide andmed 365
Lisa 6. Tähtsamate elektronlampide soklilülitused 366
Lisa 7. Tähtsamate alaldajalampide andmed 367
Lisa 8. Tähtsamate germaaniumdioodide andmed 368
Lisa 9. Tähtsamate germaaniumtrioodide andmed 369
Lisa 10. Tähtsamate germaaniumtrioodide andmed (seeria П4) 370
Lisa 11. Tähtsamate germaaniumtrioodide elektroodid 371
Lisa 12. Pingete või voolude ja võimsuste suhtearvud detsibellides . . . 372
Lisa 13. Nomograafiast 372
Kasutatud kirjandus 378

Педусаар Хейно Константинович
ЭЛЕКТРО- и РАДИОТЕХНИКА
ДЛЯ НАЧИНАЮЩИХ
На эстонском языке
Эстонское Государственное Издательство
Таллин, Пярнуское шоссе, 10

*

Toimetaja L. Abo
Tehniline toimetaja I. Vahtre
Korrektorid M. Amon ja S. Aron

Ladumisele antud 16. XII 1958. Trükkimisele antud 12. III 1959. Paber 60×92, 1/16. Trükipoognaid 24. Arvutuspoognaid 23,7. Trükiarv 12 000. MB-02737. Tellimise nr. 3720. Hans Heidemanni nim. trükikoda, Tartu, Vallikraavi 4.

Hind rbl. 9.30

3—5

14

0,14
0,5
0,070
6
0,42

1400 : 42 = 33

14 :

190 : 42 = 3,

Rbl. 9.30

A
22498
6029369

TÜ RAAMATUKOGU
1 0300 00602936 9

Rbl. 9.30

A
22498
6029369

TÜ RAAMATUKOGU
1 0300 00602936 9

ELEKTRO- JA RAADIOTEHNIKA

H. PEDUSAAR

ELEKTRO- JA RAADIO- TEHNIKA

algajaile

