V. POPOV N. MANSUROV S. NIKOLAJEV

ELEKTROTEHNIKA

EESTI RIIKLIK KIRJASTUS

Arh. eks.

A-21978

V. S. POPOV,
N. N. MANSUROV JA S. A. NIKOLAJEV

ELEKTROTEHNIKA

Lubatud NSV Liidu Kõrgema Hariduse Ministeeriumi kesk-eriõppeasutuste valitsuse poolt kasutada õpikuna tehnikumides ja osakondades, kus elektrotehnika ei ole põhiaineks

EESTI RIIKLIK KIRJASTUS
TALLINN 1958

Originaali tiitel:
В. С. Попов, Н. Н. Мансуров, С. А. Николаев
Электротехника
Госэнергоиздат 1955

Tõlkinud L. Antonov

Käesolevas raamatus käsitletakse alalis- ja vahelduvvooluahelate arvutamise põhiküsimusi, elektrimõõteriistade, transformaatorite ja elektrimasinate teooriat. Samuti valgustatakse tööstusliku elektroonika, elektriajamite ning elektrienergia tootmise, ülekandmise ja jaotamisega seoses olevaid küsimusi.

Raamat on koostatud vastavalt kesk-eriõppeasutustes läbivõetava kursuse «Üldine elektrotehnika» programmile ja on määratud selle aine õpikuks. Õpikus on toodud programmis ettenähtud laboratoorsete tööde kirjeldused.

Käesolev õpik on tõlgitud venekeelse neljanda väljaande järgi. Trükkimise ajal on raamatusse sisse viidud parandusi venekeelse viienda väljaande põhjal.

2
Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu
42952

EESSÕNA

Nõukogude võimu aastatel muutus meie maa kommunistliku partei ja Nõukogude valitsuse juhtimisel mahajäänud agraarmaast eesrindlikuks tööstusriigiks. Kommunistlik partei, juhindudes suure Lenini õpetusest raskemasinatööstuse ja maa elektrifitseerimise kohta, loeb oma peaülesandeks rasketööstuse igakülgset arendamist, mis on kogu rahvamajanduse kindel alus, nõukogude rahva kultuurilise ja materiaalse heaolu vääramatu kasvu allikas. Rasketööstuse pideva kasvu baasil arenevad kergetööstus, toiduainetetööstus ja teised tööstusharud ning samuti sotsialistlik põllumajandus.

Tööviljakus, toodangu kvaliteet ja toodete omahind sõltuvad tehnika arengutasemest. Tootmise järjekindel kasv kõrgeima tehnika baasil on kõigis rahvamajandusharudes lahutamatult seotud elektrifitseerimise arenguga. Elektrienergia kasutamine võimaldab tõsta tööviljakust, täiustada tööriistu, mehhaniseerida ja automatiseerida tootmisprotsesse.

Kommunistliku partei poolt rahvamajanduse arendamise alal püstitatud ülesannete edukaks lahendamiseks vajatakse kvalifitseeritud kaadreid ja eriti tehnikuid, kes on saanud hea ettevalmistuse nii oma erialal kui ka elektrotehnikas.

Käesolev raamat on ette nähtud elektrotehnika õpikuks tehnikumides, kus elektrotehnika ei ole põhiaineks.

Raamatu neljanda väljaande sisu on võrreldes eelmiste väljaannetega tunduvalt lühendatud ja lihtsustatud. Enamik peatükke on kirjutatud uuesti.

Autorid avaldavad tänu Moskva Mehaanikatehnikumi elektrotehnika õppejõudude kollektiivile, kelle kriitilisi märkusi on arvestatud raamatu trükiks ettevalmistamisel.

Autorid

SISSEJUHATUS

Elektrotehnika uurib elektrienergia kasutamist praktilistel eesmärkidel. Elektrotehnika hõlmab elektrienergia tootmise küsimusi, tema jaotamist ja peamiselt muundamist teisteks energialiikideks (mehaaniliseks, keemiliseks, soojus- jne. energiaks).

Elektrienergiat võib väikeste kadudega üle kanda suurtele kaugustele ja jaotada tarbijate vahel igasugustes kogustes — kümnetest vattidest (elektrilambid) kuni kümnete tuhandete kilovattideni (suured elektrimootorid).

Võimalus elektrienergiat väikeste kadudega üle kanda kauge maa taha lahendab tööstuse paigutamisega seosesolevad ülesanded. Tavaliselt asetsevad tehased ja vabrikud tooraineallikate lähedal, elektrijaamad aga peaasjalikult kütuselademete juures või jõgedel. Energia juhitakse elektrijaamadest tehastesse, vabrikutesse ja teistele tarbijatele õhu- või kaabelliinide kaudu.

Elektrienergia kasutamine kutsub kõigis rahvamajandusharudes esile tehnoloogiliste protsesside põhjaliku muutumise. Tsentraalsed aurukatlad, mis käitasid masinaid tehastes ja vabrikutes XIX sajandil, asendusid eraldi iga töömasina juurde kuuluvate elektrimootoritega. Sel alusel tekkis kaasaegne massiline vooltootmine. Sai võimalikuks ehitada uut tüüpi töömasinaid, mis kujutavad endast agregaate, kus kasutatakse üheaegselt suurel arvul elektrimootoreid. Need elektrimootorid monteeritakse töömasinatega ühte ja on nende konstruktsiooni lahutamatuks osaks.

Elektrienergia kasutamine muutis paljusid tehnoloogilisi protsesse. Elektrikeevitus, elektrolüüs, kõrgete temperatuuride saamine, karastamine kõrgsagedusvooludega, samuti telefoni-, telegraafi- ja raadioside põhineb elektrienergia kasutamisel.

Tootmise pidev kasv kõrgeima tehnika baasil on lahutamatult seotud elektrifitseerimise arenguga. Elektrienergia laialdane kasutamine võimaldab täiustada tööriistu, tõstab mitu korda tööviljakust, muudab töö kergemaks, võimaldab laien-

dada tootmisprotsesside mehhaniseerimist ja automatiseerimist kõigis rahvamajandusharudes, täiustada ja juurutada uusi tehnoloogilisi protsesse värviliste ja mustade metallide metallurgias, metallide töötlemisel keemiatööstuses jne.

Põllumajandusliku tootmise edasine areng toimub kõrgeima tehnika baasil, mille energeetiliseks aluseks on elektrifitseerimine. Elektrienergia võimaldab laialt kasutada suure jõudlusega elektritraktoreid, elektriviljapeksumasinaid, elektriseadmeid söötade valmistamiseks ja transportimiseks, elektriniisutus- ja vihmutusseadmeid jne.

Meie maa elektrifitseerimine algas pärast Suurt Sotsialistlikku Oktoobrirevolutsiooni. Töölisklass, kukutanud mõisnike ja kapitalistide võimu ning võtnud võimu enda kätte, hakkas kommunistliku partei juhtimisel ehitama sotsialistlikku ühiskonda. V. I. Lenin näitas, et sotsialismi võidu tähtsaimaks tingimuseks on maa elektrifitseerimine. 1920. aastal formuleeris Lenin äärmise selgusega elektrifitseerimise tähtsuse: «Kommunism — see on nõukogude võim pluss kogu maa elektrifitseerimine».

Lenini initsiatiivil töötati välja meie kodumaa elektrifitseerimise plaan — GOELRO [1] plaan, mille V. I. Lenin nimetas partei teiseks programmiks. Selle plaani kohaselt kavandati 10—15 aasta jooksul ehitada 30 elektrijaama üldvõimsusega 1 750 000 kilovatti.

Kommunistliku partei ja Nõukogude valitsuse juhtimisel täideti see plaan ajalooliselt lühikese ajaga — 10 aastaga. GOELRO plaani edukas ja ennetähtaegne täitmine ning NSV Liidu rahvamajanduse arendamise viie aasta plaanide täitmine ja ületamine viisid selleni, et meie maa jõudis elektrifitseerimise tasemelt juba sõjaeelsetel aastatel ühele esimestest kohtadest maailmas.

Suures Isamaasõjas näitas Nõukogude Liit oma üleolekut kapitalistlikest maadest mitte ainult sõjalisel ja poliitilisel, vaid ka majanduslikul alal. Vaatamata Suure Isamaasõja ajal tekitatud suurtele purustustele oli meie maa energeetika pärast sõda võimsam kui enne sõda.

NSV Liidu rahvamajanduse taastamise ja arendamise sõjajärgse viie aasta plaani eduka täitmise tulemusena ületas elektrienergia toodang 1950. aastal 87% võrra 1940. aasta taseme, moodustades 92 miljardit kilovatt-tundi, elektrijaa-

[1] Vene keeles: ГОЭЛРО = Государственная комиссия по электрификации России (Venemaa Elektrifitseerimise Riiklik Komisjon) (*Tõlk.*).

made üldvõimsus aga ulatus 22,5 miljoni kilovatini 11 miljoni kilovati asemel 1940. aastal.

Viienda viie aasta plaan elektrifitseerimise alal ületati tunduvalt. 1955. aastal tootsid kõik Nõukogude Liidu elektrijaamad kokku 170 miljardit kilovatt-tundi elektrienergiat ehk 87% rohkem kui 1950. aastal.

Nõukogude Liidu Kommunistliku Partei direktiivides NSV Liidu rahvamajanduse arendamise kuuenda viie aasta plaani kohta on öeldud: «Suurendada turbiinelektrijaamade üldvõimsus viie aasta jooksul umbes 2,2-kordseks ja hüdroelektrijaamade võimsus 2,7-kordseks ning pikendada Elektrijaamade Ministeeriumi elektrivõrkude ulatust (pingega 35—220 kilovolti) 2,2-kordselt.»

1960. aastal peab elektrienergia üldine toodang Nõukogude Liidus moodustama 320 miljardit kilovatt-tundi.

Suured on meie edusammud ja saavutused. Kuid me ei tohi rahulduda ja uhkustada nende saavutustega. Ei tohi rahulduda sellega, mis on tehtud. Elektrotehnika areneb nii kiirelt, et tema arengu tänane kõrge tase võib homme osutuda mittekülllaldaseks.

Selleks et õppida kasutama tehnikat, saada eesrindlikuks loovaks töötajaks, tuleb kindlalt omandada rakendusteaduste alused ja eriti õppida tänapäeva elektrotehnikat, mis kujutab endast eesrindliku tehnika keerukat ala.

Ümbritsetuna kommunistliku partei ning Nõukogude valitsuse tähelepanuga ja innustatuna kommunistliku ühiskonna ehitamise suurtest ülesannetest, peavad tehnikumide õpilased selle ülesandega edukalt toime tulema.

ESIMENE PEATÜKK

ELEKTRIVÄLI

1-1. Põhimõisted

Katseliselt on kindlaks tehtud, et kõik kehad looduses koosnevad suurest arvust üliväikestest elektriliselt laetud mateeriaosakestest. Kui kehas on võrdsel hulgal positiivseid ja negatiivseid elektrilaenguid, siis on keha elektriliselt *neutraalne*.

Elektriliselt *laetud* kehas (või keha osas) on ülekaalus mingil põhjusel moodustunud positiivsed või negatiivsed laengud.

Elektriliselt laetud keha ümbritseb *elektriväli*.

Elektriliselt laetud mateeriaosakesed ja elektriväli on kaks omavahel lahutamatult seotud mateeriavormi. Elektriväli kannab teatud hulka energiat, kuid erinevalt laetud osakesest on energia tihedus elektriväljas suhteliselt väike. Elektrivälja iseloomustab omadus katkematult jaotuda ruumis ja omadus üle kanda vastastikusi mõjusid väga suure, kuid seejuures täiesti kindla kiirusega. Kui laetud osakest ümbritsevasse elektrivälja paigutada teine elektriliselt laetud keha, siis avaldub sellele kehale mehaaniline jõud (tähistatakse tähega F), kusjuures avalduva jõu suurus on võrdeline keha laengu suurusega, mida tähistatakse tähega Q. Siiski võib see jõud ka muutumatu suurusega laengu korral olla erisugustes elektriväljades või ühe ja sama elektrivälja eri punktides erineva suurusega; see näitab, et jõu F suurus sõltub mitte ainult keha laengu suurusest Q, vaid ka välja omadustest.

Elektrivälja iseloomustab suurus, mida nimetatakse elektrivälja tugevuseks ehk *väljatugevuseks* ja tähistatakse tähega $\mathcal{E}$.

Seega jõud F, mida elektriväli avaldab laetud kehale, on võrdeline laengu suurusega Q ja väljatugevusega $\mathcal{E}$ selles punktis, kus asetseb laetud keha:

$$F = \mathcal{E} Q. \qquad (1\text{-}1)$$

Avaldisest (1-1) määrame väljatugevuse:

$$\mathcal{E} = \frac{F}{Q}. \qquad (1\text{-}2)$$

Väljatugevus on arvuliselt võrdne elektrivälja poolt ühiklaengule avaldatava jõuga.

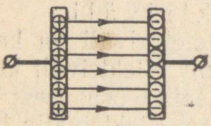
Elektrivälja suunaks antud punktis loetakse positiivsele laetud osakesele mõjuva jõu suunda.

Väljatugevus $\mathcal{E}$, samuti nagu jõud F, on vektoriaalne suurus.

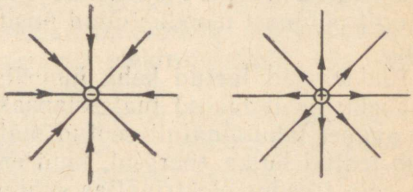
Elektrivälja suunda kujutatakse geomeetriliselt elektrivälja jõujoonte abil.

Jõujooned tõmmatakse elektriväljas nii, et puutuja siht jõujoone igas punktis ühtiks elektrivälja suunaga. Elektrivälja jõujooned algavad positiivse laenguga kehalt ja lõpevad negatiivse laenguga kehal.

Joonisel 1-1 on näitena kujutatud elektriväli kahe tasaparalleelse erinimeliselt laetud plaadi vahel ja joonisel 1-2 elektriliselt laetud kuulide elektriväljad.



Joon. 1-1. Elektriväli kahe paralleelse plaadi vahel.



Joon. 1-2. Elektriväljad positiivselt ja negatiivselt laetud kera ümber.

Jõujooni võib kasutada ka väljatugevuse iseloomustamiseks. Selleks tõmmatakse läbi välja suunaga risti oleva pinna iga ruutsentimeetri väljatugevusega võrdeline arv jõujooni.

Kui väljatugevuse vektorid on elektrivälja kõigis punktides üksteisega võrdsed, siis nimetatakse sellist elektrivälja homogeenseks väljaks.

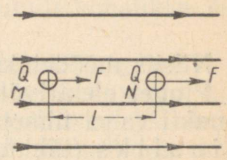
1-2. Pinge. Potentsiaal

Homogeenne elektriväli tekib kahe paralleelse tasapinnalise plaadi vahel, mille lineaarsed mõõted on palju suuremad nende vahekaugusest ja mis on laetud erinimeliselt ühtlase tihedusega.

Oletame, et homogeenses elektriväljas liigub välja mõjul positiivne elektrilaeng Q välja suunas punktist M punkti N, millede vahekaugus on l (joon. 1-3). Välja poolt tehtud töö (tähistatakse tähega A)

$$A = Fl = \mathcal{E}\, Ql. \qquad (1\text{-}3)$$

Suurust, mis võrdub vahemikus MN kulutatud töö ja ülekantud elektrihulga suhtega, nimetatakse p i n g e k s punktide M ja N vahel. Pinget tähistatakse tähega U. Järelikult



Joon. 1-3. Laetud osakese liikumine elektriväljas.

$$U = \frac{A}{Q}. \qquad (1\text{-}4)$$

Positiivse ühiklaengu liikumisel elektriväljas punktist M punkti N on pinge punktide M ja N vahel arvuliselt võrdne elektrivälja poolt tehtava tööga.

Asetades valemisse (1-4) väärtuse $A = \mathcal{E}\, Ql$, saame:

$$U = \frac{\mathcal{E}\, Ql}{Q} = \mathcal{E}l. \qquad (1\text{-}5)$$

Pinge on elektrotehnikas väga tähtis suurus, mis võimaldab arvutada laengute ümberpaigutamisel elektriväljas tehtavat tööd ja võimsust ning samuti väljatugevust.

Praktilises mõõtühikute süsteemis mõõdetakse tööd džaulides (J), elektrilaengut aga kulonites (C). Pinge mõõtühikuks on volt (V):

$$1\ \mathrm{V} = \frac{1\ \mathrm{J}}{1\ \mathrm{C}}.$$

Suuremaks pinge mõõtühikuks on kilovolt (kV):

$$1\ \mathrm{kV} = 10^3\ \mathrm{V},$$

väiksemaks mõõtühikuks aga millivolt (mV):

$$1\ \mathrm{mV} = 10^{-3}\ \mathrm{V}.$$

Avaldame valemist (1-5) väljatugevuse:

$$\mathcal{E} = \frac{U}{l}.$$

Viimane avaldis võimaldab kindlaks määrata väljatugevuse mõõtühiku:

$$[\mathcal{E}] = \frac{V}{m}.$$

Niisiis mõõdetakse väljatugevust voltides meetri kohta.

Pinget elektrivälja mistahes punkti ja maapinnal asetseva punkti vahel nimetatakse elektrivälja antud punkti potentsiaaliks (tähistatakse tähega φ). Potentsiaal on arvuliselt võrdne tööga, mida teeb elektriväli ühiklaengu ümberpaigutamiseks antud punktist punkti, mille potentsiaal on null.

Teades välja üksikute punktide potentsiaale, on hõlpus arvutada pinget nende punktide vahel. Liikugu positiivne ühiklaeng läbi punktide M ja N maapinnal asetsevasse punkti. Oletame, et elektrivälja punktide M ja N potentsiaalid φ_M ja φ_N on teada. Kuna potentsiaal φ_M on arvuliselt võrdne positiivse ühiklaengu ümberpaigutamiseks punktist M maapinnal asetsevasse punkti tehtava tööga, φ_N aga ühiklaenguga ümberpaigutamiseks punktist N samasse maapinna punkti tehtava tööga, siis töö positiivse ühiklaengu ümberpaigutamiseks vahemikus MN ehk punktide M ja N vaheline pinge

$$U_{MN} = \varphi_M - \varphi_N, \qquad (1\text{-}6)$$

s. t. pinge võrdub elektrivälja vastavate punktide potentsiaalide vahega.

1-3. Elektrijuhid ja dielektrikud

Kõik kehad jaotatakse sõltuvalt nende elektrilistest omadustest leppeliselt kahte rühma — elektrijuhtideks ja dielektrikuteks.

Elektrijuhte iseloomustab elektriliselt laetud materiaalosakeste (elektronide ja ioonide) vaba liikumise võimalus kehas. On olemas kaht liiki elektrijuhte.

Esimest liiki elektrijuhtideks, milles saavad liikuda ainult elektronid, on metallid. Metallides on aatomite välisorbiitidel paiknevad elektronid võrdlemisi nõrgalt seotud aatomite tuumadega, mistõttu osa elektrone, olles lahti kistud oma tuumadest, liiguvad aatomite vahel ühe tuuma mõjupiirkonnast teise tuuma mõjupiirkonda, täites ruumi nende vahel nn. elektrongaasiga. Neid elektrone nimetatakse vabadeks elektronideks ehk juhtivuselektronideks. Vabade elektronide olemasolu tõendab asjaolu, et hõõguvad metallid

saadavad välja vabu elektrone. Vabad elektronid on korrapäratus (soojuslikus) liikumises, erinevalt metalli positiivsetest ioonidest, mis moodustavad elektrijuhi kristallvõre ja on hoopis väikese liikuvusega, sooritades ainult kohalikke võnkeid oma keskasendi ümber.

Teist liiki elektrijuhtides, mida nimetatakse elektrolüütideks (soolade, hapete ja aluste vesilahused), lagunevad aine molekulid negatiivseteks ja positiivseteks ioonideks, mis võivad samuti nagu elektronid metallides kogu elektrolüüdi mahus ümber paikneda.

Kehi, millede mahuühikus on vabu elektrone või ioone tähtsusetul arvul, nimetatakse mittejuhtideks ehk dielektrikuteks; nendeks on gaasid, osa vedelikke (mineraalõlid, lakid) ja peaaegu kõik tahked kehad, välja arvatud metallid ja süsi.

Siiski võib teatud tingimustel, näiteks tugevas elektriväljas, toimuda dielektriku molekulide ioniseerimine, mispuhul keha, mis elektrivälja puudumisel või nõrgas väljas oli dielektrikuks, muutub elektrijuhiks. Elektrivälja tugevust, mille puhul algab dielektriku molekulide ioniseerimine, nimetatakse dielektriku läbilöögitugevuseks (elektriliseks tugevuseks). Maksimaalset elektrivälja tugevust, mis on lubatud dielektrikus tema kasutamisel elektriseadmetes, nimetatakse lubatavaks väljatugevuseks. Lubatav väljatugevus on tavaliselt mitu korda väiksem läbilöögitugevusest.

Väga heaks dielektrikuks on vaakuum. Gaasid, sealhulgas ka õhk, on samuti head dielektrikud.

Gaaside elektrilised omadused sõltuvad suurel määral rõhust ja temperatuurist.

Näitena toome mõnede dielektrikute läbilöögitugevused kV/cm: õhk 30, mineraalõli (trafoõli) 50—150, elektrotehniline papp 100, portselan 80—150, vilgukivi 800—2000.

Näide 1-1. Kaks tasapinnalist paralleelset plaati on eraldatud elektrotehnilise papiga, mille paksus $d = 0{,}1$ cm. Leida lubatav pinge ja läbilöögipinge, tingimusel, et lubatav pinge oleks läbilöögipingest 2,5 korda väiksem.

Läbilöögipinge

$$U_m = E_m d = 100 \cdot 0{,}1 = 10 \text{ kV}.$$

Lubatav pinge

$$U = \frac{U_m}{2{,}5} = \frac{10}{2{,}5} = 4 \text{ kV}.$$

ALALISVOOLUAHEL

2-1. Vooluahel

Vabad elektronid metallis ja ioonid elektrolüüdis on kaootilises (korrapäratus) liikumises. Elektrijuhi mistahes ristlõiget läbib sel puhul nii ühes kui teises suunas tõenäoliselt võrdne arv elektrone, mille tõttu elektrijuhi mistahes ristlõiget läbiv elektrihulk võrdub nulliga.

Kui aga vabadele laetud osakestele mõjuvad kindlas suunas jõud (näiteks elektrivälja jõud), siis nende kaootilise liikumise kiirusele liitub mõjuva jõu suunaline kiirusekomponent. Sel puhul läbib juhtme mistahes ristlõiget kindel hulk elektrit, s. o. juhtmes tekib e l e k t r i v o o l.

Elektrivoolu saamiseks on vaja moodustada v o o l u a h e l.

Vooluahel moodustatakse vooluallikatest ja tarbijatest. Voolu olemasolul vooluahelas toimub vooluallikates mitmesuguste energialiikide muundumine elektrienergiaks, tarbijates aga, vastupidi, elektrienergia muundumine teisteks energialiikideks.

Tarbijad ühendatakse vooluallikatega tavaliselt vaskjuhtmete abil.

Laetud osakeste liikumisel vooluahelat moodustavates elektrijuhtides muundub laetud osakeste kineetiline energia nende põrkumisel aine ioonide ja molekulidega osaliselt laetud osakeste kaootilise liikumise energiaks, s. t. eraldub soojusena vooluallikates, tarbijates ja ühendusjuhtmetes. Seoses selle nähtusega öeldakse, et vooluallikatel, tarbijatel ja ühendusjuhtmetel, s. o. kõigil vooluahela elementidel, on t a k i s t u s.

Kaasaegses elektrotehnikas kasutatakse vooluallikatena peamiselt elektrigeneraatoreid, mis muundavad mehaanilise energia elektrienergiaks ja primaarelemente ehk galvaanielemente ning sekundaarelemente ehk akumulaatoreid, mis muundavad keemilise energia elektrienergiaks.

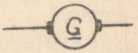
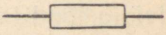
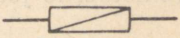
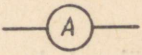
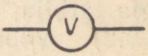
Elektrienergia tarbijaid on väga mitmesuguseid. Nende hulka kuuluvad näiteks elektrimootorid, mis muundavad elektrienergia mehaaniliseks energiaks, hõõglambid, elektriahjud ja mitmesugused elektrisoojendusriistad, milledes elektrienergia muundub soojusenergiaks, elektrolüüdivannid, kus toimub elektrienergia muundumine keemiliseks energiaks.

Abiseadmetena kasutatakse vooluahelates sisse- ja väljalülitamisaparaate (näiteks vinnaklüliteid), elektrimõõteriistu

(näiteks ampermeetreid ja voltmeetreid), kaitseseadiseid (näiteks sulavkaitsmeid).

Elektriskeemides kasutatakse vooluallikate, elektrienergia tarbijate ja abiseadmete märkimiseks tingmärke, milledest mõned on näidatud tabelis 2-1.

Tabel 2-1

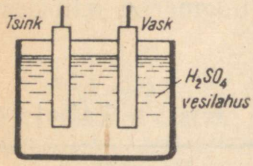
Nimetus	Tingmärk
Elektrigeneraator	
Galvaanielement või akumulaator	
Elektrienergia tarbija, üldiselt	
Elektrimootor	
Elektrilamp	
Ühendusjuhe	
Ühepooluseline lüliti	
Sulavkaitse	
Ampermeeter	
Voltmeeter	

2-2. Primaar- ehk galvaanielement

Lihtsaimaks vooluallikaks on Volta primaarelement (joon. 2-1).

See element koosneb vask- ja tsinkplaadist (-elektroodist),

mis asetsevad väävelhappe vesilahuses. Vee mõjul laguneb osa väävelhapet positiivseteks (2H) ja negatiivseteks (SO_4) ioonideks. Elektrolüüdis asetsev tsinkplaat lahustub keemiliste jõudude mõjul väävelhappe lahuses. Tsingi positiivsed ioonid siirduvad lahusesse ja ühinevad happejäägi (SO_4) negatiivsete ioonidega, moodustades neutraalseid tsinksulfaadi molekule. Tsingi molekulist ülejäänud vabad elektronid tekitavad negatiivse jääklaengu tsinkplaadil, elektrolüüdis aga tekib positiivne jääklaeng osa negatiivsete ioonide neutraliseerimise arvel.



Joon. 2-1. Galvaanielement.

Selle protsessi tulemusel tekib elektroodi ja elektrolüüdi kokkupuute piirikihis elektriväli ning ilmneb potentsiaalide vahe. Elektriväli takistab tsingi positiivsete ioonide siirdumist elektrolüüti. Tsingi lahustumine katkeb, kui elektrivälja jõud tasakaalustavad keemilised jõud.

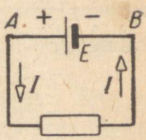
Vaskelektrood elektrolüüdis ei lahustu. Elektrolüüdi ja vaskelektroodi vahel ei teki potentsiaalide vahet. Järelikult on vaskelektroodi potentsiaal võrdne elektrolüüdi potentsiaaliga.

Suurust, mis võrdub tsink- ja vaskelektroodi (ehk tsinkelektroodi ja elektrolüüdi) vahel keemiliste jõudude mõjul tekkiva potentsiaalide vahega, nimetatakse elemendi elektromotoorseks jõuks (tähis E).

Elektromotoorset jõudu mõõdetakse samades ühikutes, mis pingetki, s. o. voltides. Elektromotoorne jõud on arvuliselt võrdne tööga, mida teevad keemilised jõud ühe laenguühiku ümberpaigutamiseks tsinkplaadist elektrolüüti. Volta elemendi elektromotoorne jõud on umbes 1,1 V.

2-3. Elektrivool

Kui ühendada vooluahela klemmidega elektrienergia tarbija, saame lihtsaima vooluahela (joon. 2-2). Vooluallikas moodustab vooluahela sisemise osa, elektrienergia tarbija ja ühendusjuhtmed aga vooluahela välise osa (välisahela).



Joon. 2-2. Vooluahel.

Potentsiaalide vahe mõjul liiguvad elektronid välisahelas klemmilt B klemmile A, mistõttu jääklaengute suurus elektroodidel väheneb ja pinge vooluallika klemmidel (ehk vooluallika klemmipinge) langeb, muutudes elektromotoorsest jõust väiksemaks.

Pinge langemisel nõrgeneb elektriväli vooluallika sees, mille tagajärjel taastub laetud osakeste ümberpaiknemise protsess vooluallika sees keemiliste jõudude mõjul. Seega kujuneb suletud välisahelas pidev elektrivool.

Voolu tugevust (ehk lihtsalt voolu) mõõdetakse elektrijuhi ristlõiget 1 sekundi vältel läbiva elektrihulgaga. Kui vool tugevuselt ja suunalt pikema aja kestel ei muutu, siis nimetatakse seda alalisvooluks. Voolu tähistatakse tähega I.

Järelikult

$$I = \frac{Q}{t}, \qquad (2\text{-}1)$$

kus Q — elektrijuhi ristlõiget aja t vältel läbiv elektrihulk.

Voolu mõõtühikuks on amper (A):

$$1\ \text{A} = \frac{1\text{C}}{1\text{sec}},$$

s. t. vool elektrijuhis on 1 amper, kui tema ristlõiget läbib 1 sekundi jooksul laeng suurusega 1 kulon. Väiksemaks voolu mõõtühikuks on milliamper (mA):

$$1\ \text{mA} = 0{,}001\ \text{A}.$$

Voolu suunaks loetakse suunda, milles liiguvad positiivsed laengud elektriväljas, ehk suunda, mis on vastupidine elektronide liikumissuunaga.

Voolu I ja elektrijuhi ristlõikepinna S suhet nimetatakse voolutiheduseks (tähis δ).

Niisiis

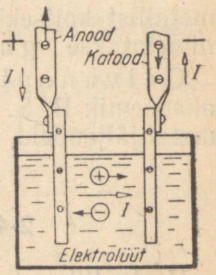
$$\delta = \frac{I}{S}. \qquad (2\text{-}2)$$

Voolutihedust juhtmetes mõõdetakse tavaliselt amprites ruutmillimeetri kohta (A/mm²).

Metallides põhjustavad elektrijuhtivust vabad elektronid, elektrolüütides aga positiivsed ja negatiivsed ioonid.

Kui rakendada pinge elektrolüüdis asetsevale kahele elektroodile (joon. 2-2), siis liiguvad positiivsed ioonid elektrivälja mõjul negatiivse elektroodi (katoodi) poole ja negatiivsed ioonid positiivse elektroodi (anoodi) poole.

Elektrolüüdi negatiivsed ioonid annavad anoodile jõudes sellele oma üleliigsed



Joon. 2-3. Vool elektrolüüdis.

elektronid, mis liiguvad edasi mööda vooluahelat. Positiivsed ioonid ühinevad katoodile jõudes ahelast saabuvate vabade elektronidega. Elektrolüüdist eralduv ainehulk on võrdeline elektrolüüti läbinud elektrihulgaga, s. t.

$$G = cQ = cIt, \qquad (2\text{-}3)$$

kus c — võrdelisuse tegur, mida nimetatakse elektrokeemiliseks ekvivalendiks.

Eri ainete elektrokeemiline ekvivalent on erineva suurusega, näiteks on ta hõbedal 1,118 mg/C, tsingil 0,338 mg/C, vasel 0,329 mg/C ja niklil 0,304 mg/C.



Boris Semionovitš Jakobi (1801—1874).

Silmapaistev vene teadlane. Suur leidur ja praktik. Üks elektrimasinate kaasaegse teooria rajajaid. Galvanoplastika leiutaja ja kaasaegse elektrokeemia isa; rakendas esimesena galvanotehnikat klišeede valmistamiseks rahamärkide trükkimiseks. Elektriliste miinide leiutaja.

Elektrolüüdi aine eraldamise protsessi nimetatakse elektrolüüsiks. Elektrolüüsi kasutatakse laialdaselt värviliste metallide (vase, alumiiniumi) tootmiseks nende ühenditest. Elektrolüüsi kasutatakse samuti metallide katmiseks teisest metallist kaitsekihiga (näiteks kroomimine). Seda protsessi nimetatakse galvanosteegiaks.

Galvanoplastikas, mille alused töötas 1840. a. välja akadeemik B. S. Jakobi, saadakse elektrolüüsi abil reljeefseid metalljäljendeid, mida kasutatakse klišeede valmistamisel.

2-4. Elektrivoolu töö ja võimsus

Vooluallika (generaatori) poolt elektrilaengute ümberpaigutamiseks tehtav töö

$$A = EQ. \tag{2-4}$$

Võttes arvesse, et

$$Q = It, \tag{2-5}$$

leiame:

$$A = EIt. \tag{2-6}$$

Energia jäävuse seaduse põhjal muundub vooluallika poolt toodetav elektrienergia samal ajal vooluahela osades teisteks energialiikideks.

Osa vooluallika energiast (A_1) muundub teisteks energialiikideks välisahelas:

$$A_1 = UQ$$

ehk

$$A_1 = UIt, \tag{2-7}$$

kus U on vooluallika klemmipinge.

Teine osa energiast (A_0) läheb kaduma (muundub soojuseks) vooluallika sees. Energia jäävuse seaduse põhjal

$$A_0 = A - A_1 = (E_1 - U)It$$

ehk

$$A_0 = U_0It, \tag{2-8}$$

kus U_0 on vooluallika elektromotoorse jõu ja klemmipinge vahe. Seda vahet nimetatakse sisemiseks pingelanguks. Niisiis

$$U_0 = E - U,$$

millest

$$E = U + U_0, \tag{2-9}$$

s. t. vooluallika elektromotoorne jõud võrdub vooluallika klemmipinge ja sisemise pingelangu summaga.

Ajaühiku vältel sooritatavat tööd nimetatakse võimsuseks (tähis P).

Seega

$$P = \frac{A}{t}. \tag{2-10}$$

Järelikult vooluallika võimsus

$$P_v = \frac{EIt}{t} = EI \tag{2-11}$$

ja tarbija võimsus

$$P_t = \frac{UIt}{t} = UI. \qquad (2\text{-}12)$$

Võimsust, mis iseloomustab elektrienergia mittetootlikku kulu (näiteks vooluallika sees), nimetatakse kaovõimsuseks:

$$P_0 = U_0 I. \qquad (2\text{-}13)$$

Energia jäävuse seaduse põhjal peab vooluallika võimsus võrduma tarbijate võimsuse ja kaovõimsuse summaga, s. o.

$$P_v = P_t + P_0. \qquad (2\text{-}14)$$

Kui ahelas on mitu vooluallikat, siis

$$\Sigma P_v = \Sigma P_t + \Sigma P_0.$$

Võimsuse mõõtühikuks on v a t t (W).

Vooluallika võimsus on 1 vatt, kui ta toodab igas sekundis 1 J elektrienergiat:

$$1\ \mathrm{W} = \frac{1\ \mathrm{J}}{1\ \mathrm{sec}}.$$

Sellest seosest

$$1\ \mathrm{J} = 1\ \mathrm{W} \cdot 1\ \mathrm{sec},$$

millest järeldub, et džaul ja vattsekund on üks ja seesama tööühik. Teisest küljest

$$1\ \mathrm{J} = 1\ \mathrm{V} \cdot 1\ \mathrm{C};$$

järelikult

$$1\ \mathrm{W} = \frac{1\ \mathrm{V} \cdot 1\ \mathrm{C}}{1\ \mathrm{sec}} = 1\ \mathrm{V} \cdot 1\ \mathrm{A}.$$

Seega seade, mille pinge on 1 V ja vool 1 A, arendab võimsust 1 W.

Suurematek võimsuse mõõtühikuteks on: 1 hektovatt (hW) $= 10^2$ W, 1 kilovatt (kW) $= 10^3$ W ja 1 megavatt (MW) $= 10^6$ W.

Suurematek elektrienergia mõõtühikuteks on: 1 vatt-tund (Wh) $= 3{,}6 \cdot 10^3$ Wsec, 1 hektovatt-tund (hWh) $= 3{,}6 \cdot 10^5$ Wsec ja 1 kilovatt-tund (kWh) $= 3{,}6 \cdot 10^6$ Wsec.

Ühiku valik sõltub mõõdetava võimsuse suurusest. Nii näiteks mõõdetakse elektrilampide võimsust tavaliselt vattides, elektrimootorite võimsust kilovattides, suurte elektrijaamade võimsust megavattides.

Praktikas puutume peale praktilise süsteemi mõõtühikute kokku samade suuruste teiste mõõtühikutega.

Teatavasti

$$1 \text{ kgm} = 9{,}81 \text{ J} = 9{,}81 \text{ Wsec};$$
$$1 \text{ J} = \frac{1}{9{,}81} \text{ kgm} = 0{,}102 \text{ kgm};$$
$$1 \text{ kgm/sec} = 9{,}81 \text{ J/sec} = 9{,}81 \text{ W}.$$

Järelikult

$$1 \text{ HJ} = 75 \text{ kgm/sec} = 736 \text{ W} = 0{,}736 \text{ kW};$$
$$1 \text{ kW} = \frac{1}{0{,}736} \text{ HJ} = 1{,}36 \text{ HJ}.$$

Edasi, kuna

$$1 \text{ cal} = 0{,}427 \text{ kgm},$$

siis

$$1 \text{ J} = \frac{0{,}102}{0{,}427} \text{ cal} = 0{,}24 \text{ cal}.$$

Näide 2-1. Soojendusriist, mis on lülitatud 120 V pingega võrku, tarbib voolu 5 A. Leida soojendusriista võimsus ja tema poolt 3 tunni jooksul tarbitava elektrienergia maksumus, kui 1 kWh maksab 40 kop.

Soojendusriista võimsus

$$P = UI = 120 \cdot 5 = 600 \text{ W}.$$

3 tunni jooksul tarbitav energia

$$A = Pt = 600 \cdot 3 = 1800 \text{ Wh} = 1{,}8 \text{ kWh}.$$

Tarbitud energia maksumus on

$$40 \cdot 1{,}8 = 72 \text{ kop}.$$

Näide 2-2. 220 V pingega võrku lülitatud elektrimootori võimsus on 11 kW. Leida mootori vool.

Kuna

$$P = UI,$$

siis

$$I = \frac{P}{U} = \frac{11000}{220} = 50 \text{ A}.$$

2-5. Ohmi seadus

Praktilises elektrotehnikas on suur tähtsus sõltuvusel elektrijuhile rakendatava pinge ja temas kulgeva voolu vahel.

Voolutihedus juhtmes sõltub juhtme ristlõikepinna ühikut 1 sekundi vältel läbivast laetud osakeste arvust. Viimane oma-

korda sõltub nende keskmisest liikumiskiirusest suunas, mis on paralleelne juhtme teljega. Laetud osakeste keskmine liikumiskiirus on võrdeline elektrivälja tugevusega juhtmes. Järelikult on voolutihedus δ juhtmes võrdeline elektrivälja tugevusega $\mathcal{E}$ s. o.

$$\delta = \gamma \mathcal{E}, \qquad (2\text{-}15)$$

kus γ — juhtme materjalist ja temperatuurist sõltuv tegur, mida nimetatakse e r i j u h t i v u s e k s.

Kuna

$$\mathcal{E} = \frac{U}{l} \quad \text{ja} \quad \delta = \frac{I}{S},$$

siis

$$\frac{I}{S} = \gamma \frac{U}{l},$$

millest

$$I = \frac{U}{\frac{l}{\gamma S}}.$$

Viimase avaldise nimetajat $\frac{l}{\gamma S}$ nimetatakse t a k i s t u s e k s ja tähistatakse tähega r.

Tuues sisse selle tähistuse, saame lõplikul kujul juhtmes kulgeva voolu sõltuvuse selle juhtme otstele (klemmidele) rakendatud pingest. See sõltuvus määrati katseliselt kindlaks XIX saj. esimesel poolel ja seda nimetatakse Ohmi seaduseks:

$$I = \frac{U}{r}. \qquad (2\text{-}16)$$

Vool juhtmes on võrdeline pingega tema klemmidel ja pöördvõrdeline juhtme takistusega.

Lihtsaim vooluahel koosneb vooluallikast ja selle klemmidele ühendatud välistakistusest (joon. 2-2). Eespool selgus, et vooluahelas

$$E = U + U_0.$$

Ohmi seaduse põhjal

$$U = Ir \quad \text{ja} \quad U_0 = Ir_0,$$

kus r_0 — vooluallika sisetakistus;
r — vooluahela välistakistus.

Asendades U ja U_0 nende väärtustega, saame, et

$$E = Ir + Ir_0 = I(r + r_0).$$

Siit vool

$$I = \frac{E}{r + r_0}. \qquad (2\text{-}17)$$

Leitud seost nimetatakse Ohmi seaduseks vooluahela kohta.

Üldjuhul avaldub vooluallika klemmipinge järgmiselt:

$$U = E - U_0 = E - Ir_0. \qquad (2\text{-}18)$$

Vooluahela katkestamine vastab välisahela takistuse suurendamisele lõpmatuseni. Sel juhul muutub vool ahelas nulliks ja vooluallika klemmipinge

$$U = E - Ir_0 = E. \qquad (2\text{-}19)$$

2-6. Takistus ja juhtivus

Kujundades ümber võrduse (2-16), leiame:

$$r = \frac{U}{I}. \qquad (2\text{-}20)$$

Väljendades pinget voltides (V), voolu amprites (A) saame takistuse ühiku (V/A), mida nimetatakse oomiks (Ω). Elektrijuhi takistus on 1 Ω, kui tema klemmidele rakendatud pinge 1 V tekitab selles juhis voolu 1 A.

Näide 2-3. Leida vool hõõglambis, kui tema takistus on 200 Ω ja pinge tema klemmidel 120 V.

Vool

$$I = \frac{U}{r} = \frac{120}{200} = 0{,}6 \text{ A}.$$

Näide 2-4. Kui suur on pinge mootori ergutusmähise klemmidel, kui tema takistus on 60 Ω, vool aga 1,5 A.

Pinge

$$U = Ir = 1{,}5 \cdot 60 = 90 \text{ V}.$$

Skeemidel tähistatakse takistust joonisel 2-4 näidatud tingmärgiga.



Joon. 2-4. Takistuse tingmärk.

Takistuse pöördväärtust nimetatakse juhtivuseks (tähis g):

$$g = \frac{1}{r}. \qquad (2\text{-}21)$$

Juhtivuse ühikuks on oomi pöördväärtus, s. t.

$$[g] = \frac{1}{\Omega}.$$

Erijuhtivuse pöördväärtust nimetatakse eritakistuseks ϱ; järelikult

$$\varrho = \frac{1}{\gamma}. \qquad (2\text{-}22)$$

Seega

$$r = \frac{l}{\gamma S} = \varrho \frac{l}{S}, \qquad (2\text{-}23)$$

millest eritakistus

$$\varrho = \frac{rS}{l}. \qquad (2\text{-}24)$$

Kuna juhtmete takistust mõõdetakse oomides, ristlõiget tavaliselt ruutmillimeetrites ja pikkust meetrites, siis on eritakistuse mõõtühikuks Ω mm²/m, erijuhtivuse mõõtühikuks aga eritakistuse pöördväärtus, s. o. m/Ω mm².

Mõnede elektrijuhtide eritakistused ja erijuhtivused on antud tabelis 2-2.

Tabel 2-2

Materjali nimetus	Erikaal g/cm³	Tõmbetugevus kg/mm²	Sulamistemperatuur °C	Eritakistus Ω mm²/m temperatuuril 20°C	Keskmine takistuse temperatuuritegur (temperatuuril 0–100°C) 1/°C
Alumiinium	2,7	14–22	657	0,029	0,004
Pronks	8,8–8,9	50–60	900	0,021–0,4	0,004
Volfram	18,7	415	3370	0,056	0,00464
Raud	7,7	—	1520	0,13—0,3	0,006
Konstantaan	8,8	40	1200	0,4—0,51	0,000005
Messing	8,1	40	900	0,07—0,08	0,002
Manganiin	8,1	55	960	0,42	0,000006
Vask	8,8	25—40	1083	0,0175	0,004
Nikroom	8,2	70	1360	1,1	0,00015
Teras	7,8	80—150	1400	0,13—0,25	0,006
Fekraal	7,6	—	1450	1,4	0,00028
Kromaal	7,1	80	1500	1,3	0,00004

Elektrijuhi takistus sõltub tema temperatuurist.

Ühelt poolt põhjustab elektrijuhi temperatuuri tõus elektronide ja molekulide vaheliste põrgete arvu suurenemist, mistõttu elektronide keskmine liikumiskiirus juhis väheneb, s. t. et sama pinge puhul vool nõrgeneb. Järelikult võib temperatuuri tõusmisel takistus suureneda.

Teiselt poolt võib temperatuuri tõusmisel suureneda vabade elektronide ja ioonide arv elektrijuhi mahuühikus, mille tagajärjel vool tugevneb. Järelikult võib temperatuuri tõusmisel elektrijuhi takistus väheneda.

Sõltuvalt sellest, kumb põhjus on ülekaalus, võib juhi takistus temperatuuri tõusmisel kas suureneda (metallid) või väheneda (elektrolüüdid, süsi) või jääda praktiliselt muutumatuks (sulamid — manganiin, konstantaan).

Metalljuhtide takistuse juurdekasvu võib temperatuurivahemikus 0—100° C küllaldase täpsusega lugeda võrdeliseks temperatuuri muutusega, s. t.

$$\frac{\Delta r}{r_1} = \alpha(\Theta_2 - \Theta_1),$$

ehk

$$\frac{r_2 - r_1}{r_1} = \alpha(\Theta_2 - \Theta_1),$$

millest

$$r_2 = r_1 + r_1\alpha(\Theta_2 - \Theta_1)$$

ehk

$$r_2 = r_1[1 + \alpha(\Theta_2 - \Theta_1)], \qquad (2\text{-}25)$$

kus α — takistuse temperatuuritegur, mis on võrdne takistuse suhtelisele muutumisele temperatuuri tõusmisel 1° C võrra;

r_1 — temperatuurile Θ_1 vastav takistus;

r_2 — temperatuurile Θ_2 vastav takistus.

Mõnede elektrijuhtide takistuse temperatuuritegurid on antud tabelis 2-2.

Keemiliselt puhaste metallide takistuse temperatuuritegur on ligikaudu $0{,}004\,\frac{1}{^\circ C}$, s. t. temperatuuri muutumisel 1° C võrra muutub nende takistus 0,4%. Mõnede sulamite (konstantaan, manganiin) takistuse temperatuuritegur on väga väike ning seejuures on nimetatud sulamid suhteliselt suure eritakistusega, mistõttu neid kasutatakse etaloontakististe ja takistusmagasinide valmistamiseks, samuti mõõteriistade juurde kuuluvate šuntide ja eeltakistite valmistamiseks jne.

Söel ja elektrolüütidel on takistuse temperatuuritegur negatiivne.

Näide 2-5. Leida õhuliini vaskjuhtme takistus temperatuuril $+20°$ C ja $-20°$ C, kui juhtme ristlõige on 6 mm² ja pikkus 600 m.
Juhtme takistus temperatuuril $\Theta_1 = +20°$ C:

$$r_1 = \varrho \frac{l}{S} = 0{,}0175 \frac{2 \cdot 600}{6} = 3{,}5\ \Omega.$$

Juhtme takistus temperatuuril $\Theta_2 = -20°$ C:

$$r_2 = r_1 [1 + \alpha(\Theta_2 - \Theta_1)] = 3{,}5 [1 + 0{,}04(-40)] = 2{,}94\ \Omega.$$

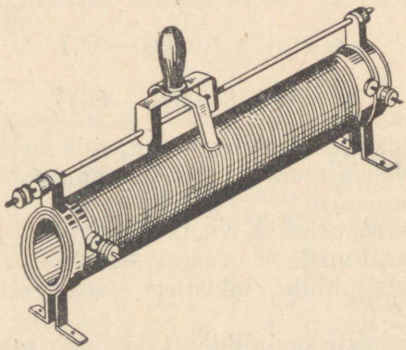
Teades r_1, α ja Θ_1 ning mõõtes r_2, on võimalik valemi (2-25) abil leida juhtme temperatuuri Θ_2. Nii määratakse sageli elektrimasinate ja aparaatide mähiste soojenemise lõpptemperatuuri.

Tuleb vahet teha mõistete «takistus» ja «takisti» vahel.

1. Nagu juba eespool selgus, mõistetakse takistuse all juhtiva materjali (elektrijuhi) teatud kindlat omadust. Nii öeldakse näiteks: hõõglambi takistus on 400 Ω või juhtme takistus on 0,5 Ω.

1. Takistiks nimetatakse seadist, mis omab takistust. Takistid on ette nähtud lülitamiseks vooluahelasse eesmärgiga reguleerida või piirata voolu ahelas.

Seadist, millega saab reguleerida voolu takistuse muutmise teel, nimetatakse r e o s t a a d i k s (joon. 2-5).



Joon. 2-5. Liugkontaktiga reostaat.

Takistid ja reostaadid valmistatakse tavaliselt traadist, mille materjaliks kasutatakse suure eritakistusega takistussulameid, mis võimaldab vähendada takisti valmistamiseks kasutatava traadi pikkust. Kasutusel on traatreostaadid takistuse sujuva ja astmelise reguleerimisega. Esimesel juhul koosneb reostaat mingist isoleerainest valmistatud torust, millel asetseb traatspiraal. Spiraali keerdudel libiseb liikuv kontakt ehk liugkontakt. Reostaadi üks klemm ühendatakse liug-

kontaktiga, teine klemm aga spiraali ühe otsaga. Liugkontakti libistamisega mööda spiraali saab muuta reostaadi klemmide vahel asetseva traadi pikkust ja seega muuta ahelasse lülitatud takistust.

2-7. Elektrienergia muundumine soojuseks

Kui elektrijuhis takistusega r voolab elektrivool, siis toimub seal elektrienergia muundumine soojuseks, mis hajub ümbritsevas ruumis.



Emil Hristianovitš Lenz (1804—1865).

Füüsikaprofessor Peterburi ülikoolis, akadeemik. Üks suurimaid füüsikuid XIX sajandil, kes etendas tähtsat osa kaasaegse elektriõpetuse arengus ja formuleeris rea tähtsaid elektrotehnika seadusi. E. H. Lenz on üks vene füüsikute kooli rajajaid.

Võimsus elektrienergia muundumisel soojuseks

$$P = UI = I^2r. \tag{2-26}$$

Soojuseks muunduv energiahulk

$$A = I^2rt.$$

Võttes arvesse, et 1 J = 0,24 cal, saab voolu toimel tekkiva soojushulga (tähis Q) leida valemiga:

$$Q = 0{,}24\, I^2rt. \tag{2-27}$$

Elektrijuhis eralduva soojushulga sõltuvuse voolust, takistusest ja ajast avastas katseliselt vene akadeemik E. H. Lenz. Samaaegselt Lenziga avastas selle sõltuvuse Joule. Seetõttu kannab ta Lenz-Joule'i seaduse nime ning on sõnastatud järgmiselt: *elektrijuhis voolu mõjul eralduv soojushulk on võrdeline voolu ruuduga, takistusega ja voolu läbimise ajaga.*

Näide 2-6. Leida soojendusriistas 30 minuti jooksul voolu toimel eralduv soojushulk, kui tema takistus $r = 24\ \Omega$ ja võrgupinge 120 V.

Soojendusriista läbiv vool

$$I = \frac{U}{r} = \frac{120}{24} = 5\ \text{A}.$$

Eralduv soojushulk

$$Q = 0{,}24\, I^2 r t = 0{,}24 \cdot 5^2 \cdot 24 \cdot 30 \cdot 60 = 259\,200\ \text{cal}.$$

Elektrienergia muundumine soojuseks elektriahjudes, samuti majapidamises ja tootmises kasutatavates soojendusriistades on kasulik nähtus.

Teistes seadmetes aga, nagu näiteks elektrimasinates ja -aparaatides, transformaatorites, elektrijuhtmetes jne., on elektrienergia muundumine soojuseks kahjulik, sest seda soojust ei kasutata, vaid see hoopis halvendab nende masinate ja aparaatide tööd; mõnel juhul aga võib eralduvast soojusest tingitud lubamatu ülekuumenemine rikkuda seadmete isolatsiooni ja häirida normaalset tööd.

Juhtmest voolu läbilaskmisel tekkiv soojus salvestub juhtmes, mille tulemusena tema temperatuur tõuseb, ja lahkub ümbruskonda. Soojuse ülekandumise kiirus ümbritsevasse ruumi on võrdeline juhtme ja ümbritseva keskkonna temperatuuride vahega. Voolu sisselülitamise hetkel on juhtme ja ümbritseva keskkonna temperatuurid võrdsed. Ainult väike osa voolu mõjul eralduvast soojusest siirdub ümbritsevasse keskkonda, kuna suurem osa soojusest läheb juhtme soojendamiseks. Sellega on seletatav temperatuuri kiire kasv sellel perioodil. Juhtme temperatuuri tõusmisel juhtme ja ümbritseva õhu temperatuuride vahe suureneb, mille tagajärjel juhtmest ümbritsevasse keskkonda hajuv soojushulk samuti suureneb. Selle tõttu juhtme temperatuuri tõus üha enam aeglustub. Lõpuks saabub teatud temperatuuril soojuslik tasakaal: juhtmes tekkiv soojushulk muutub võrdseks väliskeskkonda siirduva soojusega. Juhtme temperatuur saavutab s t a b i i l s e (püsiva) väärtuse. Soojenemise aeg stabiilse temperatuuri kujunemiseni on mitmesugustel seadmetel erinev: hõõglambi niit saavutab stabiilse temperatuuri sekundi murdosa pärast, elektrimasin aga mitme tunni pärast. Isoleeritud juhtmete temperatuur ei tohi ületada kindlat piiri, sest liiga tugeval ülekuumenemisel võib isolatsioon söestuda ja isegi põlema süttida. Isoleerimata juhtmete (paljasjuhtmete) ülekuumenemine kutsub esile nende mehaaniliste omaduste muutumise (väheneb tõmbetugevus). Mitmesuguste isoleeritud juhtmete normaalseks ekspluateerimiseks on normidega ette nähtud maksi-

maalsed lubatud soojenemistemperatuurid (60—100° C) sõltuvalt isolatsiooni liigist ja montaažitingimustest. Voolu, mille puhul juhe kuumeneb maksimaalse lubatud temperatuurini, nimetatakse juhtme nimivooluks. Mitmesuguse ristlõikega isoleeritud vaskjuhtmete nimivoolude väärtused on toodud tabelis 2-3.

Tabel 2-3.

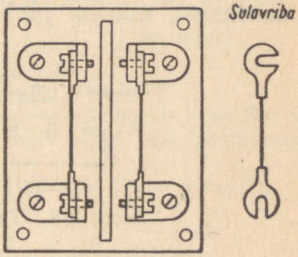
Juhtme ristlõige mm²	0,50	0,75	1,0	1,5	2,5	4	4	10	16	25	35	50	70
Nimivool A	10	13	15	20	27	36	46	68	90	125	150	185	240

Kui juhet läbib lubatust suurem vool, siis võib juhe üle kuumeneda. Eriti tunduvalt võib juhtme temperatuur tõusta lühise korral. Lühis tekib vooluahela juhtmete ühendamisel väga väikese takistuse kaudu.

Lühisel tekib lühisvool, mis ületab mitmekordselt juhtmete maksimaalse lubatud voolu (nimivoolu). Lühisvool võib põhjustada elektriseadmes mehaanilisi ja soojuslikke vigastusi.

Vooluahelate üksikud osad kaitstakse alati voolust põhjustatava ülekuumenemise eest sulavkaitsmetega või spetsiaalsete releedega.

Üks sulavkaitsme tüüp on näidatud joonisel 2-6. Kaitse lülitatakse juhtmete katkestuskohta järjestikku elektrienergia tarbijaga. Kaitsme põhiosa — sulavriba — kujutab endast kergesti sulavast metallist traati, mis voolu tugevnemisel üle lubatud väärtuse kuumeneb sulamistemperatuurini ja sulades katkestab vooluahela, lülitades kaitstava ahelaosa välja. Sulavkaitsme tingmärk on näidatud tabelis 2-1.

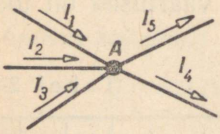


Joon. 2-6. Kahepooluseline kaitse.

2-8. Kirchhoffi esimene seadus

Kui vooluahela mingis punktis on kokku ühendatud mitu juhet, siis nimetatakse seda punkti hargnemispunktiks ehk sõlmpunktiks. Kui hargnemispunktist väl-

juvates juhtmetes kulgeb vool, siis on hargnemispunkti juurdevoolavate voolude summa võrdne hargnemispunktist äravoolavate voolude summaga. Seda seadust nimetatakse Kirchhoffi esimeseks seaduseks.



Joon. 2-7. Vooluahela hargnemispunkt.

Näiteks võib punkti A (joon. 2-7) kohta kirjutada:

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_4 + I_5 \qquad (2\text{-}28)$$

ehk

$$I_1 + I_2 + I_3 + (-I_4) + (-I_5) = 0$$

või üldkujul

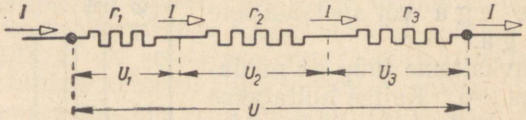
$$\Sigma I = 0, \qquad (2\text{-}29)$$

s. t. *hargnemispunktis on kõigi voolude algebraline summa võrdne nulliga.* Seejuures loetakse juurdevoolavaid voole positiivseteks ja äravoolavaid voole negatiivseteks.

Rakendades Kirchhoffi seadust mittehargneva ahela kohta, leiame, et ahela kõigis osades on vool ühetugevune.

2-9. Takistuste järjestikku-ühendus

Välisahel moodustatakse sageli mitte ühest, vaid mitmest takistusest, mis on järjestikku-, paralleel- või segaühenduses.



Joon. 2-8. Takistuste järjestikku-ühendus.

J ä r j e s t i k k u - ü h e n d u s e k s nimetatakse ühendust (joon. 2-8), mispuhul esimese takistuse lõpp on ühendatud teise takistuse algusega, teise lõpp kolmanda algusega jne. Kuna voolu hargnemist ei esine, siis läbib kõiki takistusi ühesuurune vool.

Ohmi seaduse põhjal pinged vooluahela igal osal (takistusel)

$$U_1 = Ir_1; \quad U_2 = Ir_2; \quad U_3 = Ir_3.$$

Kuna vool on kõigis ahelaosades ühesuurune, siis on pingelangud ahelaosades võrdelised nende takistustega, s. t.

$$U_1 : U_2 = r_1 : r_2; \quad U_2 : U_3 = r_2 : r_3. \qquad (2\text{-}30)$$

Ahelaosade võimsused:

$$P_1 = U_1 I; \quad P_2 = U_2 I; \quad P_3 = U_3 I.$$

Kogu ahela võimsus võrdub üksikute osade võimsuste summaga:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 = I(U_1 + U_2 + U_3) = IU,$$

millest järeldub, et pinge U ahela klemmidel on võrdne üksikutes ahelaosades esinevate pingelangude summaga:

$$U = U_1 + U_2 + U_3. \qquad (2\text{-}31)$$

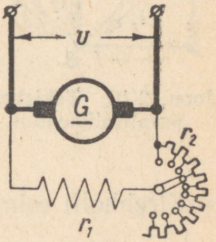
Jagades võrrandi mõlemad pooled vooluga I, saame:

$$\frac{U}{I} = \frac{U_1}{I} + \frac{U_2}{I} + \frac{U_3}{I}$$

ehk

$$r = r_1 + r_2 + r_3, \qquad (2\text{-}32)$$

kus r on ahela üldtakistus, s. t. takistusi r_1, r_2 ja r_3 asendav ekvivalentne takistus, milles tekib muutumatu pinge korral sama suur vool.



Joon. 2-9. Generaatori ergutusmähise ja reostaadi järjestikkuühendus.

Näide 2-7. Järjestikku generaatori ergutusmähisega, mille takistus $r_1 = 40\ \Omega$, on lülitatud reostaat (joon. 2-9), mille takistust võib muuta piirides 0 kuni 200 Ω. Määrata generaatori ergutusvoolu reguleerimise piirid, kui generaatori pinge on 240 V.

Takistuste järjestikku-ühenduse korral üldtakistus $r = r_1 + r_2$.

Ergutusvool, kui reostaadi takistus on 0 Ω:

$$I_1 = \frac{U}{r_1 + r_2} = \frac{240}{40 + 0} = 6 \text{ A}.$$

Ergutusvool, kui reostaadi takistus on 200 Ω:

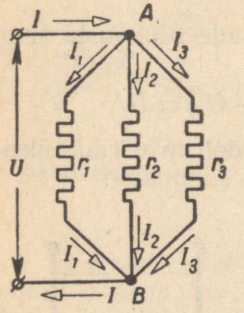
$$I_2 = \frac{U}{r_1 + r_2} = \frac{240}{40 + 200} = 1 \text{ A}.$$

Seega saab voolu reguleerida piirides 1 kuni 6 A.

2-10. Takistuste paralleelühendus

Takistuste paralleelühenduseks nimetatakse ühendust (joon. 2-10), mispuhul kõigi takistuste ühed klemmid on ühendatud vooluahela ühte punkti, samade takistuste teised

klemmid aga vooluahela teise punkti. Järelikult on paralleelühenduse korral vooluahela kahe punkti vahele lülitatud mitu takistust, mis moodustavad paralleelharud.



Joon. 2-10. Takistuste paralleelühendus.

Seejuures on pinge kõigi harude otstel ühesuurune, harudes kulgevad voolud aga on määratud Ohmi seadusega:

$$I_1=\frac{U}{r_1};\quad I_2=\frac{U}{r_2};\quad I_3=\frac{U}{r_3}.$$

Pinge hargnemispunktide vahel (A ja B joonisel 2-10)

$$U=I_1r_1=I_2r_2=I_3r_3,$$

millest

$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{r_2}{r_1}\quad\text{ja}\quad\frac{I_2}{I_3}=\frac{r_3}{r_2},\qquad(2\text{-}33)$$

s. t. voolud jagunevad paralleelharudes pöördvõrdeliselt harude takistustega.

Kirchhoffi esimese seaduse põhjal

$$I=I_1+I_2+I_3$$

ehk

$$\frac{U}{r}=\frac{U}{r_1}+\frac{U}{r_2}+\frac{U}{r_3}=U\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}+\frac{1}{r_3}\right).$$

Taandades võrrandit U-ga, saame:

$$\frac{1}{r}=\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}+\frac{1}{r_3}\qquad(2\text{-}34)$$

ehk

$$g=g_1+g_2+g_3,\qquad(2\text{-}35)$$

kus r ja g on vastavalt vooluahela üldtakistus ja -juhtivus. Valemist (2-35) järeldub, et paralleelselt ühendatud takistustega ahela üldjuhtivus võrdub paralleelharude juhtivuste summaga.

Valem (2-34) võimaldab määrata ahela üldtakistuse. Näiteks kolme paralleelselt ühendatud takistuse korral, viies võrrandi (2-34) parema poole ühise nimetaja alla, saame:

$$\frac{1}{r}=\frac{r_2r_3+r_1r_3+r_1r_2}{r_1r_2r_3},$$

millest

$$r = \frac{r_1 r_2 r_3}{r_2 r_3 + r_1 r_3 + r_1 r_2}. \qquad (2\text{-}36)$$

Kui takistused $r_1 = r_2 = r_3$, siis ahela üldtakistus

$$r = \frac{r_1^3}{3r_1^2} = \frac{r_1}{3}$$

ja üldjuhul n paralleelharu korral

$$r = \frac{r_1}{n}. \qquad (2\text{-}37)$$

Kahe paralleelharu korral

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2},$$

millest

$$r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}. \qquad (2\text{-}38)$$

Elektrienergia tarbijate paralleelühenduse korral on kõik tarbijad ühesuuruse pinge all ning iga üksiku tarbija töörežiim ei sõltu teistest.

Hoopis teistsugune on lugu järjestikku ühendatud tarbijate korral, mispuhul ühe järjestikku ühendatud tarbija takistuse muutmisel muutuvad ka teiste temaga ühendatud tarbijate osapinged. Seepärast elektrilambid ja -mootorid, mis on ette nähtud töötamiseks kindlal pingel (nimipingel), lülitatakse alati p a r a l l e e l s e l t.

Näide 2-8. Elektrivõrku pingega 220 V on paralleelselt lülitatud elektrimootor võimsusega 1,1 kW ja 11 elektrilampi, igaüks võimsusega 40 W. Leida vool võrgujuhtmetes.

Mootori vool

$$I_1 = \frac{P_1}{U} = \frac{1100}{220} = 5 \text{ A}.$$

Lampide vool

$$I_2 = \frac{P_2}{U} = \frac{11 \cdot 40}{220} = 2 \text{ A}.$$

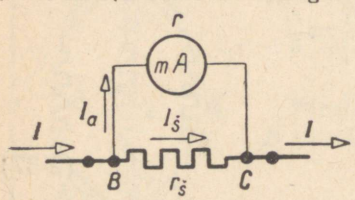
Vool võrgujuhtmetes

$$I = I_1 + I_2 = 5 + 2 = 7 \text{ A}.$$

Näide 2-9. Leida kümne paralleelselt lülitatud elektrilambi üldtakistus, kui iga lambi takistus $r_1 = 240\ \Omega$.

$$r = \frac{r_1}{n} = \frac{240}{10} = 24\ \Omega.$$

Näide 2-10. Milliampermeetri nimivool $I_n = 25$ mA ja takistus $r = 4\ \Omega$. Kui suure takistusega takisti (šunt) tuleb lülitada paralleelselt milliampermeetriga (joon. 2-11), et suurendada tema mõõteulatust 1 A-ni.



Joon. 2-11. Milliampermeeter šundiga.

Paralleelühenduse korral

$$\frac{I_n}{I_š} = \frac{r_š}{r},$$

millest

$$r_š = \frac{I_n}{I - I_n} r = \frac{0{,}025}{1 - 0{,}025} \cdot 4 = 0{,}103\ \Omega.$$

2-11. Takistuste segaühendus

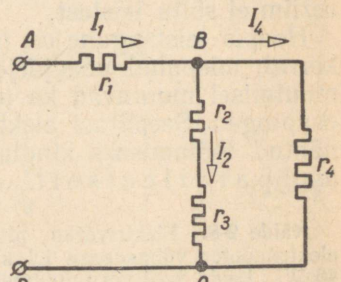
Takistuste segaühenduse näiteks on joonisel 2-12 kujutatud ahel. Selles ahelas on kaks järjestikku ühendatud osa: takistusest r_1 koosnev osa AB ja kahest paralleelharust koosnev osa BC.

Kuna ühe paralleelharu takistus on r_4, teise haru takistus aga $(r_2 + r_3)$, siis osa BC takistus

$$r_{BC} = \frac{r_4(r_2 + r_3)}{r_4 + (r_2 + r_3)};$$

ahela üldtakistus

$$r = r_1 + r_{BC} = r_1 + \frac{r_4(r_2 + r_3)}{r_4 + (r_2 + r_3)}.$$



Joon. 2-12. Takistuste segaühendus.

Näide 2-11. Leida voolud ahela kõigis osades (joon. 2-12) ja pinge paralleelharudel (punktide B ja C vahel), kui pinge ahela klemmidel $U_{AD} = 450$ V ja takistused

$$r_1 = 3{,}33\ \Omega, \quad r_2 = 70\ \Omega, \quad r_3 = 10\ \Omega, \quad r_4 = 40\ \Omega$$

Ahela üldtakistus

$$r = r_1 + \frac{r_4(r_2 + r_3)}{r_4 + (r_2 + r_3)} = 3{,}33 + \frac{40(70 + 10)}{40 + 70 + 10} = 30\ \Omega.$$

Vool ahela mittehargnevas osas

$$I_1 = \frac{U_{AD}}{r} = \frac{450}{30} = 15 \text{ A}.$$

Pinge paralleelharudel

$$U_{BC} = U_{AD} - I_1 r_1 = 450 - 15 \cdot 3{,}33 = 400 \text{ V}.$$

Voolud paralleelharudes

$$I_2 = \frac{U_{BC}}{r_2 + r_3} = \frac{400}{70 + 10} = 5 \text{ A};$$

$$I_4 = \frac{U_{BC}}{r_4} = \frac{400}{40} = 10 \text{ A}.$$

2-12. Vooluahel kahe elektromotoorse jõu allikaga

Võtame vaatluse alla vooluahela, kus esineb mitu, näiteks kaks, elektromotoorse jõu allikat (joon 2-13).

Sellistes ahelates määratakse vool superponeerimisprintsiibi järgi, mille kohaselt vool ahelas võrdub üksteisest lahus toimivate elektromotoorsete jõudude poolt põhjustatavate voolude algebralise summaga.

Oletame, et ahelas toimib ainult E_1.

Sel juhul vool

$$I_1 = \frac{E_1}{r_{01} + r_{02} + r},$$

kus r_{01} — allika E_1 sisetakistus;

r_{02} — allika E_2 sisetakistus.

Voolu I_1 suund ühtib elektromotoorse jõu E_1 suunaga.

Seejärel määrame E_2 poolt põhjustatava voolu:

$$I_2 = \frac{E_2}{r_{01} + r_{02} + r}.$$

Selle voolu suund ühtib E_2 suunaga.

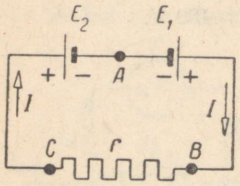
Tegelik vool ahelas E_1 ja E_2 ühisel toimimisel on samasuunaliste elektromotoorsete jõudude korral võrdne voolude I_1 ja I_2 summaga, s. t.

$$I = I_1 + I_2 = \frac{E_1 + E_2}{r_{01} + r_{02} + r}. \qquad (2\text{-}39)$$

Kui E_1 ja E_2 on vastassuunalised, siis on tegelik vool võrdne voolude I_1 ja I_2 vahega, s. t.

$$I = I_1 - I_2 = \frac{E_1 - E_2}{r_{01} + r_{02} + r}. \qquad (2\text{-}40)$$

Viimasel juhul tekib vool tingimusel, et $E_1 \neq E_2$, ja tema suunaks on suurema elektromotoorse jõu suund. Olgu $E_1 > E_2$; sel juhul ühtib tegeliku voolu suund E_1-ga ja on vastupidine E_2-ga (voolu suund on joonisel 2-13 näidatud nooltega). Voolule vastusuunatud elektromotoorset jõudu nimetatakse vastu-elektromotoorseks jõuks.



Joon. 2-13. Vooluahel kahe elektromotoorse jõu allikaga.

Kujundades valemi (2-40) ümber, leiame:

$$E_1 - E_2 = Ir_{01} + Ir_{02} + Ir, \qquad (2\text{-}41)$$

millest

$$E_1 = E_2 + Ir_{01} + Ir_{02} + Ir.$$

Vooluallikas E_1 töötab generaatorirežiimis. Generaatorirežiimis töötava vooluallika klemmipinge

$$U_{BC} = E_1 - Ir_{01} = E_2 + Ir_{02} + Ir.$$

Korrutis Ir väljendab pinget U_{BC} vooluahela punktide B ja C vahel, s. o. takistuse r klemmidel.

Summa $E_2 + Ir_{02}$ väljendab pinget U_{CA} punktide C ja A vahel, s. o. vastu-elektromotoorse jõu allika klemmidel.

Järelikult

$$U_{BC} = E_2 + Ir_{02}.$$

Ahelaosas CA, kus toimib vastu-elektromotoorne jõud, ületavad elektrilised jõud näiteks mehaanilised jõud ja toimub elektrienergia muundumine mitte ainult soojuseks, vaid ka mehaaniliseks või keemiliseks energiaks sõltuvalt elektromotoorse jõu allika liigist. Järelikult on elektromotoorse jõu allikas sel juhul elektrienergia tarbijaks.

Üldjuhul võib elektromotoorse jõu allikas töötada elektrienergia generaatorina või tarbijana, kusjuures tema klemmipinge

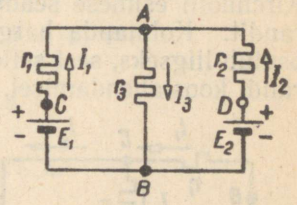
$$U = E \mp Ir_0. \qquad (2\text{-}42)$$

2-13. Kirchhoffi teine seadus. Vooluahela arvutus Kirchhoffi seaduste põhjal

Üldisemal juhul võib vooluahel olla moodustatud mitmest elektromotoorse jõu allikast ja takistusest, mis on omavahel ühendatud meelevaldsel viisil. Olgu antud joonisel 2-14a näidatud keerukas vooluahel.

Pinge punktide A ja B vahel

$$U_{AB} = E_1 - I_1 r_1;$$
$$U_{AB} = E_2 - I_2 r_2;$$
$$U_{AB} = I_3 r_3.$$



Joon. 2-14a. Keerukas vooluahel.

Kõrvutades kaks esimest valemit, leiame, et kinnise ringi $ADBCA$ kohta kehtib võrrand:

$$E_1 - I_1 r_1 = E_2 - I_2 r_2, \qquad (2\text{-}43)$$

millest

$$E_1 - E_2 = I_1 r_1 - I_2 r_2 \qquad (2\text{-}44)$$

ehk üldkujul

$$\Sigma E = \Sigma (Ir). \qquad (2\text{-}45)$$

See võrrand väljendab Kirchhoffi teist seadust: *vooluahela mistahes kinnises ringis toimivate elektromotoorsete jõudude algebraline summa võrdub üksikutel takistustel tekkivate pingelangude algebralise summaga.*

Võrrandite koostamisel Kirchhoffi teise seaduse põhjal loetakse elektromotoorsed jõud ja pingelangud positiivseteks (märgitakse võrrandis plussmärgiga), kui elektromotoorsete jõudude ja vastavate voolude suunad ühtivad kinnises ringis vabalt valitud ringkäigu suunaga.

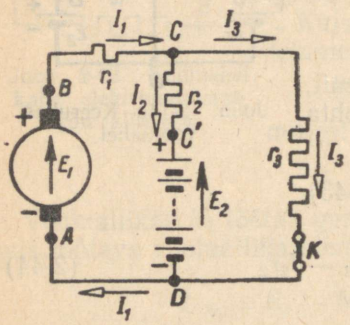
Elektromotoorsed jõud ja pingelangud loetakse negatiivseteks (märgitakse võrrandis miinusmärgiga), kui elektromotoorsete jõudude ja voolude suunad on ringi vastavates osades valitud ringkäigu suunaga vastupidised.

Keerukas ahelas saab määrata voolujaotust Kirchhoffi esimese ja teise seaduse põhjal koostatud võrrandite kooslahendamise teel.

Algul märgitakse skeemil vooluahela kõigis osades eeldatavad positiivsed voolusuunad. Kirchhoffi esimese ja teise seaduse põhjal koostatud võrrandite arv peab olema võrdne tundmatute voolude arvuga. Tuleb märkida, Kirchhoffi seaduste põhjal saab koostada alati rohkem võrrandeid kui on tundma-

tuid voole, kusjuures osa võrrandeid on teiste algebralisteks teisenditeks. Et arvutusvõrrandid oleksid algebraliselt sõltumatud, peavad olema täidetud järgmised tingimused.

1. Kirchhoffi esimese seaduse põhjal koostatud võrrandite arv peab olema hargnemispunktide arvust ühe võrra väiksem. Kui näiteks ahelas on kolm hargnemispunkti, siis tuleb Kirchhoffi esimese seaduse põhjal koostada ainult kaks võrrandit. Kolmanda hargnemispunkti kohta koostatud võrrand osutub liigseks, sest selle võib saada kahe, juba koostatud võrrandi kooslahendamisel.



Joon. 2-14 b. Näite 2-12 juurde.

2. Võrrandite koostamisel Kirchhoffi teise seaduse põhjal tuleb valida lihtsamad vooluringid ja jälgida, et vooluringis, mille kohta võrrandit koostatakse, oleks vähemalt üks elektromotoorne jõud või pingelang, mis ei esine varem koostatud võrrandites.

Näide 2-12. Leida voolud I_1, I_2 ja I_3 (joon. 2-14 b), kui $E_1 = 130$ V, $E_2 = 117$ V, $r_1 = 1\ \Omega$, $r_2 = 0{,}6\ \Omega$, $r_3 = 24\ \Omega$.

Kolme tundmatu voolu määramiseks tuleb koostada kolm võrrandit, üks neist Kirchhoffi esimese seaduse ja kaks Kirchhoffi teise seaduse põhjal, olles eelnevalt kandnud joonisele eeldatavad voolusuunad ahela kõigis osades.

Esimese võrrandi koostame punkti C kohta:

$$I_1 = I_2 + I_3; \tag{2-46}$$

teise võrrandi koostame ringi $ABCC'DA$ kohta:

$$E_1 - E_2 = I_1 r_1 + I_2 r_2; \tag{2-47}$$

kolmanda võrrandi koostame ringi $ABCKDA$ kohta:

$$E_1 = I_1 r_1 + I_3 r_3. \tag{2-48}$$

Asendades võrrandis 2-47 ja 2-48 elektromotoorsed jõud ja takistused nende arvväärtustega, saame:

$$130 - 117 = I_1 + 0{,}6 I_2$$

ehk

$$13 = I_1 + 0{,}6 I_2; \tag{2-49}$$
$$130 = I_1 + 24 I_3. \tag{2-50}$$

Asendades viimases võrrandis I_3 tema avaldisega võrrandist (2-46), saame:

$$130 = I_1 + 24 I_1 - 24 I_2 = 25 I_1 - 24 I_2. \tag{2-51}$$

Korrutades võrrandit (2-49) $\frac{24}{0{,}6} = 40$-ga ja liites võrrandiga (2-51), saame:

$$I_1 = \frac{650}{65} = 10 \text{ A}.$$

Pinge punktide C ja D vahel

$$U_{CD} = E_1 - I_1 r_1 = 130 - 10 \cdot 1 = 120 \text{ V};$$

$$I_3 = \frac{U_{CD}}{r_3} = \frac{120}{24} = 5 \text{ A};$$

$$I_2 = I_1 - I_3 = 10 - 5 = 5 \text{ A}.$$

2-14. Galvaanielemendid ja akumulaatorid

Kui asetada elektrolüüti kaks eri metallist elektroodi, saame keemilise vooluallika — primaar- ehk galvaanielemendi.

On olemas mitut tüüpi galvaanielemente. § 2-2 käsitletud Volta elementi tänapäeval ei kasutata, sest tal on mitmeid puudusi. Üheks Volta elemendi puuduseks on elemendi polarisatsioon. Kui elemendist tarbitakse voolu, siirduvad vesiniku positiivsed ioonid vaskplaadile, võtavad sellelt elektrone juurde ning muutuvad neutraalseteks aatomiteks. Nii moodustub elektroodi ümber suhteliselt suure takistusega vesinikukiht, mis eraldab positiivse elektroodi (anoodi) elektrolüüdist. Sellist nähtust nimetataksegi elemendi polarisatsiooniks. Polarisatsiooni vältimiseks kasutatakse depolarisaatoreid — aineid, mis kergesti annavad ära hapnikku (näiteks mangaandioksüüd). Need ained moodustavad vesinikuga ühinedes vee, mistõttu vesinikukihti elektroodi ümber ei teki.

Tänapäeval kasutatavatest elementidest on üks levinumaid Leclanché element. See element koosneb süsi- ja tsinkelektroodist, mis asetsevad ammooniumkloriidi ehk salmiaagi (NH_4Cl) lahuses. Depolarisaatoriks on mangaandioksüüd (MnO_2), mis ümbritseb süsielektroodi. Elemendi elektromotoorne jõud on 1,45 V.

Leclanché elemendi erikujuks on kuivelement (joon. 2-15). Selle elemendi positiivne süsielektrood asetseb tsinksilindri keskel, mis moodustab negatiivse elektroodi. Elektroodidevaheline ruum on täidetud ammooniumkloriidi lahusega, mis on tärklise abil muudetud taignataoliseks massiks. Volta ja Leclanché elementides toimuvad protsessid on mittepöördu-

vad, s. t. nende elementide tühjenemisel kujunevaid aineid ei saa uuesti muuta aktiivaineteks. Kuid on olemas ka teistsuguseid keemilisi vooluallikaid, milledes, kui neid läbib teisest vooluallikast saadav vool, salvestub keemiline energia (toimub nn. laadimine). Kui elemendi klemmidele ühendada tarbija, muundub salvestunud keemiline energia elektrienergiaks (toimub nn. tühjendamine). Niisuguseid keemilisi vooluallikaid nimetatakse sekundaarelementideks ehk akumulaatoriteks (lühidalt akudeks).

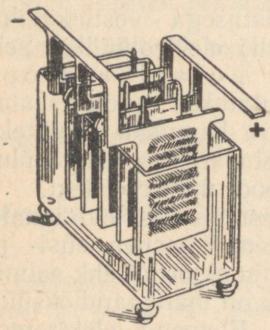


Joon. 2-15. Kuivelement.

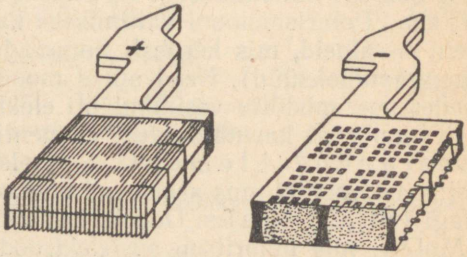
Tänapäeval kasutatakse kaht tüüpi akusid — pliii- ehk happeakusid ja kadmiumnikkel- ehk leelisakusid.

Pliiakud. See aku koosneb kahest pliii- (seatina-) plaatide plokist, mis asetsevad väävelhappe vesilahusega täidetud nõus (joon. 2-16 a).

Positiivsed plaadid asetsevad negatiivsete plaatide vahel. Nii positiivsed kui ka negatiivsed plaadid on omavahel ühendatud pliist ühendusliistuga. Iga plaat koosneb pliivõrest, millesse on pressitud aktiivmass (joon. 2-16 b). Pärast valmistamist plaadid formeeritakse, s. o. teostatakse spetsiaalne elektrolüütiline töötlemine.



Joon. 2-16 a. Happeaku.



Joon. 2-16 b. Happeaku plaadid.

Laetud aku positiivse plaadi aktiivmassiks on pliidioksüüd (PbO_2), negatiivse elektroodi aktiivmassiks aga urbne plii (Pb). Elektrolüüdiks on 25—34%-line väävelhappelahus.

Laetud pliiaku elektromotoorne jõud on umbes 2,2 V.

Tühjendamisel langeb pliiaku pinge kiiresti 2,2 V-lt 2 V-ni, seejärel aga aeglaselt 1,8 V-ni. Edasisel pinge langemisel tuleb tühjendamine katkestada, sest edasine tühjendamine rikub akut.

Laadimisel lastakse akust läbi kõrvalisest toiteallikast saadav vool. Seejuures tuleb aku anood ühendada toiteallika plussklemmiga, katood aga miinusklemmiga.

Laadimisel tõuseb pinge kiiresti 2,2 V-ni ja seejärel aeglaselt 2,3 V-ni. Kui plii taastamisprotsess negatiivsel plaadil lõpeb, algab vesiniku eraldumine, mis tõuseb mullikestena elektrolüüdi pinnale (aku «keeb»). Selleks ajaks tõuseb pinge 2,6—2,7 V-ni ja laadimine tuleb lõpetada.

Laetud akult tühjendamisel saadavat maksimaalset elektrihulka ampertundides (Ah) nimetatakse aku *mahutavuseks*.

Tühjendamisel akust saadud elektrihulga (Q_t) ja temale laadimisel antud elektrihulga (Q_1) suhet nimetatakse mahutavuse tagastuseks:

$$\eta_Q = \frac{Q_t}{Q_1}. \qquad (2\text{-}52)$$

Pliiaku mahutavuse tagastus on 0,9—0,95.

Tühjendamisel akust saadud elektrienergia (W_t) ja laadimisel kulutatud elektrienergia (W_1) suhet nimetatakse energia tagastuseks ehk kasuteguriks:

$$\eta = \frac{W_t}{W_1}. \qquad (2\text{-}53)$$

Pliiaku kasutegur on 0,75—0,8.

Ebaõige ekspluatatsiooni korral väheneb pliiakude mahutavus kiiresti ja nad võivad muutuda isegi täiesti kõlbmatuks. Seepärast nõuavad pliiakud väga head hooldamist.

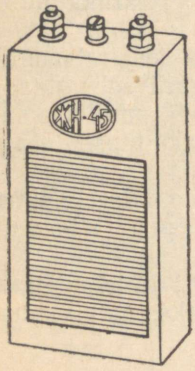
Akupatarei peab olema alati puhas, klemmid tuleb oksüdeerumise vältimiseks katta tehnilise vaseliini õhukese kihiga. Iga 6—10 päeva järel tuleb kontrollida elektrolüüdi taset ja pinget.

Pliiakusid tuleb perioodiliselt laadida. Aku hoidmine laadimata olekus on lubamatu.

Pliiakus esinevaks peamiseks rikkeks on sulfateerumine, mis seisab selles, et peenekristalliline pliisulfaat muutub mittelahustuvateks keemilisteks ühenditeks, mis laadimisel enam ei muutu pliidioksüüdiks (PbO_2) ja urbseks pliiks (Pb).

Akude sulfateerumise peapõhjused:

1) akude ebaõige laadimine;
2) süstemaatiline alalaadimine;
3) aku hoidmine tühjendatud olekus;
4) elektrolüüdi liiga suur erikaal (üle 1,32);
5) elektrolüüdi taseme ülemäärane langemine.



Joon. 2-16 c. Leelisaku.

Kadmiumnikkelaku (joon. 2-16 c). Selle aku elektroodideks on võrelised plaadid, milledes olevad augud on täidetud aktiivmassiga. Positiivsete plaatide aktiivmass koosneb nikkelhüdroksüüdist $Ni(OH)_3$, negatiivsete plaatide aktiivmass aga urbsest kadmiumist Cd.

Elektrolüüdiks on kaaliumhüdroksüüdi KOH 21% vesilahus.

Nii laadimisel kui ka tühjendamisel elektrolüüdi kontsentratsioon ei muutu.

Laadimisel tõuseb pinge 1,6 V-lt kiiresti 1,75 V-ni, siis langeb veidi ja seejärel tõuseb aeglaselt 1,85 V-ni. Tühjendamisel langeb pinge 1,4 V-lt algul kiiresti 1,3 V-ni ja seejärel aeglaselt 1,15 V-ni, millise pinge puhul tuleb tühjendamine katkestada.

Leelisakude sisetakistus on tunduvalt suurem kui happeakudel. Seetõttu on leelisakude kasutegur väiksem, kuid nad pole nii tundlikud lühiste suhtes.

Leelisakud on suurema mehaanilise tugevusega ja kergemad kui happeakud ning vajavad suhteliselt vähest hooldamist.

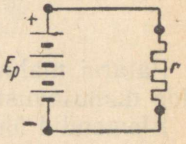
Meie maal hakkas akutööstus arenema alles pärast Suurt Sotsialistlikku Oktoobrirevolutsiooni. Nõukogude teadlaste tööde tulemusena on loodud täiuslikud akutüübid jõu-, transpordi- ja sideseadmete jaoks, samuti ka väikesed akud kantavate valgustusseadmete jaoks. Akusid toodetakse eesrindliku tehnikaga varustatud spetsialiseeritud tehastes, kus detailide töötlemine ja montaaž on mehhaniseeritud ning toimub voolumeetodil.

2-15. Vooluallikate ühendamine

Tänapäeval kasutatavate galvaanielementide võimsus on murdosa vatist ja pinge 1—1,5 V. Akude võimsus on mõnikümmend vatti ja pinge 1,2—2 V. Sageli ületab tarbija võimsus üksikelemendi võimsuse. Sel juhul ühendatakse elemendid koos töötamiseks patareiks. Sõltuvalt tarbija poolt vajatavast

voolust ja pingest ühendatakse elemendid patareiks kas järjestikku, paralleelselt või rühmiti.

Elemendid ühendatakse järjestikku sel juhul, kui tarbija poolt vajatav vool ei ületa elemendi nimitühjendusvoolu, tarbija pinge U aga ületab üksiku elemendi pinge U_0. Sel juhul võetakse järjestikku ühendatavate elementide arv võrdseks suhtega $\frac{U}{U_0}$. Elemendid tuleb ühendada järjestikku selliselt, et nende elektromotoorsed jõud oleksid ühesuunalised. Selleks ühendatakse ühe elemendi negatiivne klemm teise elemendi positiivse klemmiga jne. (joon. 2-17).



Joon. 2-17. Akude järjestikku-ühendus.

Patarei mahutavus on järjestikku-ühenduse korral võrdne patareisse kuuluva kõige väiksemat mahutavust omava elemendi mahutavusega.

Patarei elektromotoorne jõud

$$E = E_1 + E_2 + \ldots .$$

Kui kõigi elementide elektromotoorsed jõud on ühesuuruse väärtusega E_0, siis patarei elektromotoorne jõud

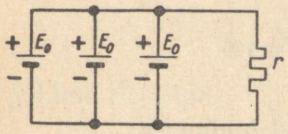
$$E = nE_0. \qquad (2\text{-}54)$$

Patarei sisetakistus

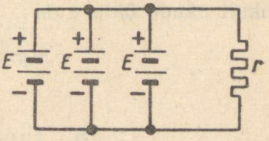
$$r = nr_0,$$

kus r_0 — ühe elemendi sisetakistus.

Elemendid ühendatakse paralleelselt sel juhul, kui tarbija pinge on võrdne üksiku elemendi pingega, kuid vool I ületab tunduvalt elemendi nimivoolu I_n. Sel juhul ei tohi paralleelselt ühendatavate elementide arv olla väiksem suhtest $\frac{I}{I_n}$



Joon. 2-18. Akude paralleelühendus.



Joon. 2-19. Akude segaühendus.

Paralleelühenduse puhul ühendatakse kõigi elementide positiivsed klemmid omavahel ja negatiivsed klemmid omavahel (joon. 2-18).

Paralleelselt võib ühendada ainult ühetüübilisi elemente, s. o. ühesuguse elektromotoorse jõu ja sisetakistusega elemente. Patarei elektromotoorne jõud võrdub sel juhul ühe elemendi elektromotoorse jõuga:

$$E = E_0. \tag{2-55}$$

Patarei sisetakistus

$$r = \frac{r_0}{n}. \tag{2-56}$$

Patarei mahutavus võrdub paralleelselt ühendatud elementide mahutavuste summaga.

Elemendid ühendatakse r ü h m i t i, kui tarbija vool ja pinge on suuremad elemendi pingest ja nimivoolust. Rühmiti-ühendus ehk segaühendus kujutab endast järjestiku-ühenduse ja paralleelühenduse kombinatsiooni.

Näide 2-13. Leida akude arv ja valida nende ühendusviis avariivalgustuse toitmiseks elektrienergiaga, kui ühe aku pinge $U_0 = 2$ V ja nimivool $I_n = 8$ A. Tarbija võimsus on 2,2 kW ja pinge 110 V.

Tarbija vool

$$I = \frac{P}{U} = \frac{2\,200}{110} = 20 \text{ A}.$$

Kuna tarbija pinge ja vool on suuremad ühe elemendi vastavatest suurustest, tuleb elemendid ühendada rühmiti.

Paralleelsete rühmade arv

$$m \geqslant \frac{I}{I_n} = \frac{20}{8} = 2{,}5,$$

valime $m = 3$.

Järjestikku ühendatavate elementide arv igas rühmas

$$n \geqslant \frac{U}{U_0} = \frac{110}{2} = 55.$$

Järelikult akude üldarv on

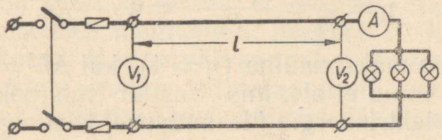
$$mn = 3 \cdot 55 = 165.$$

2-16. Pingekaod juhtmetes

Generaatorite poolt toodetav elektrienergia kantakse üle tarbijaile juhtmete kaudu, mis moodustavad elektriülekandeliini. Lihtsamal juhul toimub elektrienergia ülekanne kahe juhtme abil (kumbki pikkusega l) (joon. 2-20). Elektrienergia ülekandmisel esineb juhtmetes pingelang

$$\Delta U = Ir = I\frac{2l}{\gamma S}, \qquad (2\text{-}57)$$

mistõttu pinge liini alguses (U_1) on kõrgem pingest liini lõpus (U_2). Pingete U_1 ja U_2 vahet, mis võrdub pingelanguga, nimetatakse p i n g e k a o k s.



Joon. 2-20. Vooluahela osa.

Pingekadu peab olema võimalikult väike, võrreldes võrgupingega, selleks et, esiteks, hoida kokku energiat ja, teiseks, vältida suuri pinge kõikumisi tarbijate klemmidel koormuse muutumisel (millel on eriti suur tähtsus elektrilampide juures). Tarbija koormus muutub tavaliselt nullist kuni teatava suurima väärtuseni. Pingekaod muutuvad samuti nullist kuni maksimaalse väärtuseni. Kui pinge liini alguses U_1 on konstantne (muutumatu suurusega), siis pinge liini lõpus kõigub piirides $U'_2 = U_1$ kuni $U''_2 = U_1 - \Delta U$. Seepärast lubatav pingekadu võrdub pinge lubatava kõikumisega tarbija klemmidel. Elektrilampide puhul moodustab lubatav pingekadu 1—2%, elektrimootorite puhul 2—5% võrgupingest.

Väljendame lubatava pingekao protsentides:

$$e = \frac{\Delta U}{U_2} \cdot 100\%. \qquad (2\text{-}58)$$

Asendades võrrandis (2-58) ΔU tema avaldisega valemist (2-57), saame:

$$e = \frac{200Il}{\gamma S U_2},$$

millest juhtme ristlõige

$$S = \frac{200Il}{\gamma U_2 e}. \qquad (2\text{-}59)$$

Saadud valem võimaldab määrata ülekandeliini juhtmete ristlõiget etteantud pingekao järgi.

Pingekao tingimuse järgi valitud juhtme ristlõiget tuleb kontrollida kuumenemise suhtes.

Elektrienergia ülekandmisel muundub osa energiast juhtmetes soojuseks. Võimsuskadu juhtmetes

$$\Delta P = I^2 r = I \Delta U.$$

Elektrivõrgu kasutegur

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta U}{U_1}. \qquad (2\text{-}60)$$

Kasutegur on maksimaalne ($\eta = 1$), kui $\Delta U = 0$, s. t. juhul, kui juhtmetes voolu ei ole, mis vastab tühijooksu režiimile. Tavaliselt on elektrienergia ülekandmisel kasutegur 0,95—0,98, mispuhul pinge tarbija klemmidel erineb toiteallika klemmipingest 2—5%.

Näide 2-14. Valida vaskjuhtmete ristlõige elektrimootori toitmiseks, mis tarbib pingel 110 V voolu 86 A. Mootori kaugus toitepunktist on 60 m ja lubatav pingekadu juhtmetes 5%.

Võttes arvesse, et $\gamma = 57$ m/Ω mm², leiame juhtme ristlõike:

$$S = \frac{200Il}{\gamma U_2 e} = \frac{200 \cdot 86 \cdot 60}{57 \cdot 110 \cdot 5} \approx 33 \text{ mm}^2.$$

Valime lähima suurema standardse ristlõike 35 mm². Kontrollime valitud ristlõiget tabeli 2-2 järgi kuumenemise suhtes. 35 mm² ristlõikega isoleeritud vaskjuhtme maksimaalne lubatud vool on 150 A. Seega meie näite puhul on juhtmes esinev vool (68 A) lubatust väiksem.

2-17. Laboratoorne töö. Pingekadu juhtmetes

Enne töö tegemisele asumist tutvuda raamatu lõpus toodud lisaga ja § 2-16.

Tööplaan

1. Märkida üles mõõteriistade tehnilised põhiandmed.
2. Kasutades vaskjuhtmeid, koostada joonisel 2-20 näidatud skeem ja lasta see juhendajal üle kontrollida.
3. Muutes koormust, märkida üles nelja eri koormuse puhul ampermeetri ja voltmeetrite näidud.
4. Leida pingekadu ($\Delta U'$), lahutades liini algusse lülitatud voltmeetri näidust liini lõppu lülitatud voltmeetri näidu.
5. Leida sama pingekadu ($\Delta U''$), kasutades Ohmi seadust.
6. Arvutada iga koormuse korta võimsuskadu (ΔP) liinis ja ülekande kasutegur (η).
7. Kasutades elektrienergia ülekandmiseks terasjuhtmeid, korrata mõõtmised ja arvutused samas järjestuses.
8. Mõõtmis- ja arvutustulemused kanda tabelisse 2-4.

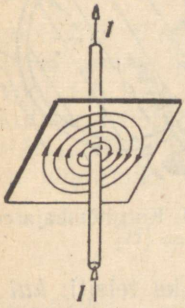
Tabel 2-4

Jrk. nr.	Juhtmematerjal	U_1 V	U_2 V	I A	l m	S mm²	γ m/Ωmm²	$\Delta U'$ V	$\Delta U''$ V	ΔP W	η %

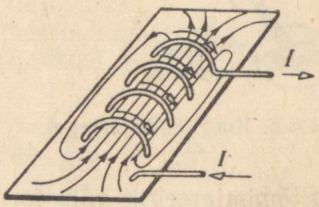
ELEKTROMAGNETISM

3-1. Elektrivoolu magnetväli

Katseliselt on kindlaks tehtud, et elektrijuhti, mida läbib elektrivool, ümbritseb magnetväli. Magnetväli kujutab endast üht mateeria vormi. Magnetväli kannab teatud hulka energiat. Teda iseloomustab omadus katkestamatult jaotuda ruumis ja omadus üle kanda vastastikusi mõjusid väga suure, kuid see-



Joon. 3-1. Sirge voolujuhi magnetväli.



Joon. 3-2. Voolust läbitava pooli magnetväli.

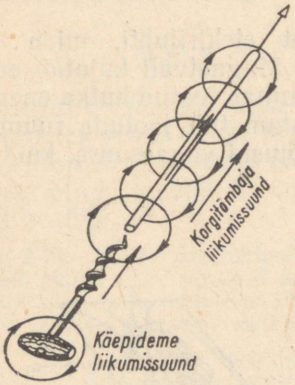
juures kindla kiirusega. Magnetvälja viidud juhile, mida läbib vool, avaldub mehaaniline jõud. Elektrijuhi liikumisel magnetväljas tekib temas elektromotoorne jõud. Magnetvälja viidud magnetnõelale avaldub mehaaniline jõud, mille mõjul ta võtab magnetväljas kindla asendi. Magnetvälja suunaks antud punktis loetakse selles punktis asetseva magnetnõela põhjapooluse suunda.

Magnetvälja suunda kujutatakse graafiliselt magnetvälja jõujoonte abil. Jõujooned tõmmatakse magnetväljas nii, et puutuja siht jõujoone igas punktis ühtiks magnetvälja suunaga. Magnetvälja jõujooned on alati kinnised kõverad.

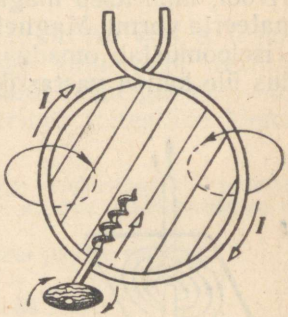
Joonisel 3-1 on kujutatud sirgjoonelise voolust läbitava juhtme magnetvälja jõujooned, joonisel 3-2 aga pooli (solenoidi) magnetvälja jõujooned.

Magnetvälja suund sõltub voolu suunast. Seda sõltuvust väljendatakse korgitõmbajareegliga: *kui korgitõmbaja edasi-*

liikumise suund ühtib voolu suunaga juhtmes, siis magnetvälja jõujoonte suunaks on korgitõmbaja pööramise suund (joon. 3-3).



Joon. 3-3. Korgitõmbajareegel.

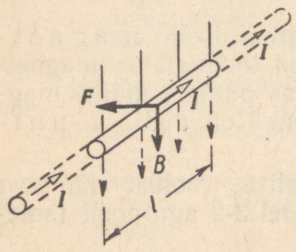


Joon. 3-4. Korgitõmbajareegel.

Korgitõmbajareeglit võib formuleerida ka teisiti: *kui korgitõmbaja pööramise suund ühtib voolu suunaga vooluringis, siis vooluringiga piiratud pinda läbivate magnetvälja jõujoonte suunaks on korgitõmbaja edasiliikumise suund* (joon. 3-4).

3-2. Magnetvälja tihedus

Paigutame magnetvälja risti tema suunaga sirge juhtme (joon. 3-5) pikkusega *l*, mida läbib vool *I*.



Joon. 3-5. Voolust läbitav juhe magnetväljas.

Katseliselt võib veenduda, et juhtmele mõjub elektromagnetiline (mehaaniline) jõud F, mille suurus on võrdeline vooluga ja juhtme pikkusega, suund aga on risti nii magnetvälja jõujoonte suunaga kui ka voolu suunaga. Kuid juhtmele avalduv jõud võib isegi konstantse voolu ja juhtme ühesuguse pikkuse korral olla mitmesugustes magnetväljades või ühe ja sama magnetvälja eri punktides erineva suurusega; see näitab, et avalduva jõu

suurus sõltub ka magnetvälja omadustest (intensiivsusest). Magnetvälja intensiivsust iseloomustavaks suuruseks on magnetvälja tihedus ehk magnetiline induktsioon (tähis B).

Seega on magnetväljas avalduv jõud F võrdeline vooluga I, juhtme pikkusega l ja magnetvälja tihedusega B, s. t.

$$F = IBl, \tag{3-1}$$

millest

$$B = \frac{F}{Il}. \tag{3-2}$$

Magnetvälja tihedus on arvuliselt võrdne magnetväljas juhtmele avalduva jõuga, kui juhtme pikkus on 1 m ja teda läbib vool 1 A.

Praktilises mõõtühikute süsteemis mõõdetakse jõudu njuutonites (N), voolu amprites ja pikkust meetrites. Magnetvälja tiheduse mõõtühik:

$$[B] = \left[\frac{F}{Il}\right] = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{Am}} = \frac{\mathrm{VA\,sec}}{\mathrm{m^2A}} = \frac{\mathrm{V\,sec}}{\mathrm{m^2}}.$$

Peale ühiku $\frac{\mathrm{V\,sec}}{\mathrm{m^2}}$ mõõdetakse magnetvälja tihedust sageli gaussides (tähis G), kusjuures

$$1\,\mathrm{G} = 10^{-4}\,\frac{\mathrm{V\,sec}}{\mathrm{m^2}}$$

ehk

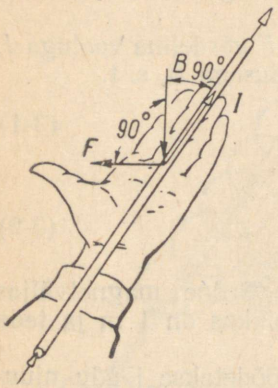
$$1\,\frac{\mathrm{V\,sec}}{\mathrm{m^2}} = 10^4\,\mathrm{G}.$$

Magnetvälja tihedus on vektoriaalne suurus. Väljatiheduse vektor ühtib magnetvälja suunaga antud punktis, s. t. väljatiheduse vektor on antud punktis suunatud mööda magnetvälja jõujoone puutujat.

Jõujoontega võib iseloomustada mitte ainult välja suunda, nagu oli näidatud § 3-1, vaid ka väljatihedust. Selleks tõmmatakse leppeliselt läbi magnetvälja suunaga ristuva pinna iga ruutsentimeetri väljatihedusega võrdeline arv jooni.

Magnetvälja, mille igas punktis väljatiheduse vektorid on ühesuurused ja üksteisega paralleelsed, nimetatakse homogeenseks väljaks. Homogeenne magnetväli esineb näiteks voolust läbitava pika pooli sees (joon. 3-2).

Kui homogeenses magnetväljas paiknevat juhet pöörata nii, et juhtme suuna ja väljatiheduse vektori vaheline nurk α muutub, siis B, I ja l muutumatuks jäädes on juhtmele mõjuv jõud F võrdeline sin α-ga. Kui juhe asetseb jõujoontega paralleelselt, siis on juhtmele mõjuv jõud null.



Joon. 3-6. Elektromagnetilise jõu suuna määramine.

Järelikult üldjuhul

$$F = IBl \sin \alpha. \qquad (3\text{-}3)$$

Juhtmele avalduva jõu suund määratakse tavaliselt vasaku käe reegliga: *kui asetada vasak väljasirutatud sõrmedega käsi nii, et magnetvälja jõujooned suunduvad peopessa ja sõrmed ühtivad voolu suunaga, siis näitab täisnurga all väljasirutatud pöial juhtmele mõjuva jõu suunda* (joon. 3-6).

Näide 3-1. Homogeenses magnetväljas tihedusega 8000 G asetseb 30 cm pikkune juhe, mida läbib vool 600 A. Leida juhtmele mõjuv jõud, kui nurk juhtme ja väljatiheduse vektori vahel on 90°.

Jõud

$$F = IBl = \frac{600 \cdot 8000 \cdot 0{,}3}{10\,000} = 144 \text{ N}.$$

Kuna

$$1 \text{ N} = 0{,}102 \text{ kg},$$

siis

$$144 \text{ N} = 0{,}102 \cdot 144 = 14{,}7 \text{ kg}.$$

Juhtmes kulgev vool kujutab endast laetud elementaarosakeste (vabade elektronide) suunatud liikumist paralleelselt juhtme teljega. Magnetväljas liikuvale laetud osakesele mõjuv jõud

$$F_0 = \frac{F}{N},$$

kus N on vabade elektronide arv juhtmes, mille pikkus on l ja ristlõige S.

Kuna

$$I = \frac{Q}{t} \text{ ja } Q = Nq,$$

kus q on laetud osakese laeng, siis

$$F_0 = \frac{IBl}{N} = Bq\frac{l}{t}.$$

Võttes arvesse, et $\frac{l}{t} = v$ on laetud osakese liikumiskiirus risti välja suunaga, saame:

$$F_0 = Bvq. \qquad (3\text{-}4)$$

3-3. Magnetvoog

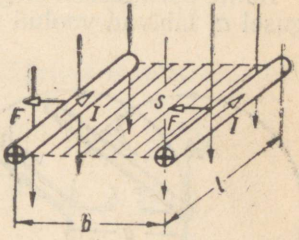
Liikugu voolu I poolt läbitav juhe, mis asetseb risti välja suunaga, jõu F mõjul paralleelselt endaga edasi vahemaa b võrra (joon. 3-7); seejuures sooritatakse mehaaniline töö

$$A = Fb = IBlb = IBS,$$

kus $S = bl$ väljendab juhtme poolt läbitud pinda.

Väljatiheduse B ja väljatiheduse vektoriga risti oleva pinna S korrutist nimetatakse magnetvooks:

$$\Phi = BS. \qquad (3\text{-}5)$$



Joon. 3-7. Pinda S läbiv magnetvoog.

Eespool me leppisime kokku iseloomustada väljatihedust 1 cm² suurust pinda läbivate jõujoonte arvuga. Magnetvoogu saab järelikult iseloomustada kogu antud pinda läbivate joonte arvuga.

Juhtme ümberpaiknemisel sooritatud töö

$$A = IBS = I\Phi, \qquad (3\text{-}6)$$

s. t. kui juhet läbib muutumatu vool, siis juhtme ümberpaiknemisel sooritatud töö avaldub juhtme poolt lõigatud magnetvoo ja voolu korrutisena.

Väljenduse all «lõigatud» magnetvoog tuleb mõista väljatugevuse ja juhtme poolt läbitud pinna korrutist.

Kuna väljatiheduse mõõtühikuks on Vsec/m², pindala ühikuks aga m², siis magnetvoo ühikuks on Vsec:

$$[\Phi] = \frac{\text{V sec}}{\text{m}^2}\,\text{m}^2 = \text{Vsec}.$$

Väiksemaks magnetvoo ühikuks on maksvell (M):

$$1\text{M} = 1\text{G/cm}^2 = 10^{-8}\ \text{Vsec}.$$

Näide 3-2. Leida, kui suure töö teeb 30 cm pikkune juhe, mida läbib vool 100 A, kui ta liigub magnetväljas, mille tihedus on 1,2 Vsec/m². Juhe liigub väljatiheduse vektoriga ristuvas tasapinnas edasi 20 cm.

Juhtme poolt lõigatud magnetvoog

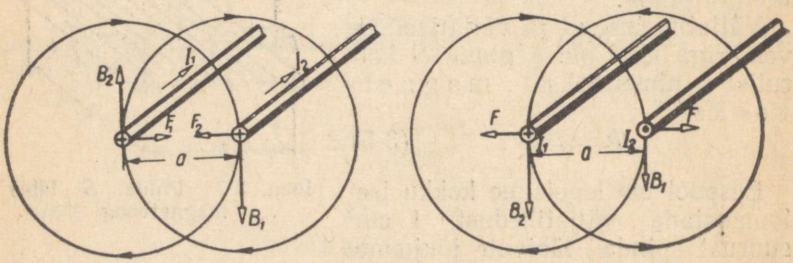
$$\Phi = BS = 1{,}2 \cdot 0{,}20 \cdot 0{,}30 = 7{,}2 \cdot 10^{-2}\ \text{Vsec}.$$

Juhtme liikumisel sooritatud töö

$$A = \Phi I = 7{,}2 \cdot 10^{-2} \cdot 100 = 7{,}2\ \text{J}.$$

3-4. Voolust läbitavate paralleelsete juhtmete vahel avalduv jõud

Kahte paralleelset sirget juhet, mis asetsevad üksteisest kaugusel a, läbivad voolud I_1 ja I_2 (joon. 3-8).



Joon. 3-8. Paralleelsete voolust läbitavate juhtmete vastastikune mõju.

Iga voolust läbitava juhtme ümber tekib magnetväli. Seejuures asetseb voolust I_2 läbitav juhe voolu I_1 magnetväljas ja, vastupidi, voolust I_1 läbitav juhe asetseb voolu I_2 magnetväljas. Seega antud juhul mõjub magnetväli mõlemale juhtmele.

Rakendades vasaku käe reeglit, selgub, et juhul, kui juhtmeid läbivad voolud on ühesuunalised, tõmbuvad juhtmed teineteise poole, ja juhul, kui juhtmeid läbivad voolud on vastassuunalised, tõukuvad juhtmed teineteisest eemale. Katseliselt on kindlaks tehtud, et kummalegi juhtmele mõjuvad jõud on omavahel võrdsed.

Seejuures on selgitatud, et kui juhtmete paralleelse osa pikkus l on tunduvalt suurem nendevahelisest kaugusest a, siis

on jõud F võrdeline mõlemate voolude korrutisega, juhtmete paralleelse osa pikkusega l ja pöördvõrdeline nendevahelise kaugusega (või raadiusega a tõmmatud jõujoone pikkusega) ja sõltub peale selle veel selle keskkonna füüsikalistest omadustest, milles asetsevad voolust läbitavad juhtmed.

Niisiis

$$F = \mu \frac{I_1 I_2}{2\pi a} l, \tag{3-7}$$

kus μ — keskkonna füüsikalisi omadusi iseloomustav tegur, mida nimetatakse magnetiliseks läbitavuseks.

Kui voolud on omavahel võrdsed, s. t.

$$I_1 = I_2 = I,$$

siis juhtmete vahel avalduv jõud

$$F = \mu \frac{I^2}{2\pi a} l.$$

Jõud F võib saavutada eriti suuri väärtusi vooluahelas esineva lühise korral.

Avaldame juhtmele mõjuva jõu valemi (3-1) järgi:

$$F = B_2 I_1 l = B_1 I_2 l$$

ehk

$$\mu \frac{I_1 I_2}{2\pi a} \cdot l = B_2 I_1 l,$$

millest

$$B_2 = \mu \frac{I_2}{2\pi a};$$

analoogiliselt

$$B_1 = \mu \frac{I_1}{2\pi a},$$

s. t. väljatihedus voolust I läbitava sirge juhtme teljest kaugusel a asetsevates punktides

$$B = \mu \frac{I}{2\pi a}. \tag{3-8}$$

Sellest avaldisest selgub, et väljatihedus B ei sõltu juhtme pikkusest (kui juhtme pikkus on mitu korda suurem kaugusest a) ja on kõigis punktides, mis asetsevad juhtme teljest kaugusel a, ühesuurune.

TRÜ Raamatukogu

3-5. Magnetiline läbitavus

Magnetvälja intensiivsus sõltub mitte ainult voolust ja elektrijuhi mõõdetest ning kujust, vaid ka keskkonnast, milles esineb magnetväli.

Selleks et selgitada keskkonna mõju magnetvälja intensiivsusele, tuleb võrrelda väljatihedust antud keskkonnas väljatihedusega tühjas ruumis, tingimusel et kõik teised tingimused jääksid samaks. Sel viisil saab kindlaks teha, et eri keskkondades on väljatihedused erinevad. See asjaolu seletub ruumi täitvate ainete erinevate omadustega. Keskkonna magnetilisi omadusi iseloomustavaks suuruseks on magnetiline läbitavus.

Leiame magnetilise läbitavuse mõõtühiku, kujundades ümber võrrandi (3-8):

$$[\mu] = \left[\frac{B \cdot 2\pi a}{I}\right].$$

Kuna väljatiheduse ühikuks on V sec/m², pikkuse ühikuks m ja voolu ühikuks A, siis

$$[\mu] = \frac{\text{V sec} \cdot \text{m}}{\text{m}^2 \cdot \text{A}} = \frac{\Omega \text{ sec}}{\text{m}}.$$

Nagu allpool selgub, nimetatakse ühikut Ωsec henriks (H); järelikult on magnetilise läbitavuse ühikuks H/m.

Katseliselt on kindlaks tehtud, et õhu ja kõigi mitteferromagnetiliste materjalide (vt. § 3-9) magnetiline läbitavus on praktiliselt võrdne tühja ruumi läbitavusega:

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m}. \qquad (3\text{-}9)$$

Võttes arvesse, et õhu puhul $\mu = \mu_0$, väljendame väljatiheduse õhus kaugusel a voolust läbitava sirge juhtme teljest:

$$B = 4\pi 10^{-7} \frac{I}{2\pi a} = \frac{2I}{a} \cdot 10^{-7}, \qquad (3\text{-}10)$$

kus B — V sec/m²; I — A; l — m.

Näide 3-3. Leida väljatihedus 10 cm kaugusel juhtme teljest, kui juhet läbib vool 600 A.

Väljatihedus

$$B = \frac{2 \cdot 600}{0{,}10} \cdot 10^{-7} = 12 \cdot 10^{-4} \text{ Vsec/m}^2 = 12 \text{ G}.$$

Näide 3-4. Leida kahele paralleelsele 1,5 m pikkusele juhtmele mõjuv jõud, kui nende juhtmete vaheline kaugus on 15 cm ja neid läbib lühisvool 20 000 A.

$$F = \mu \frac{I^2}{2\pi a} l = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{20\,000^2}{2\pi \cdot 0{,}15} \cdot 1{,}5 = 800 \text{ N}.$$

Magnetvälja tugevus. Magnetiline pinge

Magnetvälja arvutamisel kasutatakse abisuurust, mida nimetatakse magnetvälja tugevuseks (tähis H), mis ei sõltu keskkonna magnetilistest omadustest, vaid arvestab voolu suuruse ja juhtmete kuju mõju magnetvälja intensiivsusele antud punktis.

Magnetvälja tiheduse ja tugevuse vahel kehtib seos:

$$B = \mu H, \tag{3-11}$$

millest

$$H = \frac{B}{\mu}.$$

Kui väljatiheduse ühikuks on Vsec/m², magnetilise läbitavuse ühikuks Ωsec/m, siis väljatugevuse ühikuks on A/m:

$$[H] = \frac{\text{V sec}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{m}}{\Omega \text{ sec}} = \frac{\text{A}}{\text{m}}.$$

Mõnikord kasutatakse väljatiheduse ühikuna örstedit (Oe):

$$1 \text{ Oe} = 80 \text{ A/m}.$$

Magnetvälja tugevus on samuti nagu magnetvälja tiheduski vektoriaalne suurus, mille suund ühtib välja suunaga antud punktis.

Analoogiliselt elektrilise pingega nimetatakse väljatugevuse ja jõujoone pikkuse korrutist magnetiliseks pingeks (tähis U_m), mille mõõtühikuks on A. Niisiis

$$U_m = Hl. \tag{3-12}$$

3-7. Magneetimisergutuse seadus

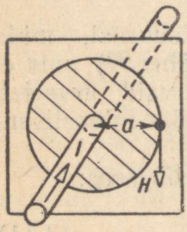
Avaldame väljatugevuse punktis, mis asetseb voolust läbitava sirge juhtme teljest kaugusel a:

$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{I}{2\pi a};$$

sellest võrrandist leiame, et

$$I = H \cdot 2\pi a = U_m, \tag{3-13}$$

sest ringjoone pikkus $2\pi a$ on voolust läbitava sirge juhtme ümber oleva jõujoone pikkus l (joon. 3-9). Valemist (3-13) järeldub, et magnetiline pinge piki suletud jõujoont on võrdne jõujoonega piiratud pinda läbiva vooluga, mida nimetatakse magneetimisergutuseks (tähis F). See seos on magneetimisergutuse seaduse lihtsaimaks kujuks.



Joon. 3-9. Magneetimisergutuse seaduse selgitamiseks.

Üldisemal juhul: *magnetiline pinge piki suletud ringi on võrdne selle ringiga piiratud pinda läbivate voolude algebralise summaga* (magneetimisergutusega), s. o.

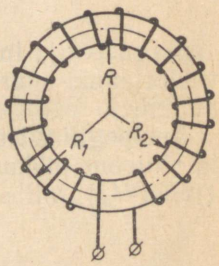
$$\Sigma I = U_m. \tag{3-14}$$

3-8. Voolust läbitava pooli magnetväli

Magneetimisergutuse seaduse põhjal on võimalik määrata üksikjuhtudel sõltuvust voolu ja magnetvälja iseloomustavate suuruste vahel.

Joonisel 3-10 on kujutatud rõngaspool (toroid) keerdude arvuga w, mis on jaotatud ühtlaselt mööda rõngassüdamikku.

Tõmbame raadiusega R ringi, mis ühtib rõngaspooli keskmise jõujoonega ($R_2 < R < R_1$).



Joon. 3-10. Rõngaspool.

Sel juhul jõujoonega piiratud pinda läbiv vool

$$\Sigma I = Iw.$$

Kuna pooli keerud asetsevad südamikul ühtlase sammuga, siis on väljatugevus kõigis keskmisel jõujoonel asetsevates punktides ühesuguse väärtusega. Magnetiline pinge piki suletud ringi

$$U_m = H \cdot 2\pi R = Hl.$$

Seega magneetimisergutuse seaduse põhjal:

$$Iw = Hl.$$

Väljatugevus

$$H = \frac{Iw}{l}. \tag{3-15}$$

Väljatihedus

$$B = \mu H = \mu \frac{Iw}{l}. \tag{3-16}$$

Korrutist Iw nimetatakse samuti magneetimisergutuseks. Võttes väljatiheduse rõngaspooli teljel võrdseks väljatiheduse keskväärtusega, saab määrata pooli magnetvoo:

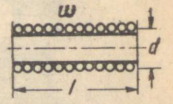
$$\Phi = BS = \mu \frac{IwS}{l} \tag{3-17}$$

ehk

$$\Phi = \frac{Iw}{\frac{l}{\mu S}} = \frac{U_m}{R_m}, \tag{3-18}$$

kus $\frac{l}{\mu S}$ väljendab pooli magnetahela magnetilist takistust. Sõltuvus (3-18) on analoogiline Ohmi seadusega vooluahela kohta, mistõttu seda nimetatakse O h m i s e a d u s e k s m a g n e t a h e l a k o h t a.

Silinderpooli võib käsitada kui osa lõpmatult suure raadiusega rõngaspoolist, kusjuures mähis asetseb ainult südamiku ühel osal, mille pikkus võrdub silinderpooli pikkusega.



Joon. 3-11. Silinderpool.

Väljatugevus sellise pooli telgjoonel on määratav valemiga:

$$H = \frac{Iw}{l},$$

kus Iw — pooli magneetimisergutus;
l — pooli pikkus.

Väljatihedus avaldub nagu rõngaspooli puhulgi valemiga:

$$B = \mu \frac{Iw}{l}.$$

Silinderpooli kohta on need valemid siiski ligikaudsed. Neid võib kasutada väljatugevuse ja -tiheduse määramiseks sellise

pooli sees, mille pikkus on tunduvalt suurem tema läbimõõdust. Määrates nende valemitega väljatugevust ja -tihedust pooli otstel, saame tulemused, mis ligi kaks korda ületavad väljatugevuse ja -tiheduse tegelikke väärtusi.

Näide 3-5. Leida silinderpooli magnetvoog, kui pooli pikkus $l = 30$ cm, läbimõõt $d = 6$ cm, keerdude arv $w = 1040$ ja pooli läbib vool 5 A. Pooli südamik on mittemagnetilisest materjalist ($\mu = \mu_0$).

Magnetvoog

$$\Phi = \mu \frac{IwS}{l} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 5 \cdot 1040\pi \cdot 0{,}0009}{0{,}3} = 6150 \text{ M}.$$

3-9. Ferromagnetiliste kehade magneetimine

Looduses leiduvaid kehi, milledel on omadus magneetuda, nimetatakse ferromagnetilisteks kehadeks. Ferromagnetilisteks kehadeks on: raud, teras, malm, koobalt ja samuti mõned sulamid, näiteks nikli ja alumiiniumi sulam jt. Viies ferromagnetilise keha nõrka magnetvälja, näiteks poolisse, mille mähist läbib vool, kasvab välja intensiivsus kümneid ja sadu kordi.



A. G. Stoletov (1839—1896). Moskva ülikooli professor. Üks suurimaid füüsikuid XIX sajandil. Ta on teinud kapitaalseid uurimistöid magnetismi ja fotoelektriliste nähtuste alal ja valmistanud esimese fotoelemendi maailmas. Tema poolt on loodud materjalide magnetiliste omaduste ja gaasides esinevate lahendusnähete eksperimentaalse uurimise kaasaegne metoodika. Tema poolt teostatud ferromagnetiliste ainete omaduste uurimised on elektrimasinate ja -aparaatide ratsionaalsete arvutusmeetodite aluseks.

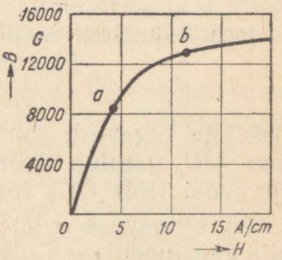
Ferromagnetiliste ainete magnetilised omadused on seletatavad nendes kehades esinevate magneetitud mikroskoopiliste moodustiste olemasoluga, mida võib käsitada kui elementaarmagneteid. Välise magnetvälja mõjul need elementaarmagnetid paigutuvad välja suunas, mis põhjustabki väljatiheduse suurenemise. Järelikult võib ferromagnetilistest kehadest koos-

tatud magnetahelas saada ka väikese magneetimisergutuse korral võrdlemisi suure väljatiheduse.

Ferromagnetilisi kehi kasutatakse laialdaselt elektrimasinate, elektromagnetite ja teiste elektrotehniliste seadmete valmistamisel.

Moskva ülikooli professor A. G. Stoletov uuris juba 1872. a., kuidas muutuvad magnetväljas asuva terase magnetilised omadused väljatugevuse muutumisel. Väljatugevuse muutumine saavutatakse voolu muutmisega magnetvälja tekitavas poolis.

A. G. Stoletov sai katselisel teel kõvera, mis väljendab terassüdamikuga pooli magnetvälja tiheduse sõltuvust väljatugevusest, s. o. $B = f(H)$. Seda sõltuvust väljendavat graafikut on hakatud nimetama esmakordse magneetimise kõveraks. A. G. Stoletovi töödel on määratu suur praktiline tähtsus elektrimasinate ja -aparaatide magnetahelate arvutamisel.



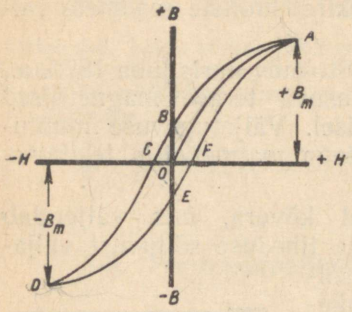
Joon. 3-12. Terase esmakordse magneetimise kõver.

Joonisel 3-12 on kujutatud terase esmakordse magneetimise kõver. Selle kõvera võib jaotada kolme ossa: sirgjooneline osa *Oa*, mille ulatuses väljatihedus kasvab peaaegu võrdeliselt väljatugevusega; osa *ab*, mille ulatuses väljatiheduse kasv aeglustub ja mida sageli nimetatakse magneetimiskõvera põlvikuks; punktist *b* edasi järgneb magnetilise küllastumise osa, kus väljatihedus kasvab jälle võrdeliselt väljatugevusega, kuid see kasv on hoopis väike, võrreldes esimese ja teise osaga. See esmakordse magneetimise kõvera viimane osa vastab terassüdamiku magnetilisele küllastumisele, s. t. niisugusele seisundile, mispuhul kõik elementaarmagnetid on juba orienteeritud välise magnetvälja suunas.

3-10. Magnetiline hüsterees

Suur praktiline tähtsus, eriti vahelduvvooluseadmetes, on ferromagnetiliste kehade ümbermagneetimise protsessil. Oletame, et ferromagnetilisest materjalist südamikuga pooli läbib suuruselt ja suunalt muutuv vool. Tugevdades voolu, viime väljatiheduse südamikus väärtuseni $+B_m$ (joon. 3-13). See-

järel, nõrgendades voolu, vähendame väljatugevust; seejuures väheneb ka väljatihedus, kuid ühtede ja samade väljatugevuse väärtuste puhul on väljatihedus nüüd veidi suurem kui väljatugevuse suurendamisel (kõvera osa *AB*). Väljatugevuse muutmisel nulliks saame väljatiheduse väärtuse, mida nimetatakse jääkväljatiheduseks ehk remanentsiks (lõik *OB*).



Joon. 3-13. Hüstereesisilmus.

Nähtust, et väljatiheduse muutumine jääb maha (hilineb) välise magnetvälja tugevuse vastavatest muutustest, nimetatakse magnetiliseks hüstereesiks.

Muutes magneetimisvoolu suunda poolis, muudame ka magnetvälja tugevuse suunda. Vähendades väljatugevust väärtuseni *OC*, muutub väljatihedus nulliks, sellele vastavat väljatugevust (lõik *OC*) nimetatakse koertsitiivjõuks.

Väljatugevuse edasise vähendamisega võib väljatiheduse viia väärtuseni $-B_n$. Kui nüüd suurendada väljatugevust nullini, saame jääkväljatihedusega võrdse, kuid vastassuunalise väljatiheduse (lõik *OE*). Muutes lõpuks veel kord väljatugevuse suunda, võib väljatugevuse suurendamisel uuesti saada väljatiheduse positiivse maksimaalväärtuse $+B_m$.

Samade kõverate järgi muutub väljatihedus ferromagnetilises südamikus ka pooli läbiva vahelduvvoolu ühe muutumise tsükli puhul.

Seega ferromagnetilise keha tsüklilise ümbermagneetimise puhul väljendub sõltuvus $B = f(H)$ graafiliselt kinnise kõveraga *ABCDEFA*, mida nimetatakse hüstereesisilmuseks.

Ferromagnetilised materjalid jaotatakse kahte rühma: magnetiliselt pehmeteks ja magnetiliselt jäikadeks materjalideks. Magnetiliselt pehmete materjalide hüstereesisilmuse tõusev haru (*DCDA*) ja langev haru (*AFED*) peaaegu ühtivad, magnetiliselt jäikade materjalide puhul aga lähevad järsult laiali.

Terase ümbermagneetimine on seotud energiakuluga, mis soojuseks muundudes terast soojendab. On tõestatud, et hüstereesisilmuse pindala on võrdeline ühe ümbermagneetimise tsükli puhul kulutatava energiaga.

Ümbermagneetimisest tingitud energiakadusid nimetatakse *hüstereesikadudeks*.

Elektrimasinate ja transformaatorite valmistamiseks kasutatakse magnetiliselt pehmeid materjale, nimelt *elektrotehnilisi teraseid*.

3-11. Magnetahel

Kehade kompleksi, mida mööda kulgeb (sulgub) magnetvoog, nimetatakse *magnetahelaks*. Magnetahela osad (lülid) võivad olla ühest ja samast või erinevast materjalist, nad võivad olla eri pikkusega ja mitmesuguse ristlõikega.

Analoogiliselt vooluahelatega on ka magnetahelad kas hargnevad või mittehargnevad. Mittehargnevas magnetahelas on magnetvoog ahela kõigis osades ühesuurune.

Et tekitada antud magneetimisergutusega suuremat magnetvoogu, valmistatakse magnetahel võimalikult väikese magnetilise takistusega materjalist. Kõige väiksema magnetilise takistusega on ferromagnetilised materjalid, milledel on suhteliselt suur magnetiline läbitavus; seepärast teostatakse kõigis elektrimasinates ja -aparaatides magnetahelad selliselt, et magnetvoog kulgeks peamiselt terases, kõik õhupilud aga tehakse võimalikult väikesed.

Elektrotehnikas tuleb sageli antud magnetahela puhul leida magneetimisergutus F, mis on vajalik magnetvoo Φ tekitamiseks.

Selleks jaotatakse magnetahel ühesugusest materjalist ja ühesuguse ristlõikega lülideks (pikkusega l_1, l_2 jne.). Iga lüli pikkuseks loetakse keskmise jõujoone pikkus. Seejärel arvutatakse iga lüli kohta tulev magnetiline pinge. Ahela kõigi lülide magnetiliste pingete summa võrdub otsitava magneetimisergutusega.

Magnetiline pinge ferromagnetilisest materjalist lülis (näiteks esimeses lülis)

$$U_{m1} = H_1 l_1,$$

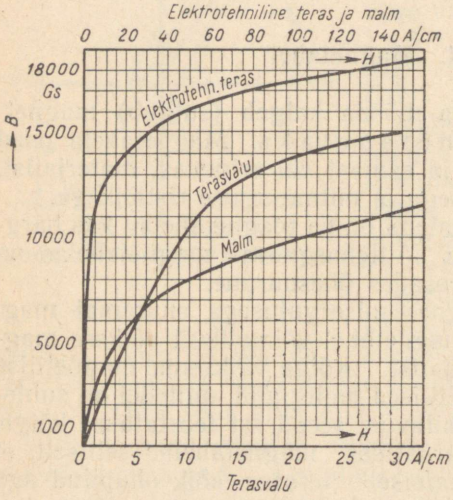
kus l_1 on määratav magnetahela jooniselt, H_1 aga magneetimiskõveralt (joon. 3-14), kusjuures eelnevalt leitakse vajalikule magnetvoole Φ vastav väljatihedus:

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1}.$$

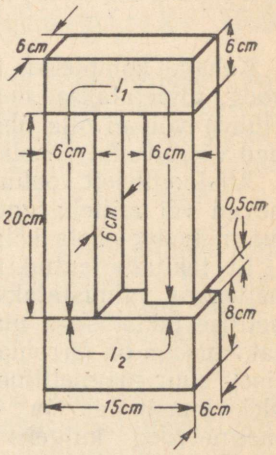
Väljatugevus mitte-ferromagnetilises kehas, näiteks õhus,

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} = 0{,}8\, B_0, \qquad (3\text{-}19)$$

kus H_0 — A/cm; B_0 — G.



Joon. 3-14. Mõnede ferromagnetiliste ainete magneetimiskõverad.



Joon. 3-15. Magnetahel (näite 3-6 juurde).

Näide 3-6. Leida südamikul (joon. 3-15) paikneva mähise keerdude arv, kui 5 A voolu korral on vaja tekitada magnetvoog 432 000 M.

Südamiku ülemine osa (kaasa arvatud mõlemad vertikaalsed vardad) on valmistatud elektrotehnilisest terasest, alumine osa (ike) aga terasvalust.

Nagu jooniselt nähtub, on otstarbekas jaotada magnetahel kolmeks lüliks: esimene lüli elektrotehnilisest terasest, pikkusega 54,5 cm ja ristlõikega 36 cm²; teine osa terasvalust, pikkusega 17 cm ja ristlõikega 48 cm²; kolmas lüli õhust, pikkusega 0,5 cm ja ristlõikega 36 cm².

Väljatihedus esimeses lülis

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1} = \frac{432\,000}{36} = 12\,000 \text{ G}.$$

Elektrotehnilise terase magneetimiskõvera järgi leiame, et väljatihedusele 12 000 G vastab väljatugevus 7 A/cm.

Esimese lüli magnetiline pinge

$$U_{m_1} = H_1 l_1 = 7 \cdot 54{,}5 = 381 \text{ A}.$$

Analoogiliselt leiame teise lüli magnetilise pinge:

$$B_2 = \frac{\Phi}{S_2} = \frac{432\,000}{48} = 9000 \text{ G}; \quad H_2 = 8 \text{ A/cm};$$

$$U_{m_2} = 8 \cdot 17 = 136 \text{ A}.$$

Õhupilu magnetiline pinge:

$$B_0 = \frac{\Phi}{S_0} = \frac{432\,000}{36} = 12\,000 \text{ G}; \quad H_0 = 0{,}8\, B_0 = 9600 \text{ A/cm};$$

$$U_{m_0} = H_0 l_0 = 9600 \cdot 0{,}5 = 4800 \text{ A}.$$

Magneetimisergutus

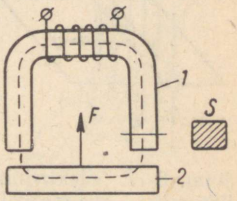
$$F = U_{m_1} + U_{m_2} + U_{m_0} = 381 + 136 + 4800 = 5317 \text{ A}.$$

Mähise vajalik keerdude arv

$$w = \frac{F}{I} = \frac{5317}{5} = 1063.$$

3-12. Elektromagnetid

Kui voolust läbitava pooli lähedal asetseb terassüdamik, siis see magneetub. Seejuures tekivad elektromagnetilised jõud, mille mõjul südamik püüab asetuda pooli keskele. Mõnikord paigutatakse terassüdamik *1* liikumatult pooli sisse (joon. 3-16), südamiku külge aga tõmbub terasankur *2*. Sellist seadist nimetatakse elektromagnetiks.



Joon. 3-16. Elektromagneti ehitus.

Elektromagnetid leiavad kasutamist paljudes tehnikaharudes. Neid kasutatakse näiteks mitmesugustes automaatseadmetes ja releedes, töödeldava terasdetaili kinnitamiseks metallitöötlemispingile, pidurseadmetes transpordis, terasdetailide tõstmiseks ja transportimiseks ettenähtud kraanades jne.

Kui elektromagneti pooli läbib vool, tekib magnetvoog, mis sulgub läbi elektromagneti südamiku ja ankru. On kindlaks tehtud, et jõud F, millega ankur tõmbub südamiku poole, on võrdeline südamiku pooluste ristlõikega ja õhupilus esineva väljatiheduse ruuduga:

$$F = \left(\frac{B}{5000}\right)^2 S, \qquad (3\text{-}20)$$

kus F — jõud kg;

B — väljatihedus G;
S — pooluste ristlõige cm².

Elektromagneti poolt ankrule avalduvat jõudu F võib reguleerida voolu muutmisega elektromagneti mähises, sest südamik valmistatakse pehmest terasest, millel on tähtsusetu jääkväljatihedus ja väike koertsitiivjõud.

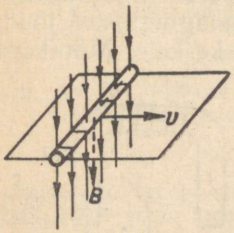
Näide 3-7. Leida elektromagneti tõstejõud, kui väljatihedus $B = 10\,000$ G ja pooluste ristlõige on 1200 cm².

Tõstejõud

$$F = \left(\frac{B}{5000}\right)^2 S = \left(\frac{10\,000}{5000}\right)^2 1200 = 4800 \text{ kg}.$$

3-13. Elektromagnetiline induktsioon

Igasuguses juhtmes, mis magnetväljas liikudes lõikab välja jõujooni, tekib elektromotoorne jõud. Seda füüsikalist nähtust nimetatakse elektromagnetiliseks induktsiooniks.



Joon. 3-17. Elektrijuhi liikumine magnetväljas.

Käsitleme elektromagnetilise induktsiooni elektromotoorse jõu tekkimist sirges juhtmes, mis liigub konstantse kiirusega homogeenses magnetväljas risti väljatiheduse vektori suunaga (joon. 3-17).

Kui juhe liigub magnetväljas kiirusega v, siis liiguvad juhtme laetud osakesed (elektronid ja positiivsed ioonid) välja suhtes sama suure keskmise kiirusega. Nagu eespool (vt. § 3-2) selgus, avalduvad magnetväljas liikuvatele laetud osakestele elektromagnetilised jõud. Nende jõudude suund määratakse vasaku käe reegliga. Elektromagnetiliste jõudude mõjul liiguvad elektronid juhtme ühte otsa, moodustades seal negatiivse laengu. Juhtme teises otsas kujuneb elektronide puudujäägi tõttu positiivne laeng. Juhtme liikumisel konstantse kiirusega toimub laengute eraldumine seni, kuni laengute eraldumise tõttu tekkinud elektrivälja jõud ja elektromagnetilised jõud tasakaalustuvad.

Potentsiaalide vahe magnetväljas liikuva juhtme otste vahel on võrdne elektromagnetilise induktsiooni tulemusel saadud ehk indutseeritud elektromotoorse jõuga.

Seega

$$E = \mathcal{E}l.$$

kus $\mathcal{E}$ — elektrivälja tugevus juhtmetes;
l — juhtme pikkus.

Kuna

$$\mathcal{E} = \frac{F}{q} \text{ ja } F = Bvq$$

(vt. 3-4), siis

$$E = Bvl, \qquad (3\text{-}21)$$

s. t. *sirges juhtmes indutseeritud elektromotoorne jõud võrdub magnetvälja tiheduse, juhtme pikkuse ja tema liikumiskiiruse korrutisega, kui juhtme liikumissuund on risti magnetvälja jõujoonte suunaga.*

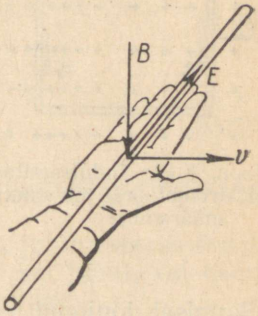
Juhtme liikumisel tasapinnas, mis moodustab väljatiheduse vektoriga nurga α, saab tema liikumiskiiruse jaotada kaheks komponendiks: nimelt pikikomponendiks (paralleelne jõujoontega) $v_p = v \cos \alpha$ ja ristkomponendiks (risti jõujoontega) $v_r = v \sin \alpha$.

Liikumine piki välja ei põhjusta elektrilaengule mõjuvaid jõude (vt. valem 3-3). Seepärast tuleb indutseeritud elektromotoorse jõu määramisel arvestada ainult kiiruse ristkomponenti.

Järelikult

$$E = Blv_r = Blv \sin \alpha. \qquad (3\text{-}22)$$

Indutseeritud elektromotoorse jõu suund elektrijuhis määratakse parema käe reegliga: *kui asetada väljasirutatud sõrmedega parem käsi nii, et magnetvälja jõujooned suunduvad peopessa ja täisnurga all väljasirutatud pöial näitab juhtme liikumissuunda, siis näitavad sõrmed indutseeritud elektromotoorse jõu suunda* (joon. 3-18).



Joon. 3-18. Elektromotoorne jõud magnetväljas liikuvas juhis.

Liikugu sirge juhe magnetväljas aja Δt jooksul piki välja edasi teepikkuse Δb võrra. Juhtme liikumiskiirus

$$v = \frac{\Delta b}{\Delta t}.$$

Juhtmes indutseeritud elektromotoorne jõud

$$E = Bl\frac{\Delta b}{\Delta t}.$$

Juhtme pikkuse ja teepikkuse korrutis ($l \cdot \Delta b$) väljendab juhtme liikumisel magnetväljas läbitud pindala.

Pindala ja väljatiheduse korrutis võrdub magnetvooga ($\Delta\Phi$), mida lõikab juhe tema liikumisel magnetväljas.

Niisiis

$$\Delta\Phi = Bl\Delta b.$$

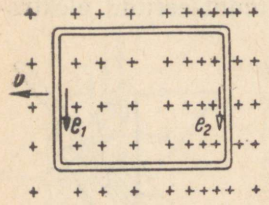
Järelikult juhtmes indutseeritud elektromotoorne jõud

$$E = \frac{Bl\Delta b}{\Delta t} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, \qquad (3\text{-}23)$$

s. t. *indutseeritud elektromotoorne jõud võrdub kiirusega, millega juhe lõikab magnetvälja jõujooni.*

3-14. Elektromotoorne jõud juhtmekeerus

§ 3-13 nägime, kuidas indutseeritakse elektromotoorne jõud juhtmes, mis liikudes lõikab magnetvoogu.



Joon. 3-19. Indutseeritud elektromotoorse jõu suuna määramine.

Tegelikes tingimusis on sageli vaja määrata elektromotoorse jõu suurus ja suund mitte üksikus sirges juhtmes, vaid kinnises ahelas, näiteks juhtmekeerus või poolis.

Joonisel 3-19 on näidatud täisnurkne juhtmekeerd, mis paikneb mittehomogeenses magnetväljas. Magnetvälja jõujoonte suunaks keeruga piiratud pinnas on suund vaatleja poolt joonise lehekülje tasapinna taha. Juhtmekeerd liigub kiiruse vektori v suunas. Kuna keeru alumine ja ülemine külg ei lõika liikumisel jõujooni, siis seetõttu keeru neis osades elektromotoorset jõudu ei indutseerita. Juhtmekeeru neis külgedes aga, mis on risti keeru liikumissuunaga, indutseeritakse elektromotoorsed jõud e_1 ja e_2, millede suunad määratakse parema käe reegli järgi. Kummagi indutseeritud elektromotoorse jõu suurus leitakse valemiga (3-23):

$$e_1 = \frac{\Delta\Phi_1}{\Delta t} \text{ ja } e_2 = \frac{\Delta\Phi_2}{\Delta t},$$

kus $\Delta\Phi_1$ ja $\Delta\Phi_2$ on magnetvood, mida lõikavad keeru vastavad küljed selle liikumisel aja Δt vältel. Seejuures lõikab juhtmekeeru parempoolne külg voogu $\Delta\Phi_2$, mis jääb keeru piiridest

välja, vasakpoolne külg aga lõikab voogu $\Delta\Phi_1$, mis jääb keeru sisse.

Elektromotoorsed jõud e_1 ja e_2 on teineteise suhtes vastassuunalised. Korgitõmbajareegli põhjal ühtib elektromotoorse jõu positiivne suund kinnises ahelas kellaosuti liikumise suunaga, s. t. elektromotoorse jõu e_2 suunaga, seetõttu

$$e = e_2 - e_1 = \frac{\Delta\Phi_2 - \Delta\Phi_1}{\Delta t}.$$

Tähistame magnetvoo, mis läbis juhtmekeeruga piiratud pinda algasendis, tähisega Φ_1 ja lõppasendis — Φ_2. On ilmne, et

$$\Phi_2 = \Phi_1 + \Delta\Phi_1 - \Delta\Phi_2.$$

Voogude Φ_2 ja Φ_1 vahe väljendab voo juurdekasvu ($\Delta\Phi$) keeruga piiratud pinnas, s. t.

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = \Delta\Phi_1 - \Delta\Phi_2.$$

Järelikult

$$\Delta\Phi_2 - \Delta\Phi_1 = -\Delta\Phi$$

ja keerus indutseeritud elektromotoorne jõud

$$e = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \qquad (3\text{-}24)$$

Üldjuhul

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}, \qquad (3\text{-}25)$$

kus $d\Phi$ — lõpmatult väike magnetvoo juurdekasv ringis lõpmatult väikese aja dt jooksul.

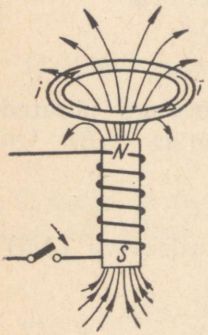
Avaldised (3-24) ja (3-25) näitavad, et juhtmekeerus indutseeritakse elektromotoorne jõud ainult sel juhul, kui keeru poolt piiratud pinda läbiv magnetvoog muutub.

Kui magnetvoo juurdekasv keeru liikumisel on positiivne ($d\Phi > 0$), siis on elektromotoorne jõud negatiivne, s. t. elektromotoorse jõu suund on vastupidine korgitõmbaja pööramissuunaga, mille kulgev liikumine ühtib keeruga piiratud pinda läbivate jõujoonte suunaga. Magnetvoo negatiivse juurdekasvu korral on elektromotoorse jõu suund keerus positiivne.

Ülalöeldut üldistades võib teha järelduse: *induktsiooni tagajärjel tekkivad elektriväljad, voolud ja mehaanilised jõud on sellise suunaga, et takistavad (mõjuvad vastu) induktsiooni esilekutsuvat toimingut.*

Selle nähtuse avastas 1833. aastal vene akadeemik E. H. Lenz (lk. 25) ja seda nimetatakse Lenzi juhiseks.

Joonisel 3-20 on kujutatud terassüdamikuga pool, mille kohal paikneb voolu juhtiv rõngas. Pooli lüliti sisselülitamisel suureneb rõngaga ahelduv magnetvoog nullist kuni teatud väärtuseni Φ ja rõngas indutseeritakse magnetvoo kogu muutumise vältel elektromotoorne jõud, mille tagajärjel rõngas tekib vool. Vastavalt Lenzi seadusele on rõngas kulgeva voolu poolt põhjustatud magnetvoo suund vastupidine pooli voole. Korgitõmbajareegli abil on kerge leida voolu suunda rõngas.



Joon. 3-20. Rõngas indutseeritud vool.

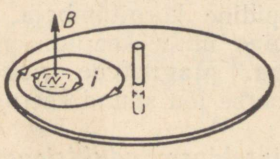
Kui rõnga asemel asetseb pooli kohal metallketas, siis tekivad kettas voolud samuti kui rõngaski. Joonisel 3-21 on näidatud selline ketas, kusjuures punktiiriga on näidatud ketta all asetseva elektromagneti põhjapooluse jälg kettal; elektromagnetit ennast ei ole joonisel näidatud.

Kui pool, kus indutseeritakse elektromotoorne jõud, koosneb w keerust, siis poolis indutseeritud elektromotoorne jõud on w korda suurem kui ühes keerus, s. o.

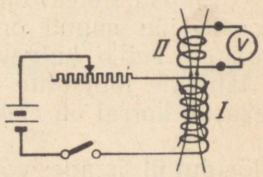
$$e = -w\frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}.$$

Keerdude arvu ja nende keerdudega ahelduva magnetvoo korrutist nimetatakse aheldusvooks Ψ. Siis elektromotoorne jõud

$$e = -\frac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}t}. \qquad (3\text{-}26)$$



Joon. 3-21. Kettas indutseeritud vool.



Joon. 3-22. Kahe mähise vastastikune paigutus (näite 3-8 juurde).

Valemist (3-26) järeldub, et poolis indutseeritud elektromotoorne jõud võrdub aheldusvoo muutumise kiirusega.

Elektromagnetilise induktsiooni nähtust rakendatakse elektrotehnikas laialdaselt. Peaaegu kõik elektrienergia generaatorid ja kõik elektrimootorid töötavad elektromagnetilise induktsiooni põhimõttel.

Näide 3-8. Vool esimeses poolis (joon. 3-22) muutub nii, et teise pooliga ahelduv magnetvoog väheneb $4 \cdot 10^{-2}$ Vsec võrra 0,1 sekundi vältel. Leida teises poolis indutseeritud elektromotoorne jõud, kui sellel poolil on 500 keerdu.

Indutseeritud elektromotoorne jõud

$$E_2 = \frac{w\Delta\psi}{\Delta t} = \frac{500 \cdot 4 \cdot 10^{-2}}{0{,}1} = 200 \text{ V}.$$

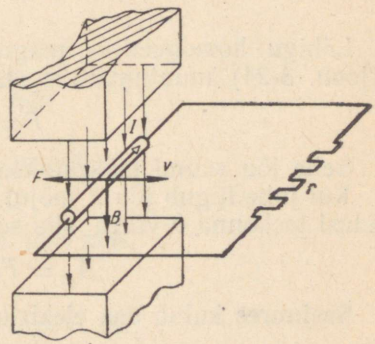
3-15. Mehaanilise energia muundamine elektrienergiaks

Risti magnetvälja suunaga liigub kiirusega v sirge juhe, mille otstele on ühendatud välistakistus r. Juhtmes indutseeritakse elektromotoorne jõud, kinnises vooluahelas aga tekib vool I (joon. 3-23). Voolust läbitavale juhtmele mõjuv jõud

$$F = BlI.$$

Määrates jõu F suuna vasaku käe reegli põhjal, veendume, et juhtmele mõjuv jõud on pidurdavaks jõuks, mis on kiiruse v vektoriga vastassuunaline.

Järelikult tuleb juhtme ümberpaigutamiseks rakendada välist jõudu, mis on võrdne ja vastassuunaline pidurdava jõu suunaga, s. t. on vaja primaarjõumasinat, mis arendaks mehaanilist võimsust



Joon. 3-23. Vool magnetväljas liikuvas juhis.

$$N = Fv.$$

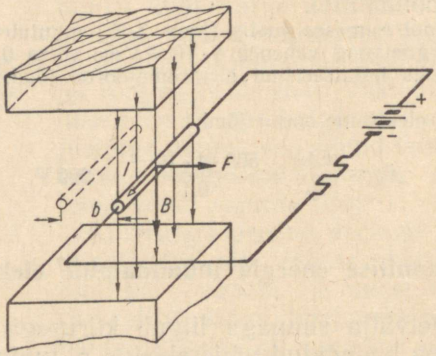
Asendades selles valemis jõu F tema avaldisega, saame:

$$N = IBlv = IE,$$

s. t. primaarjõumasina poolt arendatav mehaaniline võimsus võrdub elektrilise võimsusega kinnises vooluahelas.

3-16. Elektrienergia muundamine mehaaniliseks energiaks

Voolust läbitava juhtme liikumisel magnetväljas elektromagnetilise jõu mõjul toimub elektrienergia muundumine mehaaniliseks energiaks.



Joon. 3-24. Juhi liikumine magnetväljas.

Läbigu homogeenses magnetväljas asetsevat sirget juhet (joon. 3-24) muutumatu vool. Juhtmele mõjuv jõud

$$F = BIl.$$

Selle jõu suund määratakse vasaku käe reegli põhjal.

Kui juhe liigub jõu F mõjul jõujoontega ristuvas tasapinnas edasi teekonna b võrra, siis sooritatakse mehaaniline töö

$$A_m = Fb = BIlb.$$

Seejuures kulub osa elektrienergiat juhtme soojendamiseks:

$$A_s = I^2rt,$$

kus r — juhtme takistus;
t — juhtme liikumise aeg.

Juhtme liikumise ajal kulutatav kogu energia

$$A = BIlb + I^2rt.$$

Jagades selle võrrandi mõlemad pooled korrutisega It, saame:

$$U = Bl\frac{b}{t} + Ir = E + Ir, \qquad (3\text{-}27)$$

kus U — toiteallika pinge.

Viimasest avaldisest järeldub, et

$$Ir = U - E \quad \text{ja} \quad I = \frac{U-E}{r}. \tag{3-28}$$

Nendes valemites on E magnetväljas liikuvas juhtmes indutseeritud elektromotoorne jõud. Kuna see elektromotoorne jõud on vooluga vastassuunaline, siis nimetatakse seda, nagu juba eespool öeldud, vastuelektromotoorseks jõuks.

Niisiis magnetvälja mõjul muundub elektrienergia mehaaniliseks energiaks, kusjuures muundumisprotsess on seotud vastuelektromotoorse indutseerimisega. Kirjeldatud protsess on elektrimootorite töötamise aluseks.

Näide 3-9. 0,4 m pikkune sirge juhe liigub risti magnetvälja jõujoonte suunaga kiirusega 1000 cm/sec. Väljatihedus on 12 000 G.

Juhtme klemmidele rakendatud pinge on 5 V, juhtme takistus aga 0,02 Ω. Leida 1) ahela võimsus; 2) juhtme poolt arendatav mehaaniline võimsus, 3) soojuslik võimsus.

Juhtmes tema liikumisel indutseeritav vastuelektromotoorne jõud

$$E = Blv = 12\,000 \cdot 40 \cdot 1000 \cdot 10^{-8} = 4{,}8 \text{ V}.$$

Vool juhtmes

$$I = \frac{U-E}{r} = \frac{5-4{,}8}{0{,}02} = 10 \text{ A}.$$

Ahela võimsus

$$P = UI = 5 \cdot 10 = 50 \text{ W}.$$

Mehaaniline võimsus

$$P_m = EI = 4{,}8 \cdot 10 = 48 \text{ W}.$$

Soojuslik võimsus

$$P_s = I^2 r = 10^2 \cdot 0{,}02 = 2 \text{ W}.$$

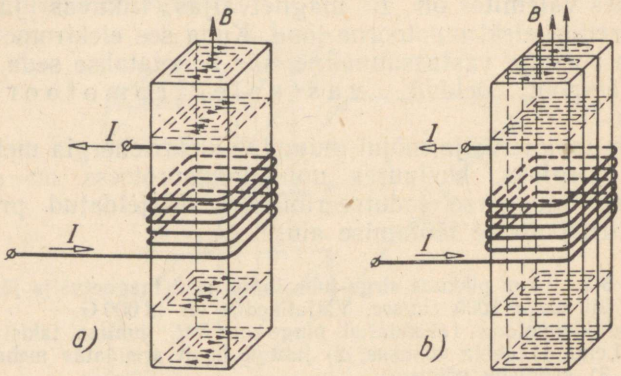
3-17. Pöörisvoolud

Indutseeritud voolude erijuhuks on pöörisvoolud, mis tekivad vahelduva magnetvoo mõjul massiivsetes terassüdamikkudes, kestades ja elektriseadmete teistes metallosades.

Kui näiteks pooli keerde läbib vahelduvvool (joon. 3-25, *a*), siis indutseeritakse pooli terassüdamikus pöörisvoolud tasapinnas, mis on risti väljatiheduse vektoriga. Need voolud, esiteks, soojendavad terast, alandades elektriseadmete kasutegurit ja, teiseks, toimivad vastavalt Lenzi seadusele lahtimagneetivalt. Pöörisvoolude vähendamiseks kasutatakse üksteisest

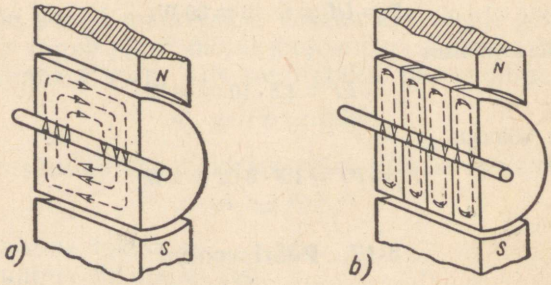
isoleeritud teraslehtedest valmistatud südamikke (joon. 3-25, *b*).

Pöörisvoolud tekivad samuti magnetväljas pöörlevas elektri-



Joon. 3-25. Pöörisvoolud terassüdamikus.

masina ankrus. Joonisel 3-26, *a* on näidatud ühest tükist valmistatud ankru lõige. Sellise ankru pöörlemisel magnetväljas tekivad temas pöörisvoolud, mis on näidatud punktiirjoontega.



Joon. 3-26. Pöörisvoolud terasankrus.

Kasutades teraslehtedest koostatud ankrut (joon. 3-26, *b*), võib neid voole tunduval määral vähendada.

Elektrimasinates ja -aparaatides on pöörisvoolud negatiivseks nähtuseks, kuid paljudel juhtudel, näiteks elektrimõõteriistades, võib neid rakendada mõõteriista mehhanismide käitamiseks või selle liikuvate osade pidurdamiseks.

3-18. Induktiivsus. Endainduktsiooni elektromotoorne jõud

Iga elektrijuhiga, milles kulgeb elektrivool, aheldub magnetvoog, mis on võrdeline seda elektrijuhti läbiva vooluga (kui keskkonna magnetiline läbitavus on muutumatu). Seda magnetvoogu nimetatakse endainduktsiooni magnetvooks (tähis Φ_L).

Voolust läbitava pooli korral on selle iga keerd aheldatud pooli endainduktsiooni magnetvooga. Pooli keerdude arvu ja pooliga aheldatud magnetvoo korrutist nimetatakse endainduktsiooni aheldusvooks (tähis Ψ_L). Suurust, mis võrdub selle aheldusvoo ja voolu suhtega, nimetatakse pooli induktiivsuseks (tähis L), s. t.

$$L = \frac{\Psi_L}{I}. \tag{3-29}$$

Induktiivsus on antud pooli puhul konstantne suurus ja iseloomustab elektromotoorse jõu indutseerimist põhjustavaid omadusi (pooli kuju, keerdude arvu ja keskkonda).

Induktiivsuse mõõtühik

$$[L] = \frac{\text{V sec}}{\text{A}} = \Omega\text{sec}.$$

Oom-sekundit nimetatakse henriks (H).

Vaatleme, kuidas leitakse rõngaspooli induktiivsus. Pooli endainduktsiooni magnetvoo võib küllaldase täpsusega määrata valemiga:

$$\Phi_L = BS = \mu \frac{Iw}{l} S;$$

siis aheldusvoog

$$\Psi_L = w\Phi_L = \mu \frac{Iw^2S}{l}.$$

Pooli induktiivsus

$$L = \frac{\Psi_L}{I} = \mu \frac{w^2S}{l}. \tag{3-30}$$

Voolu muutmine poolis, näiteks ahela sisse- ja väljalülitamisel või koormuse muutmisel, kutsub esile aheldusvoo muutumise. Magnetvoo muutumine aga põhjustab elektromotoorse jõu indutseerimise. Nähtust, mille puhul voolu muutmine poolis tekitab elektromotoorse jõu, nimetatakse endainduktsiooniks, indutseeritud elektromotoorset jõudu aga endainduktsiooni elektromotoorseks jõuks.

Endainduktsiooni elektromotoorne jõud

$$e_L = -\frac{d\Psi_L}{dt}$$

ehk, asendades $d\Psi_L = L di$, saame:

$$e_L = -L\frac{di}{dt}. \qquad (3\text{-}31)$$

Sellest avaldisest on näha, et endainduktsiooni elektromotoorne jõud sõltub voolu muutumise kiirusest ja induktiivsusest. Eriti suur endainduktsiooni elektromotoorne jõud tekib vooluahela katkestamisel, kui tugev vool väheneb nullini väga lühikese aja jooksul.

Endainduktsiooni elektromotoorse jõu suund määratakse Lenzi seaduse põhjal. Näiteks voolu tugevnemisel ($di > 0$) on endainduktsiooni elektromotoorne jõud negatiivne, s. t. tema suund on suurenevale voolule vastupidine. Voolu nõrgenemisel aga on endainduktsiooni elektromotoorne jõud positiivne.

Näide 3-10. Leida pooli induktiivsus, mille pikkus on 30 cm, läbimõõt 6 cm ja keerdude arv 1000.

Pooli induktiivsus

$$L = \mu_0 \frac{w^2 S}{l} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{10^6 \pi \cdot 6^2 \cdot 10^{-4}}{0{,}3 \cdot 4} = 1{,}18 \cdot 10^{-2}\ \text{H}.$$

Näide 3-11. Leida endainduktsiooni elektromotoorne jõud, kui eelmises näites toodud poolis väheneb vool kiirusega 500 A/sec, s. t.

$$\frac{di}{dt} = -500\ \text{A/sec}.$$

Endainduktsiooni elektromotoorne jõud

$$e_L = -L\frac{di}{dt} = 1{,}18 \cdot 10^{-2} \cdot 500 = 5{,}9\ \text{V}.$$

3-19. Magnetvälja energia

Endainduktsiooni nähtust võib võrrelda kehade inertsiga. Kui keha hakkab liikuma, ei saavuta ta üht või teist kiirust silmapilkselt, vaid kiirus kasvab pidevalt alates nullist, kusjuures kiiruse suurendamiseks tuleb kulutada energiat inertsi ületamiseks. Samuti ei jää liikuma pandud keha silmapilkselt

seisma, vaid jätkab inertsi tõttu liikumist väheneva kiirusega, kulutades varem salvestatud energiat.

Analoogiliselt ei saavuta elektrivool vooluahela sisselülitamisel stabiilset väärtust hetkeliselt ja samuti ahela katkestamisel ei kao vool silmapilkselt. Energia, mis hoiab alal voolu katkestatavas ahelas, salvestub ahelasse selle sisselülitamisel, voolu tugevnemise ajal. Seda energiat nimetatakse *magnetvälja energiaks*. Oletame, et vool takistust ja induktiivsust sisaldavas ahelas (joon. 3-27) tugevneb sõltuvalt ajast lineaarse seaduse järgi:

$$i = kt,$$

kus k — võrdelisuse tegur.

Ahelas indutseeritud endainduktsiooni elektromotoorne jõud

$$e_L = -L\frac{di}{dt} = -Lk,$$

sest

$$\frac{di}{dt} = k.$$

Kirchhoffi teise seaduse põhjal

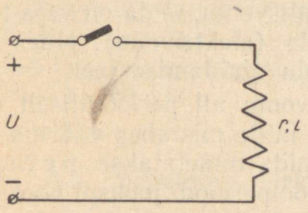
$$U + e_L = ir,$$

millest

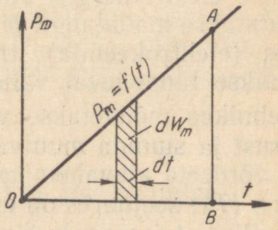
$$U = ir - e_L = ir + Lk. \qquad (3\text{-}32)$$

Korrutades selle võrrandi mõlemad pooled vooluga i, saame:

$$Ui = i^2r + Lki = i^2r + Lk^2t. \qquad (3\text{-}33)$$



Joon. 3-27. Takistust ja induktiivsust omav vooluahel.



Joon. 3-28. Magnetvälja energiat väljendav graafik.

Võrrandi (3-33) vasak pool väljendab toiteallika võimsust; võrrandi paremal poolel väljendab esimene liidetav (i^2r) soo-

juslikku võimsust, mis iseloomustab elektrienergia muundumise kiirust soojuseks, teine liidetav (Lk^2t) — võimsust, mis iseloomustab elektrienergia muundumise kiirust magnetvälja energiaks.

Sõltuvus $p_m = f(t)$ väljendub graafikul koordinaatide algus-punkti läbiva sirgena (joon. 3-28).

Väga lühikese ajavahemiku dt jooksul salvestub energia

$$dW_m = p_m dt,$$

mis graafikul on kujutatud viirutatud pinnana.

Kogu energiahulka, mis salvestub voolu muutumisel nullist kuni väärtuseni i ja t jooksul, kujutab kolmnurga OAB pindala. Järelikult

$$W_m = \frac{1}{2} p_m t = \frac{L}{2} (kt)^2 = \frac{Li^2}{2} \qquad (3\text{-}34)$$

NELJAS PEATÜKK

VAHELDUVVOOL

4-1. Vahelduvvoolu periood ja sagedus

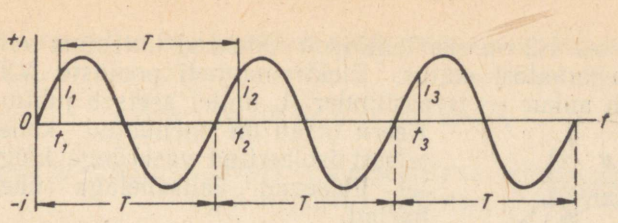
Vahelduvvoolul on tehnikas määratu suur praktiline tähtsus. Jätkub, kui öelda, et Nõukogude Liidus toodetakse peaaegu kogu elektrienergia vahelduvvooluna. See on seletatav kõigepealt sellega, et vahelduvvoolu on võimalik transformeerida, s. t. muuta vahelduvvoolu pinget. Kõrgemat pinget kasutatakse elektrienergia ülekandmisel, tarbijate toitmiseks aga kasutatakse madalamat pinget. Alalisvoolu, mida on vaja tööstuses (elektrokeemia), transpordis (elektrivedu), sides jm., saadakse tänapäeval vahelduvvoolu alaldamise teel.

Tehnikas mõistetakse vahelduvvoolu all perioodiliselt oma suurust ja suunda muutvat voolu, mille mistahes väärtus kordub võrdsete ajavahemike järel, mida nimetatakse p e r i o o d i k s (T); seejuures on esimese poolperioodi jooksul vool ühesuunaline, teise poolperioodi jooksul aga vastassuunaline.

Vahelduvvoolu graafik on esitatud joonisel 4-1.

Vahelduvvoolu või -pinge väärtust mingil ajahetkel nimetatakse h e t k v ä ä r t u s e k s. Vastavalt standardile tähistatakse hetkväärtusi väikeste tähtedega, s. o. i ja u.

Voolu hetkväärtuseks nimetatakse aja dt vältel elektrijuhi



Joon. 4-1. Vahelduvvoolu kõver.

ristlõikepinda läbiva elementaarse elektrihulga dq ja selle aja dt suhet:

$$i = \frac{dq}{dt}. \qquad (4\text{-}1)$$

Vahelduvvoolu või -pinge suurimat väärtust nimetatakse maksimaalväärtuseks ehk amplituudiks.

Vastavalt standardile tähistatakse maksimaalväärtusi suurte tähtedega koos indeksiga m, näiteks I_m, U_m. Voolu muutumist ühe perioodi vältel nimetatakse vahelduvvoolu tsükliks.

Perioodi pöördväärtust, mis võrdub perioodide arvuga sekundis, nimetatakse sageduseks f:

$$f = \frac{1}{T}. \qquad (4\text{-}2)$$

Sageduse mõõtühikuks on herts (Hz), kusjuures sagedus 1 Hz vastab ühele perioodile sekundis.

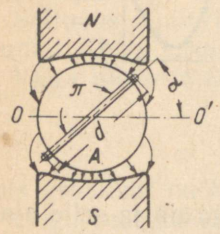
Tööstusvoolu standardsageduseks on 50 Hz. Sidetehnikas kasutatakse sagedusi 500—5000 Hz (helisagedus). Elektrotermias kasutatakse sagedusi 50—$1 \cdot 10^6$ Hz, raadiotehnikas $1 \cdot 10^5$ — $1 \cdot 10^9$ Hz.

4-2. Vahelduva elektromotoorse jõu saamine

Tehnikas kasutatakse peamiselt siinusfunktsiooni kohaselt muutuvat voolu, elektromotoorset jõudu ja pinget. Selliste suuruste graafiliseks kujuks on sinusoid.

Siinuselise voolu puhul muutub tema suurus pidevalt, ilma tõugeteta, ja sel juhul ei teki liigpingeid, mis oleksid ohtlikud juhtmete isolatsioonile.

Joonisel 4-2 on skemaatiliselt näidatud lihtsaima vahelduvvoolugeneraatori ehitus. Elektromagneti pooluste *NS* vahel paikneb ankur — terassilinder *A*, millel asetseb juhtmekeerd.



Joon. 4-2. Lihtsaima vahelduvvoolugeneraatori ehitus.

Keeru otsad on ühendatud kahe teineteisest isoleeritud vaskrõnga külge, millel libisevad välisahelaga ühendatud harjad.

Teatud kujuga pooluste korral, mispuhul õhupilu pooluste keskelt äärte poole suureneb, muutub väljatihedus mööda ankru ümbermõõtu siinusfunktsiooni kohaselt. Seejuures on välja jõujooned risti ankru pinnaga.

Väljatugevus *B* ankru pinnal vabalt valitud punktis avaldub valemiga:

$$B = B_m \sin \alpha,$$

kus: B_m — väljatiheduse maksimaalväärtus (pooluste keskkoha juures);

α — nurk, mille moodustavad ankru telge läbiv neutraaltasapind ja ankru telge ning ankru pinnal vabalt valitud punkti läbiv tasapind.

Keeru pöörlemisel ühtlase nurkkiirusega $\omega = \frac{\alpha}{t}$ indutseeritakse keeru kummaski aktiivküljes elektromotoorne jõud:

$$e' = Blv = B_m lv \sin \alpha.$$

Kuna aktiivküljed on ühendatud järjestikku, siis summaarne elektromotoorne jõud keerus

$$e = 2e' = 2B_m lv \sin \alpha.$$

Keerus indutseeritav elektromotoorne jõud on maksimaalne, kui $\alpha = 90°$, mispuhul $\sin \alpha = 1$:

$$E_m = 2B_m lv.$$

Järelikult

$$e = E_m \sin \alpha$$

ehk

$$e = E_m \sin \omega t, \text{ sest } \alpha = \omega t.$$

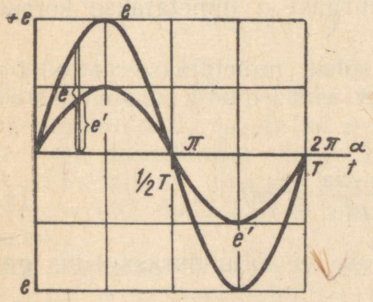
Joonisel 4-3 on kujutatud sõltuvus $e = f(t)$.

Kui ühe keeru asemel asetseb ankrul w keerust koosnev

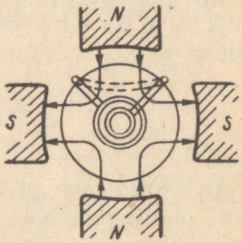
pool, siis on selles indutseeritav elektromotoorne jõud w korda suurem, s. t.

$$e = w \cdot 2B_m lv \sin \alpha = E_m \sin \omega t, \qquad (4\text{-}3)$$

kus $E_m = w \cdot 2B_m lv$ — poolis indutseeritava elektromotoorse jõu maksimaalväärtus.



Joon. 4-3. Elektromotoorse jõu kõverad.



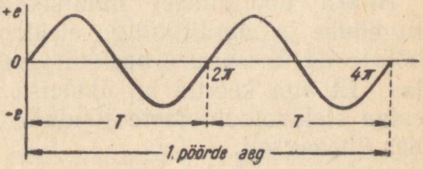
Joon. 4-4. Kahe pooluspaariga vahelduvvoolugeneraatori põhimõtteline ehitus.

Ankru (pooli) pöörlemisel ühtlase kiirusega toimub ühe pöörde (2π) vältel üks elektromotoorse jõu tsükkel, mis vastab ühele perioodile T.

Ankru pöörlemise nurkkiirus

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f. \qquad (4\text{-}4)$$

Ühe pooluspaariga generaatorite korral vastab ankru ühele täispöördele üks elektromotoorse jõu tsükkel, p pooluspaariga generaatorite korral (joon. 4-4) aga vastab ankru ühele täispöördele p elektromotoorse jõu tsüklit, sest sel juhul möödub iga elektrijuht p korda põhjapooluse alt ja p korda lõunapooluse alt. Joonisel 4-5 on graafiliselt kujutatud sõltuvus $e = f(t)$ ankru ühe pöörde vältel kahe pooluspaariga generaatori korral.



Joon. 4-5. Kahe pooluspaariga vahelduvvoolugeneraatori elektromotoorse jõu kõver.

Siinuselise elektromotoorse jõu saamiseks muutub väljatihedus mitme poolusega ankru pinnal pooluste vastava kuju tõttu järgmiselt:

$$B = B_m \sin p\alpha, \tag{4-5}$$

kus p — pooluspaaride arv.

Erinevalt geomeetrilisest nurgast α nimetatakse korrutist $p\alpha$ elektriliseks nurgaks.

Elektrilise nurga ja aja suhet nimetatakse elektriliseks nurkkiiruseks ehk nurksageduseks. Niisiis

$$\omega = \frac{p\alpha}{t} = \frac{p \cdot 2\pi}{pT} = 2\pi f. \tag{4-6}$$

Nagu avaldisest (4-6) selgub, ei sõltu nurksagedus generaatori pooluspaaride arvust.

Kui tähistada ankru pöörlemiskiirust tähega n (pöörete arv minutis), siis tsüklite arv minutis on pn ja tsüklite arv sekundis, s. t. indutseeritud elektromotoorse jõu sagedus,

$$f = \frac{pn}{60}. \tag{4-7}$$

Näide 4-1. Generaatoril on 2 pooluspaari ($p = 2$). Tema ankru pöörlemiskiirus $n = 1500$ p/min. Leida vahelduvvoolu sagedus

$$f = \frac{pn}{60} = \frac{2 \cdot 1500}{60} = 50 \text{ Hz}.$$

4-3. Faas ja faasinihe

Oletame nüüd, et generaatori ankrul on kaks ühesugust keerdu, mis on ruumis nihutatud (joon. 4-6).

Ankru pöörlemisel indutseeritakse keerdudes ühesuguse sageduse ja amplituudiga elektromotoorsed jõud, sest keerud pöörlevad ühesuguse nurkkiirusega ühes ja samas magnetväljas. Et aga keerud on üksteise suhtes ruumis nihutatud, ei esine elektromotoorsete jõudude maksimaalväärtused keerdudes üheaegselt.

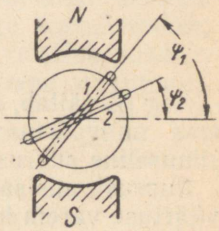
Kui ankru pöörlemisel vastu kellaosuti liikumise suunda moodustab esimene keerd vaadeldaval ajahetkel neutraaltasapinnaga nurga ψ_1, teine keerd sama tasapinna suhtes aga

nurga ψ_2 (vt. joon. 4-6), siis esimeses keerus indutseeritud elektromotoorne jõud

$$e_1 = E_m \sin(\omega t + \psi_1) \qquad (4\text{-}8)$$

ja teises keerus indutseeritud elektromotoorne jõud

$$e_2 = E_m \sin(\omega t + \psi_2). \qquad (4\text{-}9)$$



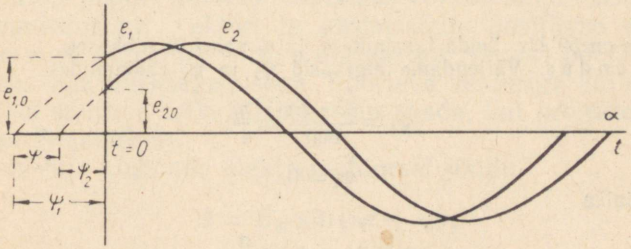
Joon. 4-6. Poolide asend vahelduvvoolugeneraatori ankrul.

Avaldistest (4-8) ja (4-9) järeldub, et elektromotoorse jõu hetkväärtuse määravad amplituud E_m ja $\sin(\omega t + \psi)$. Nurka $(\omega t + \psi)$ nimetatakse faasinurgaks ehk faasiks. Seega sõltub elektromotoorse jõu hetkväärtus amplituudist ja faasist.

Aja alghetkel $\omega t = 0$ ning sel juhul esimeses ja teises keerus indutseeritud elektromotoorsed jõud

$$e_{10} = E_m \sin \psi_1;$$
$$e_{20} = E_m \sin \psi_2.$$

Joonisel 4-7 on need elektromotoorsed jõud kujutatud algordinaatidega.



Joon. 4-7. Kummaski poolis esinevate elektromotoorsete jõudude kõverad.

Elektrilisi nurki ψ_1 ja ψ_2, mis määravad vastavate elektromotoorsete jõudude väärtused aja alghetkel, nimetatakse algfaasinurkadeks ehk algfaasideks.

Kahe võrdse sagedusega siinuselise suuruse algfaaside vahet

nimetatakse faasinihkenurgaks ehk faasinihkeks (tähistatakse tähega ψ):

$$\psi = \psi_1 - \psi_2. \qquad (4\text{-}10)$$

Jagades faasinihkenurga nurksagedusega, saame nihkeaja:

$$\frac{\psi}{\omega} = \frac{\psi T}{2\pi} = t_{12}.$$

Aeg t_{12} näitab, millise ajaga üks siinuseline suurus saavutab oma nullväärtuse (või amplituudväärtuse) varem kui teine siinuseline suurus.

Suurust, mis saavutab nullväärtuse või positiivse amplituudväärtuse varem kui teine, nimetatakse etteruttavaks suuruseks, seda aga, mis saavutab sama väärtuse hiljem — mahajäävaks suuruseks.

Näiteks joonisel 4-7 kujutatud elektromotoorsete jõudude kohta võib öelda, et elektromotoorne jõud e_1 ruttab ette elektromotoorsest jõust e_2 nurga ψ võrra (ehk aja t_{12} võrra) ehk elektromotoorne jõud e_2 jääb maha elektromotoorsest jõust e_1 nurga ψ võrra (ehk aja t_{12} võrra).

Kui kahe siinuselise suuruse algfaasid ühtivad, siis saavutavad nad oma null- või amplituudväärtused üheaegselt; niisugused siinuselised suurused ühtivad faasis ehk on faasis.

Näide 4-2. On antud elektromotoorsed jõud:

$$e_1 = E_m \sin(\omega t + 45°);$$
$$e_2 = E_m \sin \omega t.$$

Sagedus on 50 Hz. Leida faasinihe e_1 ja e_2 vahel ja nihkeaeg.

Lahendus. Väljendame algfaasid ψ_1 ja ψ_2 radiaanides:

$$\psi_1 = \frac{45 \cdot 2\pi}{360} = \frac{\pi}{4};$$

$$\psi_2 = 0.$$

Faasinihe

$$\psi = \psi_1 - \psi_2 = \frac{\pi}{4}.$$

Periood

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 0{,}02 \text{ sec}.$$

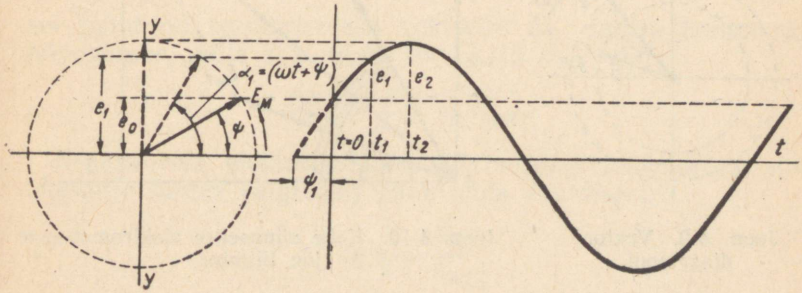
Nihkeaeg

$$t_{12} = \frac{\psi}{\omega} = \frac{\pi \cdot T}{4 \cdot 2\pi} = \frac{0{,}02}{8} = 0{,}0025 \text{ sec}$$

4-4. Siinuseliste suuruste graafiline kujutamine

Siinuselisi suurusi võib graafiliselt kujutada sinusoididega või pöörlevate vektoritega.

Esimesel juhul väljendavad sinusoidi ordinaadid kindlas mastaabis suuruse hetkväärtusi, abstsissid aga ajavahemikke, arvestades aja alghetkest. Selline kujutusviis määrab siinuselise suuruse täielikult, sest on võimalik leida tema amplituudi, algfaasi ja perioodi.



Joon. 4-8. Siinuseliste suuruste kujutamine pöörleva vektoriga.

Teisel juhul kujutatakse siinuseline suurus pöörleva vektoriga. Vektori pikkus kindlas mastaabis võrdub siinuselise suuruse amplituudiga, vektori ja abstsisstelje positiivse suuna vaheline nurk alghetkel võrdub algfaasiga, vektori pöörlemise nurkkiirus aga nurksagedusega. Pöörleva vektoriga kujutatud siinuselise suuruse hetkväärtuse võib saada, kui projekteerida vektor ordinaatteljele.

Kui on vaja kujutada elektromotoorset jõudu.

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi),$$

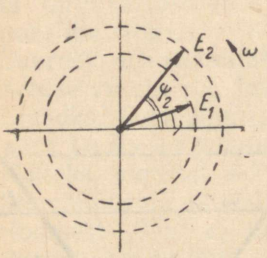
siis tuleb joonestada vektor, mille pikkus valitud mastaabis väljendab elektromotoorse jõu amplituudi E_m ja mis moodustab abstsisstelje positiivse suunaga nurga ψ (joon. 4-8).

Vektori pöörlemisel positiivses suunas (vastu kellaosuti liikumise suunda) nurkkiirusega ω väljendavad selle vektori projektsioonid ordinaatteljel elektromotoorse jõu hetkväärtusi vastavatel ajahetkedel, sest

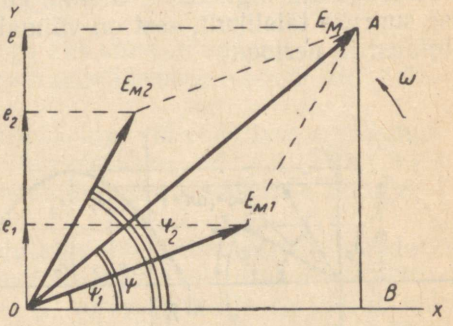
$$E_m \sin \alpha = E_m \sin(\omega t + \psi).$$

Mitme pöörleva vektori kompleksi (kogumit), mis kujutavad ühe kindla sagedusega siinuselisi suurusi, nimetatakse **vektordiagrammiks**.

Näiteks kaks elektromotoorset jõudu $e_1 = E_{m_1} \sin(\omega t + \psi_1)$ ja $e_2 = E_{m_2} \sin(\omega t + \psi_2)$ on vektordiagrammil (joon. 4-9) kujutatud kahe vektoriga.



Joon. 4-9. Vektordiagramm.



Joon. 4-10. Kahe siinuselise elektromotoorse jõu liitmine.

Kui kõik vektordiagrammi kuuluvad vektorid pöörlevad võrdse nurkkiirusega, siis nende omavaheline asetus ei muutu. Seega juhul, kui meid huvitab ainult faasinihe üksikute suuruste vahel, võib vektordiagrammi konstrueerimisel joonestada esimese vektori meelevaldses asendis, ülejäänud vektorid aga tuleb paigutada esimese suhtes nurkade all, mis võrduvad vastavate faasinihetega.

Vektordiagrammidel on suur tähtsus vahelduvvooluahelates esinevate nähtuste uurimisel, eriti mitme üheliigilise siinuselise suuruse summa ja vahe leidmisel. Joonisel 4-10 on näidatud kahe vektori liitmine: pöörlevate vektorite E_{m1} ja E_{m2} projektsioonide summa ordinaatteljel on võrdne vektori E_m projektsiooniga samal teljel, kusjuures vektor E_m on vektorite E_{m1} ja E_{m2} geomeetriline summa.

Seega kahe ühesuguse sagedusega siinuselise suuruse (näiteks e_1 ja e_2) liitmisel saame sama sagedusega siinuselise suuruse e, mille amplituudi väljendab vektori pikkus:

$$\overline{E}_m = \overline{E}_{m1} + \overline{E}_{m2}. \qquad (4\text{-}11)$$

(Kriipsud tähtede kohal näitavad, et need suurused on vektorid. Neid iseloomustab mitte ainult suurus, vaid ka suund ja

neid tuleb liita mitte algebraliselt, vaid geomeetriliselt, vastavalt parallelogrammi reeglile.)

Resulteeriva vektori $\overline{E}_m$ algfaas leitakse avaldisest:

$$tg\psi = \frac{E_{m1} \sin \psi_1 + E_{m2} \sin \psi_2}{E_{m1} \cos \psi_1 + E_{m2} \cos \psi_2}. \qquad (4\text{-}12)$$

Olgu antud kaks elektromotoorset jõudu, mis on faasis nihutatud 90° võrra:

$$e_1 = E_{m1} \sin \omega t \quad \text{ja} \quad e_2 = E_{m2} \sin(\omega t + 90°);$$

sel juhul on resulteerivaks vektoriks E_m sellise kolmnurga hüpotenuus, mille kaatetiteks on E_{m1} ja E_{m2}, s. t.

$$E_m = \sqrt{E_{m1}^2 + E_{m2}^2}.$$

Resulteeriva elektromotoorse jõu vektori nihkenurga abstsisstelje suhtes (algfaasi) saab leida avaldisest:

$$tg\,\psi = \frac{E_{m2}}{E_{m1}}.$$

Faasis olevate suuruste liitmisel võrdub summaarne suuruse amplituud liidetavate suuruste amplituudide summaga, s. t.

$$E_m = E_{m1} + E_{m2},$$

kusjuures summaarse suuruse faas ühtib liidetavate faasiga.

Kahe siinuselise suuruse lahutamise võib asendada liitmisega, kusjuures üheks komponendiks on vähendatav suurus ja teiseks komponendiks lahutatava suurusega vastasmärgiline suurus:

$$e_1 - e_2 = e_1 + (-e_1).$$

4-5. Voolu ja pinge efektiivväärtused

Vahelduvvooluahelate arvutamisel on otstarbekam kasutada mitte hetk- või maksimaalväärtusi, vaid pinge ja voolu tegevehk efektiivväärtusi.

Vahelduvvoolu efektiivväärtus võrdub sellise ekvivalentse alalisvoolu väärtusega, mis, läbides sama takistust kui vahelduvvoolgi, eraldab selles perioodi vältel sama suure soojushulga.

Vastavalt standardile tähistatakse efektiivväärtusi suurte tähtedega, s. t. vool I, pinge U.

Leiame seose siinuselise vahelduvvoolu efektiivväärtuse ja amplituudväärtuse vahel.

Alalisvool eraldab takistuses r perioodi vältel soojushulga

$$Q = 0{,}24I^2rT.$$

Vahelduvvool eraldab samas takistuses perioodi vältel soojushulga

$$Q = 0{,}24P_kT,$$

kus P_k — vahelduvvoolu keskmine võimsus.

Kui

$$0{,}24I^2rT = 0{,}24P_kT, \qquad (4\text{-}13)$$

siis I ongi vahelduvvoolu efektiivväärtus.

Võrrandist (4-13) leiame, et

$$I = \sqrt{\frac{P_k}{r}}.$$

Võimsuse hetkväärtus siinuselise vahelduvvoolu korral ($i = I_m \sin \omega t$):

$$p = i^2r = I_m^2 r \sin^2 \omega t.$$

Võttes arvesse, et

$$\sin^2 \alpha = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\alpha,$$

saame:

$$p = \frac{I_m^2 r}{2} - \frac{I_m^2 r}{2} \cos 2\omega t.$$

Vahelduvvoolu võimsuse hetkväärtus võrdub kahe liikme summaga, milledest esimene on konstantne (ei sõltu ajast), teine aga on siinuseliselt muutuv.

Esimese liikme keskväärtus võrdub tema suurusega, s. t. $\frac{I_m^2 r}{2}$, teise liikme keskväärtus aga on null, sest teatavasti on harmooniliste funktsioonide (seega ka siinuselise funktsiooni) keskväärtus perioodi vältel null.

Järelikult vahelduvvoolu keskmine võimsus

$$P_k = \frac{I_m^2 r}{2}$$

ja vahelduvvoolu efektiivväärtus

$$I = \sqrt{\frac{I_m^2 r}{2r}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \approx 0{,}707 I_m. \qquad (4\text{-}14)$$

Analoogiline seos kehtib ka pingete kohta, s. t.

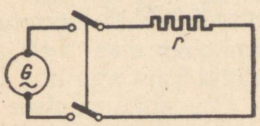
$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 0{,}707 U_m.$$

Ampermeetrid ja voltmeetrid näitavad tavaliselt pinge ja voolu efektiivväärtusi.

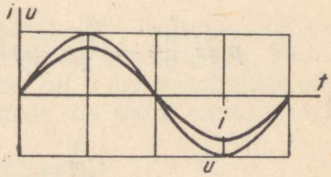
Kuna siinuselise pinge ja voolu efektiivväärtused on lineaarses sõltuvuses ($\sqrt{2}$) nende suuruste amplituudväärtustest, siis vektor, mis ühes mastaabis väljendab amplituudväärtust, kujutab teises mastaabis sama suuruse efektiivväärtust. Edaspidi lähtume mastaabi valikul efektiivväärtustest.

4-6. Takistus vahelduvvooluahelas

Käsitleme induktiivsusvaba vahelduvvooluahelat takistusega r (joon. 4-11).



Joon. 4-11. Takistusega vooluahel.



Joon. 4-12. Pinge ja vool takistusega vooluahelas.

Siinuselise klemmipinge

$$u = U_m \sin \omega t$$

korral on vool

$$i = \frac{U}{r} = \frac{U_m}{r} \sin \omega t$$

samuti siinuseline ning pingega faasis.

Voolu amplituudväärtus

$$I_m = \frac{U_m}{r}.$$

Jagades selle võrrandi mõlemad pooled $\sqrt{2}$-ga, leiame voolu efektiivväärtuse:

$$I = \frac{U}{r}. \qquad (4\text{-}15)$$



Joon. 4-13. Takistusega vooluahela vektordiagramm.

Joonisel 4-12 on kujutatud pinge ja voolu kõverad sõltuvalt ajast, joonisel 4-13 aga nende suuruste vektordiagramm.

Induktiivsusvaba takistusega ahela poolt tarbitav võimsus

$$p = ui = i^2 r = I_m^2 \, r \sin^2 \omega t$$

on alati positiivne, sõltumatult voolu suunast, s. t., et elektrienergia muundub ühtemoodi soojuseks, sõltumatult sellest, kummas suunas vool takistust läbib.

Pidades silmas, et

$$\sin^2 \omega t = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos 2\omega t,$$

saame:

$$p = \frac{I_m^2 r}{2} - \frac{I_m^2 r}{2} \cos 2\omega t = I^2 r - I^2 r \cos^2 \omega t,$$

sest

$$\frac{I_m^2}{2} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} = I^2.$$

Konstantne liidetav $I^2 r$ väljendab keskmist võimsust perioodi vältel (tähis P).

Järelikult

$$P = I^2 r = UI. \qquad (4\text{-}16)$$

Keskmine võimsus iseloomustab elektrienergia soojuseks muundumise keskmist kiirust.

Praktiliselt induktiivsusvaba takistusega on hõõglambid, reostaadid, lühikesed sirged juhtmed jne.

4-7. Induktiivsus vahelduvvooluahelas

Vaatleme vahelduvvooluahelat (joon. 4-14), mille induktiivsus on L ja takistus $r = 0$.

Kui ahelas kulgeb siinuseline vool

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

tekib tarbija klemmidel endainduktsiooni elektromotoorne jõud

$$e_L = -L\frac{di}{dt}.$$

Kirchhoffi teise seaduse põhjal

$$u + e_L = ir = 0,$$

millest pinge tarbija klemmidel

$$u = -e_L = \frac{di}{dt}.$$

Järelikult on pinge sel juhul võrdeline mitte vooluga, vaid voolu muutumise kiirusega.

Leiame voolu muutumise kiiruse:

$$\frac{di}{dt} = I_m \frac{d\sin \omega t}{dt} = \omega I_m \cos \omega t.$$

Seega, kui vool on võrdeline nurga ωt siinusega, siis voolu muutumise kiirus on võrdeline nurga ωt koosinusega. Kui näiteks vool läbib maksimaalväärtuse, on tema muutumise kiirus null, kui aga vool läbib nullväärtuse, on tema muutumise kiirus maksimaalne.

Pinge induktiivsusega ahela klemmidel

$$u = \omega L I_m \cos \omega t = \omega L I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Siinuselise voolu korral on pinge induktiivsuse klemmidel samuti siinuseline, kuid on voolust ees nurga $\frac{\pi}{2}$ võrra.

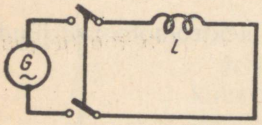
Joonisel 4-15 on kujutatud pinge ja voolu kõverad sõltuvalt ajast, joonisel 4-16 aga nende suuruste vektordiagramm.

Pinge amplituud induktiivsuse klemmidel

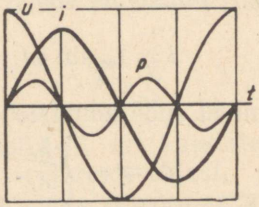
$$U_m = \omega L I_m. \qquad (4\text{-}17)$$

Jagades võrrandi (4-17) mõlemad pooled $\sqrt{2}$-ga, leiame pinge efektiivväärtuse:

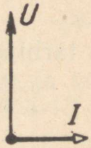
$$U = \omega L I. \qquad (4\text{-}18)$$



Joon. 4-14. Induktiivsusega vooluahel.



Joon. 4-15. Vool, pinge ja võimsus induktiivsusega vooluahelas.



Joon. 4-16. Induktiivsusega vooluahela vektordiagramm.

Voolu efektiivväärtus

$$I = \frac{U}{\omega L} = \frac{U}{x_L}.$$

Suurust

$$x_L = \omega L \qquad (4\text{-}19)$$

nimetatakse induktiivseks reaktiivtakistuseks ehk lihtsalt induktiivtakistuseks.

Induktiivtakistust mõõdetakse oomides. Erinevalt reaktiivtakistusest x_L nimetatakse takistust r vahelduvvooluahelas edaspidi aktiivtakistuseks.

Mõningatel juhtudel (muutuva induktiivsuse korral) on otstarbekas väljendada pinget induktiivsuse klemmidel teisiti.

Korrutis

$$LI = \frac{LI_m}{\sqrt{2}} = \frac{\Psi_m}{\sqrt{2}},$$

kus Ψ_m — aheldusvoo maksimaalväärtus.

Kui üks ja seesama endainduktsiooni magnetvoog aheldub kõigi keerdudega, siis

$$\Psi_m = w\Phi_m.$$

Sel juhul

$$U = \omega LI = \frac{2\pi f w \Phi_m}{\sqrt{2}} = 4{,}44 f w \Phi_m. \qquad (4\text{-}20)$$

Võimsuse hetkväärtus induktiivsusega ahelas

$$p = ui = U_m I_m \sin \omega t \cdot \cos \omega t.$$

Kuna

$$\sin \omega t \cdot \cos \omega t = \frac{\sin 2\omega t}{2},$$

siis

$$p = \frac{I_m U_m}{2} \sin 2\omega t = UI \sin 2\omega t. \qquad (4\text{-}21)$$

Joonisel 4-15 on graafiliselt kujutatud võimsuse sõltuvus ajast. Võimsuse hetkväärtus reaktiivtakistusega ahelas muutub kahekordse sagedusega, saavutades kord positiivse maksimaalväärtuse $UI = I^2\omega L$, kord sama suure negatiivse maksimaalväärtuse.

Võimsuse positiivsed väärtused vastavad voolu tugevnemisele, mispuhul elektrienergia muundub magnetvälja energiaks. Voolu maksimaalväärtusel ahelasse salvestatud energia

$$W_m = \frac{LI_m^2}{2} = LI^2.$$

Võimsuse negatiivsed väärtused vastavad voolu nõrgenemisele, mispuhul magnetvälja energia muundub uuesti elektrienergiaks.

Kui $p > 0$, siis on induktiivsus tarbijaks, kui aga $p < 0$, siis generaatoriks.

Võimsuse keskmine väärtus induktiivsusega ahelas on null.

Võimsuse maksimaalväärtust induktiivsusega ahelas nimetatakse r e a k t i i v v õ i m s u s e k s (tähis Q). Reaktiivvõimsus

$$Q = I^2\omega L = \omega W_m.$$

Erinevalt reaktiivvõimsusest nimetatakse võimsust aktiivtakistusega ahelas a k t i i v v õ i m s u s e k s.

Näide 4-3. Pool induktiivsusega 0,03 H on lülitatud võrku sagedusega 50 Hz ja pingega 120 V. Leida pooli reaktiivtakistus ja vool.

Reaktiivtakistus

$$x_L = 2\pi fL = 2\pi \cdot 50 \cdot 0{,}03 = 9{,}4\ \Omega.$$

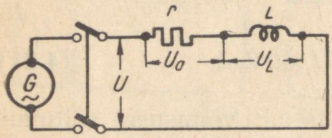
$$I = \frac{U}{x_L} = \frac{120}{9{,}4} = 12{,}8 \text{ A}.$$

4-8. Aktiivtakistus ja induktiivsus vahelduvvooluahelas

Olgu ahelas, milles kulgeb vahelduvvool

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

järjestikku ühendatud aktiivtakistus ja induktiivsus (joon. 4-17).



Joon. 4-17. Aktiivtakistuse ja induktiivsusega vooluahel.

Kirchhoffi teise seaduse põhjal

$$u + e_L = ir,$$

millest pinge ahela klemmidel

$$u = ir - e_L = ir + L\frac{di}{dt} = u_a + u_L. \qquad (4\text{-}22)$$

Esimest liidetavat u_a nimetatakse aktiivpingeks, mille hetkväärtus on võrdeline vooluga, teist liidetavat aga nimetatakse reaktiivpingeks, mille hetkväärtus on võrdeline voolu muutumise kiirusega.

Määrame aktiiv-, reaktiiv- ja üldise pinge (pinge ahela klemmidel).

Aktiivpinge

$$u_a = ir = I_m r \sin \omega t = U_{a.m} \sin \omega t.$$

Aktiivpinge muutub siinusfunktsiooni kohaselt ja on vooluga faasis. Aktiivpinge maksimaalväärtus

$$U_{a.m} = I_m r$$

ja efektiivväärtus

$$U_a = Ir.$$

Reaktiivpinge

$$U_L = L\frac{di}{dt} = \omega L I_m \cos \omega t = U_{Lm} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Reaktiivpinge on siinuseline ja on voolust ees 90° võrra.

Reaktiivpinge maksimaalväärtus

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

ja efektiivväärtus

$$U_L = \omega L I.$$

Pinge hetkväärtus ahela klemmidel

$$u = u_a + u_L = U_{a.m} \sin \omega t + U_{Lm} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) =$$
$$= U_m \sin(\omega t + \varphi). \qquad (4\text{-}23)$$

Pinge ahela klemmidel on siinuseline ja on voolust ees nurga φ võrra.

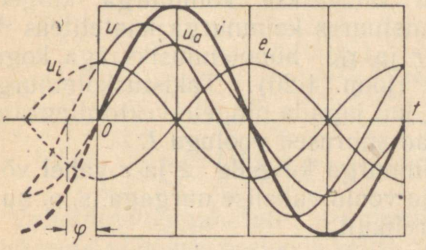
Selle pinge amplituud, nagu nägime § 4-4,

$$U_m = \sqrt{U_{a.m}^2 + U_{Lm}^2} \qquad (4\text{-}24)$$

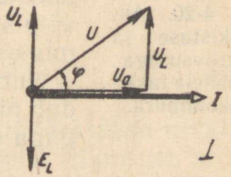
ja efektiivväärtus

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2}. \qquad (4\text{-}25)$$

Joonisel 4-18 on näidatud voolu, aktiivpinge, reaktiivpinge ja ahela klemmidel esineva pinge kõverad sõltuvalt ajast ning joonisel 4-19 nende suuruste vektordiagramm.



Joon. 4-18. Pinged ja vool aktiivtakistuse ja induktiivsusega ahelas.



Joon. 4-19. Aktiivtakistuse ja induktiivsusega vooluahela vektordiagramm.

Faasinihe φ pinge ja voolu vahel võib leida valemist

$$\cos \varphi = \frac{U_a}{U}$$

või valemist

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{U_L}{U_a}.$$

Mida suurem on pinge reaktiivkomponent, võrreldes pinge aktiivkomponendiga, seda suurem on faasinihe voolu ja vooluahela klemmidel esineva pinge vahel.

Asendades avaldisse (4-25) $U_a = Ir$ ja $U_L = I\omega L$, saame:

$$U = \sqrt{(Ir)^2 + (I\omega L)^2} = I\sqrt{r^2 + (\omega L)^2},$$

millest vool

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + (\omega L)^2}}. \qquad (4\text{-}26)$$

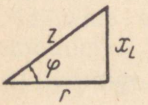
Tähistades

$$\sqrt{r^2 + (\omega L)^2} = z, \qquad (4\text{-}27)$$

saab anda avaldisele (4-26) lihtsama kuju:

$$I = \frac{U}{z}. \qquad (4\text{-}28)$$

Suurust $z = \sqrt{r^2 + (\omega L)^2}$ nimetatakse ahela k o g u t a k i s t u s e k s ja mõõdetakse oomides.



Joon. 4-20. Aktiivtakistuse ja induktiivsusega vooluahela takistuskolmnurk.

Takistused r, x_L ja z on omavahel seotud samuti kui täisnurkse kolmnurga külgede pikkused, kusjuures kolmnurga kaatetiteks on takistused r ja x_L, hüpotenuusiks aga kogutakistus z (joon. 4-20). Takistuskolmnurga võib saada, kui jagada pingete vektordiagrammis esinevad suurused vooluga I.

Nurk kolmnurga külgede z ja r vahel võrdub pinge ja voolu vahelise nurgaga, s. o. nurgaga φ. Järelikult

$$\cos\varphi = \frac{r}{z} \qquad (4\text{-}29)$$

ja

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{x_L}{r}. \qquad (4\text{-}30)$$

Näide 4-4. Võrku pingega 120 V ja sagedusega 50 Hz on lülitatud pool induktiivsusega 25,5 mH ja aktiivtakistusega 6 Ω. Leida suurused x_L, z, I, U_a, U_L ja $\cos\varphi$.

Pooli induktiivtakistus

$$x_L = \omega L = 2\pi \cdot 50 \cdot 0{,}0255 = 8\ \Omega;$$

pooli kogutakistus

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2} = \sqrt{6^2 + 8^2} = 10\ \Omega;$$

pooli läbiv vool

$$I = \frac{U}{z} = \frac{120}{10} = 12\ \text{A};$$

pingelang pooli aktiivtakistuses

$$U_a = Ir = 12 \cdot 6 = 72\ \text{V};$$

pingelang pooli induktiivtakistuses

$$U_L = Ix_L = 12 \cdot 8 = 96\ \text{V};$$

$$\cos\varphi = \frac{r}{z} = \frac{6}{10} = 0{,}6.$$

Hetkvõimsus aktiiv- ja induktiivtakistusega ahelas

$$p = ui = U_m I_m \sin(\omega t + \varphi) \cdot \sin \omega t. \qquad (4\text{-}31)$$

Kuna

$$\sin(\omega t + \varphi) \cdot \sin \omega t = \frac{1}{2}\cos\varphi - \frac{1}{2}\cos(2\omega t + \varphi)$$

ja

$$\frac{U_m I_m}{2} = UI, \qquad (4\text{-}32)$$

siis

$$p = UI\cos\varphi - UI\cos(2\omega t + \varphi). \qquad (4\text{-}33)$$

Vahelduvvooluahelate arvutamisel määratakse tavaliselt keskmine võimsus perioodi kohta. Keskmise võimsuse määramiseks vaatleme võrrandit (4-33), mis koosneb kahest liikmest: ajast sõltumatust konstantsest liikmest $UI\cos\varphi$ ja siinuseliselt muutuvast liikmest $UI\cos(2\omega t + \varphi)$. Esimese liikme keskväärtus võrdub tema suurusega, s. o. $UI\cos\varphi$, teise liikme keskväärtus on aga null, sest harmoonilise funktsiooni keskväärtus perioodi ulatuses on null.

Niisiis keskmine võimsus

$$P = UI\cos\varphi, \qquad (4\text{-}34)$$

s. t. keskmine võimsus võrdub pinge ja voolu efektiivväärtuste ja cos φ korrutisega.

Pidades silmas, et

$$U \cos \varphi = U_a \quad \text{ja} \quad U_a = Ir,$$

leiame, et keskmine võimsus

$$P = U_a I = I^2 r,$$

s. t. võrdub keskmise võimsusega aktiivtakistuses, sest teatavasti keskmine võimsus reaktiivtakistuses on võrdne nulliga. Seepärast nimetatakse keskmist võimsust **aktiivvõimsuseks**.

Reaktiivvõimsus

$$Q = I^2 x_L = I U_L = IU \sin \varphi.$$

Pinge ja voolu efektiivväärtuste korrutist nimetatakse **näivvõimsuseks** ja tähistatakse tähega S:

$$UI = S. \tag{4-35}$$

Näiv-, aktiiv- ja reaktiivvõimsus on omavahel seotud järgmiselt:

$$(IU \cos \varphi)^2 + (IU \sin \varphi)^2 = (IU)^2$$

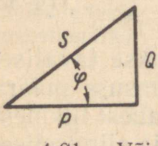
ehk

$$P^2 + Q^2 = S^2,$$

millest

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \tag{4-36}$$

Võimsused P, Q ja S on omavahel seotud samuti kui täisnurkse kolmnurga külgede pikkused, kusjuures kolmnurga kaatetiteks on aktiiv- ja reaktiivvõimsus ning hüpotenuusiks näivvõimsus (joon. 4-21).



Joon. 4-21. Võimsuskolmnurk.

Võimsuskolmnurga võib saada pingete vektordiagrammist (joon. 4-19), kui korrutada selles esinevad suurused vooluga I.

Võimsuskolmnurgast leiame, et

$$P = S \cos \varphi \quad \text{ja} \quad Q = S \sin \varphi.$$

Aktiivvõimsuse ja näivvõimsuse suhet

$$\frac{P}{S} = \cos \varphi \tag{4-37}$$

nimetatakse **võimsusteguriks**.

Näivvõimsust mõõdetakse voltamprites (VA).

Näivvõimsuse mõiste sissetoomine on tingitud järgmistest asjaoludest.

Iga elektrimasinat (või -aparaati) iseloomustatakse:

1) nimivooluga I_n, s. o. voolu suurima efektiivväärtusega, mille puhul masina kuumenemine soojuskadude tõttu takistustes ei ületa lubatud piire;

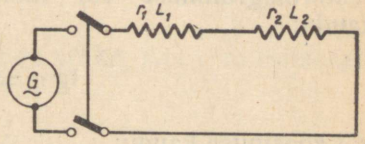
2) nimipingega U_n, s. o. pinge suurima efektiivväärtusega, millele on arvestatud masina isolatsioon ja mille suurus määrab masina magnetvoo.

Järelikult määrab niminäivvõimsuse, millele masin on arvestatud, nimipinge ja nimivoolu korrutis, s. o.

$$S_n = U_n I_n.$$

4-9. Aktiiv- ja induktiivtakistus mittehargnevas ahelas

Olgu ahelasse lülitatud kaks pooli (joon. 4-22), mis omavad nii aktiiv- kui ka induktiivtakistust. Kui poole läbib vool I, on pinged aktiivtakistustel $U_{a1} = Ir_1$ ja $U_{a2} = Ir_2$ vooluga faasis, kuid pinged reaktiivtakistustel $U_{L1} = Ix_{L1}$ ja $U_{L2} = Ix_{L2}$ voolust 90° võrra ees (joon. 4-23).



Joon. 4-22. Järjestikku ühendatud poolidega vooluahel.

Pinged poolide klemmidel

$$U_1 = \sqrt{U_{a1}^2 + U_{L1}^2} \quad \text{ja}$$

$$U_2 = \sqrt{U_{a2}^2 + U_{L2}^2}.$$

Pinge ahela klemmidel

$$U = \sqrt{(U_{a1} + U_{a2})^2 + (U_{L1} + U_{L2})^2}, \qquad (4\text{-}38)$$

ehk, kui väljendada pingekomponendid voolu ja vastavate takistuste kaudu:

$$U = I\sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_{L1} + x_{L2})^2},$$

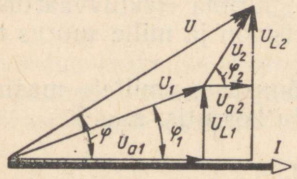
millest ahela vool

$$I = \frac{U}{z} = \frac{U}{\sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_1 + x_2)^2}}.$$

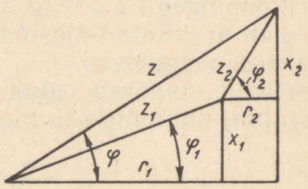
Ahela kogutakistust

$$z = \sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_{L1} + x_{L2})^2} \qquad (4\text{-}39)$$

kujutab graafiliselt resulteeriva takistuskolmnurga hüpotenuus (joon. 4-24). Selle kolmnurga võib saada pingete vektordiagrammist, kui selles esinevad suurused jagada vooluga I.



Joon. 4-23. Joonisel 4-22 kujutatud vooluahela vektordiagramm.



Joon. 4-24. Joonisel 4-22 kujutatud vooluahela takistuskolmnurk.

Ahela pinge ja voolu vahelise nihkenurga saab määrata vektordiagrammist või takistuskolmnurgast kas tangensi kaudu:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x_{L1} + x_{L2}}{r_1 + r_2}$$

või koosinuse kaudu:

$$\cos \varphi = \frac{r_1 + r_2}{z}. \qquad (4\text{-}40)$$

Ahela keskmine võimsus (aktiivvõimsus)

$$P = P_1 + P_2 = UI \cos \varphi,$$

sest

$$P_1 + P_2 = U_1 I \cos \varphi_1 + U_2 I \cos \varphi_2 = \\ = U_{a1} I + U_{a2} I = I(U_{a1} + U_{a2}).$$

Analoogiliselt reaktiivvõimsus

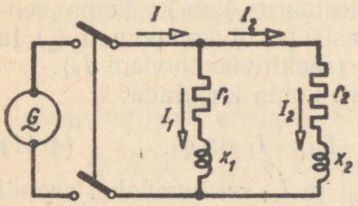
$$Q = UI \sin \varphi.$$

Ahela näivvõimsus

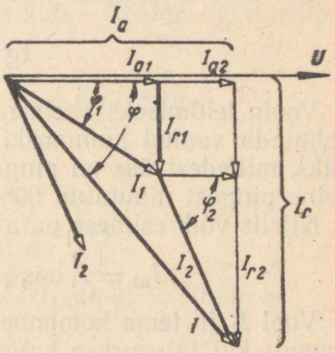
$$S = UI.$$

4-10. Aktiiv- ja induktiivtakistus hargnevas ahelas

Joonisel 4-25 on kujutatud kahe paralleelharuga ahel, kusjuures kumbki haru omab aktiiv- ja induktiivtakistust. Kui sel-



Joon. 4-25. Aktiivtakistuse ja induktiivsusega hargnev vooluahel.



Joon. 4-26. Joonisel 4-25 kujutatud vooluahela vektordiagramm.

line ahel lülitada siinuselise pingega võrku, siis vool esimeses paralleelharus

$$I_1 = \frac{U}{z_1},$$

kus

$$z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_{L1}^2}$$

on esimese haru kogutakistus.

See vool on pingest taga nurga võrra (joon. 4-26), mille tangens

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{x_{L1}}{r_1}.$$

Vool teises paralleelharus

$$I_2 = \frac{U}{z_2},$$

kus

$$z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_{L2}^2}$$

on teise paralleelharu kogutakistus.

See vool on pingest taga nurga võrra, mille tangens

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{x_{L2}}{r_2}.$$

Voolu leidmiseks ahela mittehargnevas osas on otstarbekas lahutada voolud kummaski paralleelharus kaheks komponendiks, milledest üks on pingega faasis (aktiivkomponent I_a) ja teine pingest nihutatud 90° võrra (reaktiivkomponent I_r).

Niisiis võib esimese paralleelharu kohta kirjutada:

$$I_{a1} = I_1 \cos \varphi_1 \quad \text{ja} \quad I_{r1} = I_1 \sin \varphi_1. \tag{4-41}$$

Vool I_1 ja tema komponendid I_{a1} ja I_{r1} on omavahel seotud samuti kui täisnurkse kolmnurga külgede pikkused (joon. 4-26):

$$I_1 = \sqrt{I_{a1}^2 + I_{r1}^2}. \tag{4-42}$$

Voolukolmnurga konstrueerimisel joonestatakse voolu aktiivkomponendi vektor pingevektoriga ühes suunas. Voolu reaktiivkomponendi vektor joonestatakse pingevektori suhtes 90° nurga all kellaosuti liikumise suunas.

Teise paralleelharu kohta võib kirjutada:

$$I_{a2} = I_2 \cos \varphi_2; \quad I_{r2} = I_2 \sin \varphi_2; \quad I_2 = \sqrt{I_{a2}^2 + I_{r2}^2}.$$

Kuna voolu aktiivkomponendid on pingega faasis, siis nende algebraline summa võrdub koguvoolu aktiivkomponendiga:

$$I_a = I_{a1} + I_{a2}. \tag{4-43}$$

Et voolu reaktiivkomponendid on pinge suhtes nihutatud 90°, siis nende voolukomponentide algebraline summa võrdub koguvoolu reaktiivkomponendiga.

Niisiis meie juhul (joon. 4-26):

$$I_r = I_{r1} + I_{r2}. \tag{4-44}$$

Vool ahela mittehargnevas osas (koguvool)

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}.$$

Selle voolu nihkenurga pinge suhtes võib leida tangensi kaudu:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{I_r}{I_a}.$$

Ahela aktiivvõimsus leitakse üksikute harude aktiivvõimsuste summana:

$$P = P_1 + P_2 = UI_1 \cos\varphi_1 + UI_2 \cos\varphi_2,$$

või otsekohe valemi järgi:

$$P = UI \cos\varphi.$$

Analoogiliselt ahela reaktiivvõimsus

$$Q = Q_1 + Q_2 = UI_1 \sin\varphi_1 + UI_2 \sin\varphi_2 = UI \sin\varphi.$$

Ahela näivvõimsus

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = UI.$$

Näide 4-5. On antud kahest paralleelharust koosnev vooluahel (joon. 4-25). Esimese haru takistused: $r_1 = 3\,\Omega$ ja $x_{L1} = 2\,\Omega$; teise haru takistused: $r_2 = 1\,\Omega$ ja $x_{L2} = 3\,\Omega$. Ahel on lülitatud vahelduvvooluvõrku pingega 115 V. Leida voolud harudes ja ahela mittehargnevas osas.

Vool esimeses harus

$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{115}{\sqrt{3^2 + 2^2}} = \frac{115}{3{,}6} = 32\text{ A};$$

vool teises harus

$$I_2 = \frac{U}{z_2} = \frac{115}{\sqrt{1^2 + 3^2}} = \frac{115}{3{,}16} = 36{,}4\text{ A}.$$

$$\cos\varphi_1 = \frac{r_1}{z_1} = \frac{3}{3{,}6} = 0{,}833; \quad \sin\varphi_1 = \frac{x_{L1}}{z_1} = \frac{2}{3{,}6} = 0{,}555;$$

$$\cos\varphi_2 = \frac{r_2}{z_2} = \frac{1}{3{,}16} = 0{,}317; \quad \sin\varphi_2 = \frac{x_{L2}}{z_2} = \frac{3}{3{,}16} = 0{,}95$$

Esimese haru voolu komponendid:

$$I_{a1} = I_1 \cos\varphi_1 = 32 \cdot 0{,}833 = 26{,}6\text{ A};$$
$$I_{r1} = I_1 \sin\varphi_1 = 32 \cdot 0{,}555 = 17{,}7\text{ A}.$$

Teise haru voolu komponendid:

$$I_{a2} = I_2 \cos\varphi_2 = 36{,}4 \cdot 0{,}317 = 11{,}5\text{ A};$$
$$I_{r2} = I_2 \sin\varphi_2 = 36{,}4 \cdot 0{,}95 = 34{,}5\text{ A}.$$

Ahela mittehargneva osa voolu komponendid:

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} = 26{,}6 + 11{,}5 = 38{,}1 \text{ A};$$
$$I_r = I_{r1} + I_{r2} = 17{,}7 + 34{,}5 = 52{,}2 \text{ A}.$$

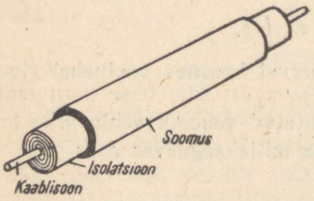
Koguvool

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} = \sqrt{38{,}1^2 + 52{,}2^2} = 64{,}7 \text{ A}.$$

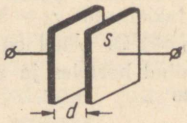
4-11. Mahtuvus

Kaht elektrijuhti, mis on teineteisest eraldatud dielektrikuga, nimetatakse k o n d e n s a a t o r i k s.

Kondensaatori moodustavad näiteks kaks paralleelset juhet, isolatsioonikihiga kaetud silindriline juhe, mille isolatsiooni ümbritseb metallkate (kaabel, joon. 4-27) või kaks paralleelset



Joon. 4-27. Kaabel.



Joon. 4-28. Tasapinnaline kondensaator.



Joon. 4-29. Kondensaatori tingmärk.

metallplaati (tasapinnaline kondensaator, joon. 4-28). Skeemides kasutatav kondensaatori tingmärk on kujutatud joonisel 4-29.

Kui lülitada kondensaator alalisvooluvõrku, siis tekivad tema elektroodidele vastasmärgilised laengud, mis on suuruselt teineteisega võrdsed ja võrdelised rakendatud pingega.

Kondensaatori omadus salvestada elektrilaenguid on tingitud tema mahtuvusest.

Kondensaatori m a h t u v u s e k s (tähis C) nimetatakse konstantset suurust, mis võrdub kondensaatori ühe elektroodi laengu ja kondensaatori klemmidele rakendatud pinge suhtega.

Niisiis mahtuvus

$$C = \frac{Q}{U}. \qquad (4\text{-}45)$$

Kondensaatori mahtuvuse ühikuks on farad (F). Kondensaatori mahtuvus on 1 F, kui 1 V pinge korral salvestub kondensaatori kummalegi elektroodile laeng 1 C, s. o.

$$1\ \mathrm{F} = \frac{1\ \mathrm{C}}{1\ \mathrm{V}}.$$

Praktikas kasutatakse peamiselt väiksemaid ühikuid — mikrofaradit (μF), nanofaradit (nF) ja pikofaradit (pF), kusjuures

$$1\ \mu\mathrm{F} = 10^{-6}\ \mathrm{F};$$
$$1\ \mathrm{nF} = 10^{-9}\ \mathrm{F};$$
$$1\ \mathrm{pF} = 10^{-12}\ \mathrm{F}.$$

Kondensaatori mahtuvus sõltub elektroodide kujust ja mõõdetest, nende vastastikusest asendist ja elektroode eraldava dielektriku omadustest.

Näiteks tasapinnalise kondensaatori mahtuvus

$$C = \varepsilon \frac{S}{d}, \qquad (4\text{-}46)$$

kus S — ühe elektroodi pindala m²;
d — elektroodidevaheline kaugus m;
ε — dielektriku dielektriline läbitavus F/m.

Erisuguste ainete dielektriline läbitavus on erinev. Tühja ruumi (vaakuumi) ja õhu dielektriline läbitavus

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{36 \cdot 10^9 \pi}\ \mathrm{F/m}.$$

Isoleerainete dielektriline läbitavus leitakse tavaliselt korrutisega $\varepsilon_0\varepsilon_r$, kus ε_r on suhteline dielektriline läbitavus, mis näitab, mitu korda antud aine dielektriline läbitavus on suurem tühja ruumi läbitavusest. Näitena on allpool antud ε_r väärtused mõnede ainete kohta: õhk — 1, mineraalõli — 2,2, vilgukivi — 6, portselan — 5,8, paber — 4,3.

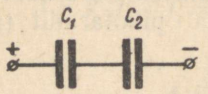
Kondensaatoreid võib ühendada järjestikku, paralleelselt või rühmiti.

Järjestikku-ühenduse korral on kõigi kondensaatorite elektroodidel ühesuurused laengud, sest vooluallikast antakse laengud ainult välistele elektroodidele. Sisemistel elektroodidel moodustuvad laengud ainult varem üksteist neutraliseerinud laengute eraldumise arvel.

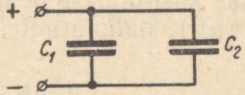
Kui tähistada iga elektroodi laengut tähega Q, siis võib kirjutada:

$$U_1 = \frac{Q}{C_1} \text{ ja } U_2 = \frac{Q}{C_2},$$

s. t. erineva mahtuvusega kondensaatorite klemmidel kujunevad erinevad pinged.



Joon. 4-30. Kondensaatorite järjestikku-ühendus.



Joon. 4-31. Kondensaatorite paralleelühendus.

Väljendades pinge ahela klemmidel üksikute kondensaatorite klemmidel esinevate pingete kaudu:

$$U = U_1 + U_2$$

ja, asendades pinged laengute ja mahtuvuste suhetega, saame:

$$\frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2}.$$

Taandades Q-ga, saame:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2},$$

millest kahe järjestikku ühendatud kondensaatori üldine mahtuvus

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}. \qquad (4\text{-}47)$$

P a r a l l e e l ü h e n d u s e korral on kõigi kondensaatorite klemmidel ühesuurused pinged, laengud aga on üldjuhul erineva suurusega:

$$Q_1 = C_1 U \text{ ja } Q_2 = C_2 U.$$

Kõigi paralleelselt ühendatud kondensaatorite üldine laeng võrdub üksikute kondensaatorite laengute summaga, s. t.

$$Q = Q_1 + Q_2,$$

millest üldine mahtuvus

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{Q_1 + Q_2}{U} = C_1 + C_2, \qquad (4\text{-}48)$$

s. t. võrdub üksikute kondensaatorite mahtuvuste summaga.

Näide 4-6. Leida kahe kondensaatori üldine mahtuvus nende järjestikku- ja paralleelühenduse korral, kui $C_1 = 2\ \mu F$ ja $C_2 = 4\ \mu F$.

Mahtuvus järjestikku-ühenduse korral

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{2 \cdot 4}{2 + 4} = 1{,}33\ \mu F.$$

Mahtuvus paralleelühenduse korral

$$C = C_1 + C_2 = 2 + 4 = 6\ \mu F.$$

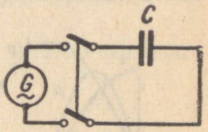
4-12. Mahtuvus vahelduvvooluahelas

Joonisel 4-32 on kujutatud mahtuvusega vahelduvvooluahel, kus kondensaatori klemmidele on rakendatud pinge

$$u = U_m \sin \omega t.$$

Elektrilaeng kondensaatori klemmidel muutub võrdeliselt pingega, s. t.

$$q = Cu = CU_m \sin \omega t.$$



Joon. 4-32. Mahtuvusega vooluahel.

Vool kondensaatori ahelas

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

s. t. vool on võrdeline kondensaatori laengu muutumise kiirusega ehk kondensaatori klemmidele rakendatud pinge muutumise kiirusega.

Siinuselise pinge muutumise kiirus on suurim hetkel, kui pinge muudab märki (läbib nullväärtuse); järelikult sel hetkel on vool maksimaalne. Kui aga vool läbib maksimaalväärtuse, on pinge muutumise kiirus null ja järelikult ka vool ahelas sel hetkel puudub.

Vool kondensaatori ahelas on siinuseline, sest

$$\frac{du}{dt} = U_m \frac{d \sin \omega t}{dt} = U_m\, \omega \cos \omega t$$

ja järelikult

$$i = C\frac{du}{dt} = \omega C U_m \cos \omega t = I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \qquad (4\text{-}49)$$

Võrrandist (4-49) järeldub, et vool on pingest nurga $\frac{\pi}{2}$ võrra ees. Voolu maksimaalväärtus

$$I_m = U_m C\omega. \qquad (4\text{-}50)$$

Jagades selle avaldise mõlemad pooled $\sqrt{2}$, saame

$$I = UC\omega$$

ehk

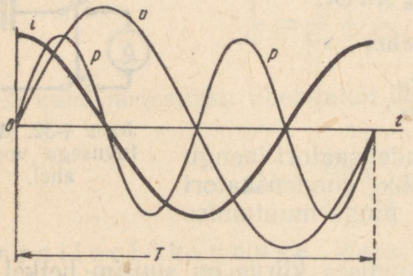
$$I = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}} = \frac{U}{x_c}. \qquad (4\text{-}51)$$

Suurust

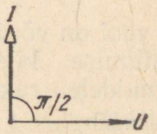
$$x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \qquad (4\text{-}52)$$

nimetatakse mahtuvuslikuks reaktiivtakistuseks ehk mahtuvustakistuseks.

Joonisel 4-33 on kujutatud mahtuvusega ahelas esineva pinge ja voolu kõverad sõltuvalt ajast, joonisel 4-34 aga selle ahela vektordiagramm.



Joon. 4-33. Vool, pinge ja võimsus mahtuvusega ahelas.



Joon. 4-34. Mahtuvusega ahela vektordiagramm.

Võimsuse hetkväärtus mahtuvusega ahelas

$$p = ui = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = UI \sin 2\omega t. \qquad (4\text{-}53)$$

Perioodi esimeses ja kolmandas veerandis on võimsus positiivne (joon. 4-33), kondensaator töötab tarbijana, pinge tema klemmidel tõuseb väärtuseni U_m. kondensaator laadub ja tema elektroodide vahel tekib elektriväli, milles generaatorist saadava energia arvel salvestuva energia hulk suureneb.

Lõpmatult lühikese ajavahemiku dt vältel salvestub kondensaatorisse energia

$$dW = p\,dt;$$

veerandperioodi vältel aga, mille jooksul pinge muutub nullist kuni maksimaalväärtuseni U_m, salvestub kondensaatoris energia

$$W_C = \frac{CU_m^2}{2} = CU^2 \qquad (4\text{-}54)$$

[valemi (4-54) tuletamise käik on analoogiline valemi (3-34) tuletamisega].

Teise ja neljanda veerandperioodi vältel on võimsuse hetkväärtus negatiivne, kondensaator töötab generaatorina; pinge kondensaatori klemmidel langeb maksimaalväärtuselt U_m nullini, kondensaator tühjeneb ja elektrivälja energia väheneb väärtuselt W_C nullini, suundudes võrku (generaatorisse) tagasi. Kondensaatori poolt poolperioodi vältel saadud energia võrdub nulliga ja järelikult võrdub nulliga ka kondensaatori võimsus.

Võimsuse maksimaalväärtust mahtuvusega ahelas nimetatakse r e a k t i i v v õ i m s u s e k s:

$$Q = UI = U^2\omega C = W_C\,\omega.$$

Näide 4-7. Kondensaator mahtuvusega 38,5 μF on lülitatud võrku pingega 240 V ja sagedusega 50 Hz. Leida x_C, I ja W_C.

Mahtuvuslik reaktiivtakistus

$$x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 38{,}5 \cdot 10^{-6}} = \frac{10^6}{1200} = 80\ \Omega.$$

Vool ahelas

$$I = \frac{U}{x_C} = \frac{240}{80} = 3\ \text{A}.$$

Kondensaatoris salvestuv energia

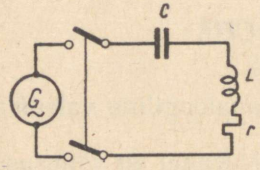
$$W_C = CU^2 = 38{,}5 \cdot 10^{-6} \cdot 240^2 = 2{,}2\ \text{J}.$$

4-13. Pingeresonants

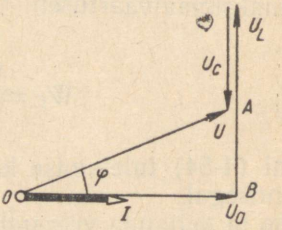
Joonisel 4-35 on kujutatud järjestikku ühendatud aktiivtakistusest, induktiivsusest ja mahtuvusest koosnev vooluahel, mida läbib siinuseline vool

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

Üldine pinge ahela klemmidel koosneb kolmest komponendist: aktiivpingest U_a, mis on vooluga faasis, induktiivpin-



Joon. 4-35. Aktiivtakistuse, induktiivsuse ja mahtuvuse järjestikkuühendus.



Joon. 4-36. Vektordiagramm.

gest U_L, mis on voolust 90° võrra ees, ja mahtuvuspingest U_C, mis on voolust 90° võrra taga. Joonisel 4-36 on kujutatud sellise ahela vektordiagramm, kus vektorid U_a, U_L ja U_C on nihutatud vooluvektorist vastavate faasinihete võrra. Täisnurksest kolmnurgast OAB järeldub, et üldine pinge

$$U = \sqrt{U^2 + (U_L - U_C)^2}. \qquad (4\text{-}55)$$

Üldise pinge faasinihe voolu suhtes leitakse valemiga:

$$tg\,\varphi = \frac{U_L - U_C}{U_a}. \qquad (4\text{-}56)$$

Üldine pinge on voolust taga nurga φ võrra, kui $U_C > U_L$, on voolust ees, kui $U_L > U_C$ ja, lõpuks, on vooluga faasis, kui $U_L = U_C$.

Ahela kogutakistus

$$z = \frac{U}{I} = \sqrt{r^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}, \qquad (4\text{-}57)$$

sest

$$\frac{U_a}{I} = r; \frac{U_L}{I} = \omega L; \quad \frac{U_C}{I} = \frac{1}{\omega C}.$$

Kui $\omega L = \frac{1}{\omega C}$, siis esineb ahelas pingeresonants. Sel juhul on ahela kogutakistus minimaalne ja võrdub aktiivtakistusega, s. t.

$$z = r,$$

voolu efektiivväärtus aga saavutab suurima võimaliku väärtuse (antud pinge korral).

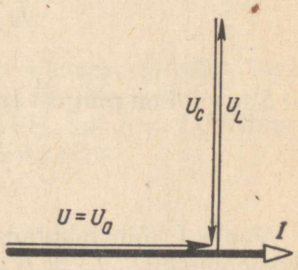
Sel juhul on induktiivpinge U_L ja mahtuvuspinge U_C suuruselt võrdsed, kuid on faasis nihutatud nurga π võrra (s. o. 180°) ja pinge ahela klemmidel võrdub aktiivpingega $U = U_a$ (joon. 4-37).

Ahela klemmidele rakendatud pinge U ja ühel reaktiivtakistusel esineva pinge (näiteks U_L) suhe

$$\frac{U}{U_L} = \frac{Iz}{Ix_L} = \frac{z}{x_L} = \frac{r}{x_L},$$

millest

$$U_L = U\frac{x_L}{r}.$$



Joon. 4-37. Vektordiagramm pingeresonantsi korral.

Kui $x_L > r$, siis on pinge U_L (ja samuti viimasega võrdne pinge U_C) üldisest pingest $\frac{x_L}{r}$ korda suurem.

Niisiis pingeresonantsi puhul võivad pinged üksikutel ahelaosadel tunduvalt ületada ahela klemmidele rakendatud pinge.

Et pinged U_L ja U_C on võrdsed ja faasis nihutatud poolperioodi võrra, siis on mahtuvusel ja induktiivsusel esinevate pingete hetkväärtused igal hetkel suuruselt võrdsed, kuid märgilt vastassuunalised ($u_L = -u_C$); seetõttu on võimsuste hetkväärtused reaktiivtakistustes samuti igal hetkel suuruselt võrdsed ja märgilt vastupidised:

$$p_L = -p_C$$
$$(p_L = iu_L \quad \text{ja} \quad p_C = iu_C).$$

Sellest saab teha järelduse, et magnetvälja energia suurenemine toimub eranditult elektrivälja energia arvel ja vastupidi; generaatori ülesandeks jääb ainult aktiivtakistuses esineva energiakulu katmine.

Seega iseloomustab pingeresonantsi perioodiline energia vahetus magnetvälja ja elektrivälja vahel.

4-14. Vooluresonants

Suure praktilise tähtsusega on vooluahel, mis koosneb paralleelselt ühendatud poolist ja kondensaatorist (joon. 4-38), mis on seejuures ühise pinge all.

Pooli läbiva voolu efektiivväärtus

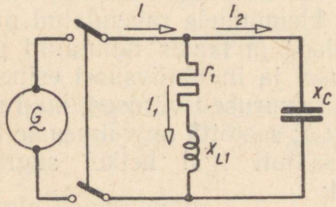
$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{U}{\sqrt{r_1^2 + x_{L1}^2}}.$$

See vool on pingest taga nurga võrra, mis leitakse valemist:

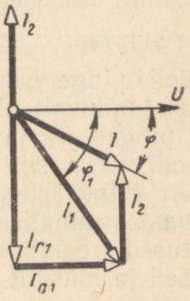
$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{x_{L1}}{r_1}.$$

Voolu I võib lahutada kaheks komponendiks, nimelt aktiivkomponendiks $I_{a1} = I_1 \cos \varphi_1$ ja reaktiivkomponendiks $I_{r1} = I_L = I_1 \sin \varphi_1$.

Kondensaatorit läbiv vool I_2 on ahelale rakendatud pingest ees nurga $\frac{\pi}{2}$ võrra ja tema väärtus



Joon. 4-38. Aktiivtakistuse, induktiivsuse ja mahtuvusega hargnev vooluahel.



Joon. 4-39. Joonisel 4-38 kujutatud vooluahela vektordiagramm.

$$I_2 = \frac{U}{x_2} = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}} = U\omega C = I_C.$$

Üldise voolu määramiseks vaatleme vektordiagrammi (joon. 4-39), mille järgi vool I leitakse voolude I_1 ja I_2 geomeetrilise summana. See vool

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2},$$

kus

$$I_a = I_{a1} \quad \text{ja} \quad I_r = I_L - I_C.$$

Üldise voolu faasinihe pinge suhtes leitakse valemist:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_2}{I_a} = \frac{I_L - I_C}{I_{a1}}.$$

Vool ahela mittehargnevas osas on üldisest pingest taga nurga φ võrra, kui $I_L > I_C$, on sellest pingest ees, kui $I_L < I_C$ või, lõpuks, on pingega faasis (joon. 4-40), kui $I_L = I_C$. Viimasel juhul esineb ahelas v o o l u r e s o n a n t s.

Resonantsi olukorras üldine vool

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} = I_a \quad \text{ja} \quad P = UI,$$

sest $\varphi = 0$ ja $\cos \varphi = 1$.

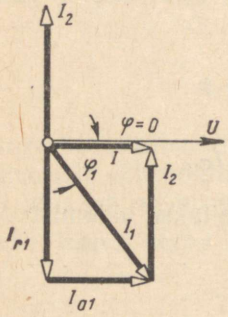
Seega võrdub üldine vool pooli läbiva voolu aktiivkomponendiga. Seejuures on üldine vool väiksem pooli läbivast voolust.

Järelikult kui viia ahelas $\cos \varphi$ üheni, siis väheneb tarbija võimsuse muutumatuks jäädes vool tarbijat (meie juhul pooli) võrguga ühendavates juhtmetes; järelikult väheneb vool ka võrgus ning võrku toitvates transformaatorites ja generaatorites.

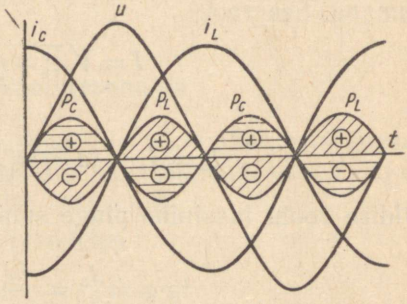
Et sellest nähtusest paremini aru saada, meenutame, et voolu tugevnemisel tarbib pool energiat magnetvälja ülesehitamiseks ja voolu nõrgenemisel ning magnetvälja kadumisel annab selle energia uuesti tagasi. Kondensaatoris aga kulutatakse energiat tema klemmidele rakendatava pinge tõusmisel ja antakse tagasi selle alanemisel.

Lihtsustamiseks eeldame, et pooli aktiivtakistus on väga väike, nii et selle võib jätta arvesse võtmata. Sel juhul jääb pooli läbiv vool pingest maha 90°. Joonisel 4-41 on kujutatud

kondensaatori ja pooli võimsuste hetkväärtuste p_C ja p_L kõverad. Kaldjoontega viirutatud pinnad kujutavad energiat, mis kulutatakse magnetvälja ülesehitamiseks (+) ja antakse tagasi välja kadumisel (—).



Joon. 4-40. Vektordiagramm vooluresonantsi korral.



Joon. 4-41. Voolud, pinge ja võimsus vooluresonantsi korral.

Horisontaaljoontega viirutatud pindalad kujutavad energiat, mis kulutatakse kondensaatori laadimiseks (+) ja vabaneb selle tühjenemisel (—). Jooniselt selgub, et sel ajal, kui poolis kulutatakse energiat magnetvälja tekitamiseks, vabaneb kondensaatori tühjenemisel just sama hulk energiat ja vastupidi. Järelikult sel juhul ei tsirkuleeri energia mitte voolualiika ja tarbija vahel, vaid ainult ahela paralleelharude vahel. Sellega cngi seletatav voolu vähenemine toitejuhtmetes.

4-15. Võimsustegur ja selle osatähtsus

Me juba märkisime (§ 4-8), et generaator, transformaator, kaabel jne. valmistatakse nimivooludele ja -pingetele.

Generaatori võimsust kasutatakse kõige täielikumalt juhul, kui ta töötab nimipingega, tarbitav vool võrdub tema nimivooluga ja tarbitava võimsuse $\cos\varphi = 1$, sest sel juhul arendab generaator suurimat aktiivvõimsust, mis võrdub tema näivvõimsusega:

$$P = U_n I_n \cos\varphi = U_n I_n. \qquad (4\text{-}58)$$

Kui generaator töötab nimipinge ja -vooluga, kuid sõltuvalt elektrienergia tarbijast muutuva võimsusteguriga, siis on generaatori aktiivvõimsus võrdeline võimsusteguriga. Järelikult, mida väiksem on cos φ, seda väiksema osa generaatori või transformaatori võimsusest saab ära kasutada.

Teisest küljest, kui elektrienergia tarbija töötab konstantse aktiivvõimsusega ja konstantsel pingel, kuid muutuva võimsusteguriga, siis on tarbija vool pöördvõrdeline võimsusteguriga. Niisiis cos φ vähenemisel tarbija vool suureneb.

Vool, läbides generaatori mähiseid ja generaatorit tarbijaga ühendavaid juhtmeid, põhjustab nende soojenemist, millega kaasuvad energiakaod. Juhul kui tarbija töötab konstantse aktiivvõimsusega, kuid muutuva võimsusteguriga, siis cos φ vähenemisel võimsuskaod generaatoris ja ühendusjuhtmetes suurenevad.

Kuna väike võimsustegur, ühest küljest, ei võimalda täielikult ära kasutada elektrijaama installeeritud (ülesseatud) võimsust ja, teisest küljest, põhjustab energiakadude suurenemist, siis tavaliselt püütakse hoida tarbijaseadmete võimsustegur võimalikult lähemal ühele.

Asünkroonmootorite võimsustegur sõltub koormusest. Mootori tühijooksul on võimsustegur 0,1—0,3, nimikoormusel aga 0,83—0,85. Võimsusteguri suurendamiseks üle selle piiri lülitatakse paralleelselt mootoriga kondensaatorid.

Elektriseadmete võimsusteguri parandamine (lähendamine ühele) on tähtis rahvamajanduslik probleem. NSV Liidu elektrifitseerimise praeguse taseme juures võimaldab võimsusteguri parandamine kokku hoida miljoneid kilovatt-tunde elektrienergiat, mis muidu läheks kaduma võrkudes, ja võimaldab paremini ära kasutada transformaatorite ja elektrijaamade generaatorite installeeritud võimsust.

Näide 4-8. Elektrimootor töötab võimsusega 10 kW pingel $U = 240$ V võimsusteguriga $\cos \varphi = 0{,}6$. Võrgupinge sagedus on 50 Hz. Leida kondensaatori mahtuvus, mis tuleb lülitada paralleelselt mootoriga, et suurendada tema võimsustegurit 0,9-ni.

Mootori poolt tarbitav vool, kui $\cos \varphi_1 = 0{,}6$,

$$I_1 = \frac{P}{U \cos \varphi_1} = \frac{10\,000}{240 \cdot 0{,}6} = 69 \text{ A}.$$

Trigonomeetriliste funktsioonide tabelist leiame, et $\cos \varphi_1 = 0{,}6$ korral

$$\varphi_1 = 50°10' \quad \text{ja} \quad \sin \varphi = 0{,}8.$$

Mootori voolu reaktiivkomponent

$$I_{r1} = I_1 \sin \varphi_1 = 69 \cdot 0{,}8 = 55{,}5 \text{ A}.$$

Kui paralleelselt mootoriga on lülitatud kondensaator, siis $\cos\varphi = 0{,}9$, millele vastab

$$\varphi = 26^\circ 50' \quad \text{ja} \quad \sin\varphi = 0{,}436.$$

Võrgust tarbitav vool

$$I_2 = \frac{P}{U\cos\varphi} = \frac{10\,000}{240 \cdot 0{,}9} = 46{,}2 \text{ A}.$$

Sel juhul voolu reaktiivkomponent

$$I_{r2} = I_2 \sin\varphi = 46{,}2 \cdot 0{,}436 = 20{,}2 \text{ A}.$$

Voolu reaktiivkomponendi vähenemine kondensaatori juurdelülitamisel võrdub kondensaatori vooluga I_C:

$$I_C = I_{r1} - I_{r2} = 55{,}5 - 20{,}2 = 35{,}3 \text{ A}.$$

Kondensaatori reaktiivtakistus

$$x_C = \frac{U}{I_C} = \frac{240}{35{,}3} = 6{,}8 \ \Omega.$$

Kuna

$$x_C = \frac{1}{\omega C},$$

siis

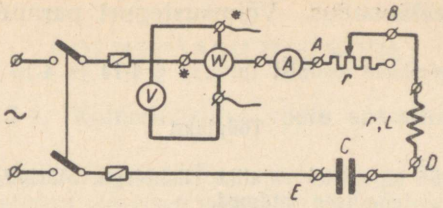
$$C = \frac{1}{x_C \omega} = \frac{1}{6{,}8 \cdot 2\pi \cdot 50} = 0{,}00046 \text{ F} = 460 \ \mu\text{F}.$$

4-16. Laboratoorne töö. Aktiivtakistuse, induktiivsuse ja mahtuvusega vahelduvvooluahel

Enne töö tegemisele asumist tutvuda raamatu lõpus toodud lisaga ja § 4-13.

Tööplaan

1. Tutvuda töö tegemisel vajalike mõõteriistade ja seadmetega. Märkida üles nende tehnilised põhiandmed.
2. Koostada skeem (joon. 4-42) ja lasta see juhendajal kontrollida.
3. Mahtuvuse või induktiivsuse muutmisega luua olukord, et $x_L > x_C$, mõõta pinge ja aktiivvõimsus ahela igas osas (punktide *AB*, *BD* ja *DE* vahel) kogu ahelas (punktide *AE* vahel).
4. Saadud andmete põhjal leida ahela iga osa ja kogu ahela kohta



Joon. 4-42. Skeem laboratoorse töö tegemiseks.

$$r = \frac{P}{I^2};\ z = \frac{U}{I};\ x = \sqrt{z^2 - r^2};\ U_a = Ir;$$

$$U_r = Ix;\quad \operatorname{tg}\varphi = \frac{x}{r}.$$

5. Mõõtmis- ja arvutustulemused märkida tabelisse 4-1.

6. Saadud andmete põhjal ehitada mastaabis pingete vektordiagramm ja takistuskolmnurk.

7. Luua olukord, et $x_L = x_C$ (voolu suurima väärtuse järgi ahelas) ja selle juhu kohta (pingeresonants) korrata kõik ülalnimetatud mõõtmised ja arvutused. Mõõtmis- ja arvutustulemused märkida tabelisse 4-1.

8. Saadud andmete põhjal ehitada mastaabis pingete vektordiagramm ja takistuskolmnurk.

9. Korrata kõik mõõtmised ja arvutused, kui $x_L < x_C$. Tulemused kanda tabelisse 4-1. Ehitada mastaabis pingete vektordiagramm ja takistuskolmnurk.

Tabel 4-1

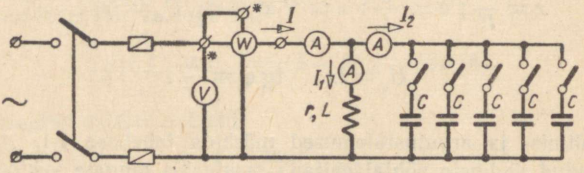
Jrk. nr.	Valiekord	Ahela osa	U V	I A	P W	r Ω	z Ω	x Ω	U_a V	U_r V	tg φ —	φ —
1.	$x_L > x_C$	Reostaat										
		Pool										
		Kondensaator										
		Kogu ahel										
2.	$x_L = x_C$	Reostaat										
		Pool										
		Kondensaator										
		Kogu ahel										
3.	$x_L < x_C$	Reostaat										
		Pool										
		Kondensaator										
		Kogu ahel										

4-17. Laboratoorne töö. Pooli ja kondensaatori paralleelühendus. Võimsusteguri parandamine

Enne töö tegemisele asumist tutvuda § 4-14 ja 4-15 sisuga.

Tööplaan

1. Tutvuda töö tegemisel vajalike riistadega. Märkida üles mõõteriistade ja seadmete tehnilised andmed.
2. Koostada skeem (joon. 4-43) ja lasta see juhendajal kontrollida.
3. Suurendades kondensaatori mahtuvust (pooli induktiiv- ja aktiivtakistuse muutumatuks jäädes), märkida üles mõõteriistade näidud. Saadud andmete alusel leida z_1, x_C, I_{a1}, I_{r1}, $\cos\varphi_1$, $\sin\varphi_1$, $\cos\varphi$, φ.



Joon. 4-43. Skeem laboratoorse töö tegemiseks.

Mõõteriistade näidud ja arvutustulemused kirjutada tabelisse 4-2.

4. Katse andmetel ehitada graafikud

$$I_1 = f(x_C);\ I_2 = f(x_C);\ I = f(x_C) \quad \text{ja} \quad \cos\varphi = f(x_C).$$

5. Kolme juhu kohta, kui $I_{r1} > I_2$, $I_{r1} = I_2$ ja $I_{r1} < I_2$, ehitada mastaabis vektordiagrammid.

Tabel 4-2

U	I	I_1	I_2	P	z_1	x_C	I_{a1}	I_{r1}	$\cos\varphi$	φ
V	A	A	A	W	Ω	Ω	A	A	—	—

KOLMEFAASILINE VOOL

5-1. Kolmefaasilise voolu saamine

Vahelduvvoolu kolmefaasiline süsteem on laialdaselt levinud kogu maailmas, sest see võimaldab kõige soodsamalt energiat üle kanda ja luua töökindlaid ja lihtsa konstruktsiooniga elektrimootoreid, generaatoreid ja transformaatoreid.



Mihhail Ossipovitš Dolivo-Dobrovolski (1862—1919).

Kolmefaasilise voolu tehnika ja sellel põhineva elektrifitseerimise rajaja. Hiilgav teoreetik, andekas konstruktor, silmapaistev praktik elektrotehnika alal. Leiutas kolmefaasilise voolu, lõi kolmefaasilise asünkroonmootori, kolmefaasilise generaatori, kolmefaasilise transformaatori, rida elektrimasinate, aparaatide ja seadiste konstruktsioone; teostas esimesena elektrienergia ülekande kolmefaasilise voolu abil.

Kolmefaasilise voolu tehnika rajajaks ja selle teooria rakendajaks praktikas on M. O. Dolivo-Dobrovolski.

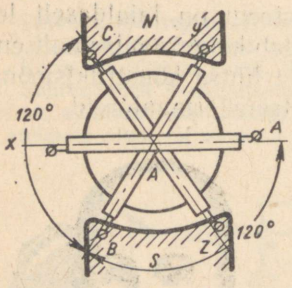
Kolmefaasiliseks süsteemiks nimetatakse sellist süsteemi, mis koosneb kolmest ühesuguse sagedusega vahelduvvooluahelast, kusjuures nende elektromotoorsed jõud on üksteisest faasist nihutatud ⅓ perioodi võrra. Kui seejuures elektromotoorsete jõudude amplituudid on omavahel võrdsed, siis nimetatakse süsteemi sümmeetriliseks.

Kolmefaasilise süsteemi iga üksikut ahelat nimetatakse faasiks.

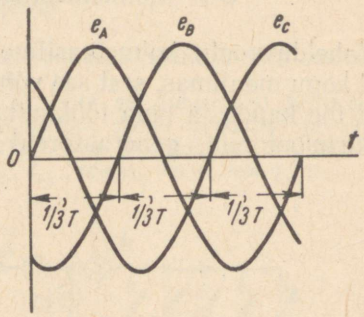
Joonisel 5-1 on skemaatiliselt näidatud lihtsaima kolmefaasilise generaatori ehitus. Elektromagneti pooluste NS vahel paikneb terassilinder, mille pinnale on kinnitatud kolm mähist (pooli), mis on üksteise suhtes ruumis pööratud mööda silindri

ümbermõõtu nurga $\frac{2}{3}\pi$ võrra. Magnetvälja tihedus muutub mööda silindri ümbermõõtu siinuseliselt.

Kui panna rootor (silinder koos mähistega) pöörlema konstantse kiirusega, siis indutseeritakse mähistes ühesuguse sage-



Joon. 5-1. Kolmefaasilise generaatori skeem.



Joon. 5-2. Kolmefaasilise süsteemi elektromotoorsete jõudude graafik.

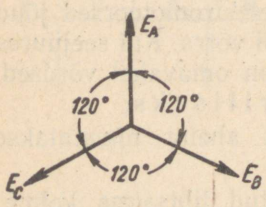
duse ja amplituudiga elektromotoorsed jõud, millede faasinihe üksteise suhtes on ⅓ perioodi.

Kui lugeda ajahetk, mil esimese faasi elektromotoorne jõud e_A läbib nullväärtuse, aja arvestamise alghetkeks, võib selle elektromotoorse jõu avaldada võrrandiga:

$$e_A = E_m \sin \omega t. \qquad (5\text{-}1)$$

Teise faasi elektromotoorne jõud, mis jääb esimese faasi elektromotoorsest jõust maha ⅓ perioodi võrra,

$$e_B = E_m \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right). \qquad (5\text{-}2)$$



Joon. 5-3. Kolmefaasilise generaatori elektromotoorsete jõudude vektordiagramm.

Kolmanda faasi elektromotoorne jõud, mis jääb teise faasi elektromotoorsest jõust maha ⅓ perioodi võrra,

$$e_C = E_m \sin\left(\omega t - \frac{4}{3}\pi\right) =$$

$$= E_m \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right). \qquad (5\text{-}3)$$

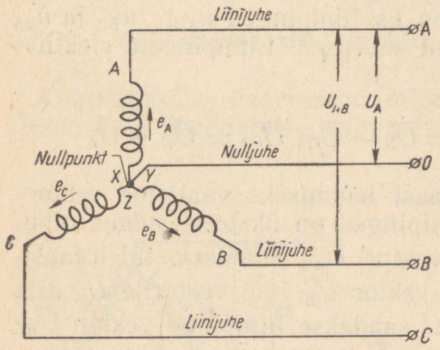
Joonistel 5-2 ja 5-3 on kujutatud nende elektromotoorsete jõudude kõverad ja vektordiagramm.

Lepime kokku tähistada faasimähiste algusi tähtedega *A*, *B* ja *C* ning lõppusid vastavalt tähtedega *X*, *Y* ja *Z* ning loeme, elektromotoorse jõu suuna generaatori faasimähistes lõpust algusesse positiivseks.

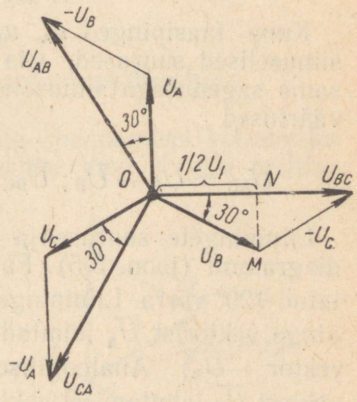
Kolmefaasilise generaatori iga mähis on iseseisev elektrienergia allikas ja võib toita omaette tarbijat. Sel juhul saadakse ühendamata kolmefaasiline süsteem, mis vajab energia ülekandmiseks kuut juhet. Praktikas niisuguseid süsteeme ei kasutata. Tavaliselt ühendatakse kolmefaasilise generaatori mähised t ä h t e või k o l m n u r k a.

5-2. Generaatori mähiste tähtühendus

Generaatori mähiste ühendamisel tähte (joon. 5-4) ühendatakse mähiste lõpud *X*, *Y* ja *Z* ühte punkti, mida nimetatakse generaatori n u l l p u n k t i k s ehk n e u t r a a l i k s.



Joon. 5-4. Generaatori mähiste tähtühendus.



Joon. 5-5. Faasi- ja liinipingete vektordiagramm generaatori mähiste tähtühenduse korral.

Generaatori ühendamiseks tarbijaga on sel juhul vaja nelja juhet. Nendest kolme juhet, mis on ühendatud mähiste algustega, nimetatakse l i i n i j u h t m e t e k s, nullpunktiga ühendatud juhet aga n u l l j u h t m e k s.

Pinget faasi lõpu ja alguse vahel ehk pinget ükskõik millise

liinijuhtme ja nulljuhtme vahel nimetatakse *faasipingeks* ja tähistatakse U_A, U_B ja U_C ehk üldiselt U_f. Pingelangu puudumisel generaatori mähistes on faasipinged võrdsed vastavate faaside elektromotoorsete jõududega.

Pinget mähiste alguste vahel ehk liinijuhtmete vahel nimetatakse *liinipingeks* ja tähistatakse U_{AB}, U_{BC} ja U_{CA} ehk üldiselt U_l.

Leiame seose liini- ja faasipingete vahel tähtühenduse korral. Kuna esimese faasi lõpp on ühendatud mitte teise faasi algusega, vaid selle lõpuga, mis on analoogiline kahe elektromotoorse jõu allika vastulülitusele alalisvoolu korral, siis liinipinge hetkväärtus u_{AB} võrdub vastavate faasipingete vahega, s. o.

$$u_{AB} = u_A - u_B;$$

analoogiliselt teiste liinipingete hetkväärtused

$$u_{BC} = u_B - u_C \quad \text{ja} \quad u_{CA} = u_C - u_A.$$

Kuna faasipinged u_A, u_B ja u_C on ühesuguse sagedusega siinuselised suurused, siis on ka liinipinged u_{AB}, u_{BC} ja u_{CA} sama sagedusega siinuselised suurused. Liinipingete efektiivväärtused

$$\overline{U}_{AB} = \overline{U}_A - \overline{U}_B;\ \overline{U}_{BC} = \overline{U}_B - \overline{U}_C;\ \overline{U}_{CA} = \overline{U}_C - \overline{U}_A.$$

Liinipingete suuruse ja faasi leidmiseks vaatleme vektordiagrammi (joon. 5-5). Faasipinged on üksteise suhtes nihutatud 120° võrra. Liinipinge vektori $\overline{U}_{AB}$ leidmiseks tuleb faasipinge vektorist $\overline{U}_A$ lahutada vektor $\overline{U}_B$ (või vektorile $\overline{U}_A$ liita vektor $-\overline{U}_B$). Analoogiliselt saadakse liinipinge vektor $\overline{U}_{BC}$ vektori $\overline{U}_C$ lahutamisel vektorist $\overline{U}_B$ ja liinipinge vektor $\overline{U}_{CA}$ — vektori $\overline{U}_A$ lahutamisel vektorist $\overline{U}_C$.

Kui tõmmata ükskõik millise faasipinge vektori (näiteks $\overline{U}_B$) otsepunktist ristsirge liinipinge vektorile $\overline{U}_{BC}$, siis saame täisnurkse kolmnurga *ONM*, millest järeldub, et

$$\frac{1}{2} U_l = U_f \cos 30° = U_f \frac{\sqrt{3}}{2},$$

millest

$$U_l = \sqrt{3} U_f. \qquad (5\text{-}4)$$

Sellest valemist ja vektordiagrammist (joon. 5-5) järeldub, et liinipinge efektiivväärtus on faasipingest $\sqrt{3}$ korda suurem ja et liinipinge U_{A3} on 30° võrra faasipingest U_A ees; samasuure nurga võrra on liinipinge U_{BC} ees faasipingest U_B ja liinipinge U_{CA} faasipingest U_C.

Liinipinged on üksteisest nihutatud sama nurga võrra (120°) kui faasipingedki. Liinipingete vektorite täht on pööratud faasipingete vektorite tähe suhtes positiivses suunas 30° võrra.

Tuleb silmas pidada seda, et saadud seos liinipingete ja faasipingete vahel kehtib ainult pingete s ü m m e e t r i l i s e süsteemi korral.

Näide 5-1. Leida generaatori liinipinge, kui faasipinge on 127 V. Liinipinge

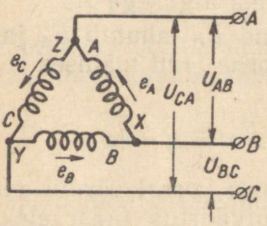
$$U_l = \sqrt{3} U_f = 1{,}73 \cdot 127 = 220 \text{ V}.$$

Kui faasipinge on 220 V, siis liinipinge

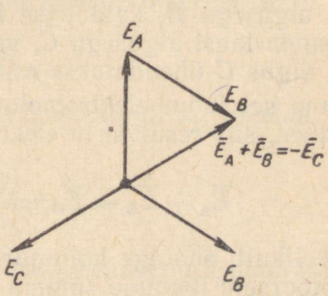
$$U_l = 1{,}73 \cdot 220 = 380 \text{ V}.$$

5-3. Generaatori mähiste kolmnurkühendus

Kolmefaasilise generaatori mähiste ühendamisel kolmnurka (joon. 5-6) ühendatakse esimese mähise lõpp X teise mähise



Joon. 5-6. Generaatori mähiste kolmnurkühendus.



Joon. 5-7. Generaatori elektromotoorsete jõudude vektordiagramm mähiste kolmnurkühenduse korral.

algusega B, teise mähise lõpp Y kolmanda mähise algusega C ja kolmanda mähise lõpp Z esimese mähise algusega A. Kolm liinijuhet ühendatakse faaside algustega A, B ja C.

Niisuguse ühenduse korral võrduvad faasipinged liinipingetega, s. o.

$$U_{AB} = U_A;\ U_{BC} = U_B \text{ ja } U_{CA} = U_C. \qquad (5\text{-}5)$$

Kolmnurkühenduse korral moodustavad generaatori kolm faasi väga väikese takistusega kinnise ahela. Selline ühendus on võimalik ainult sel juhul, kui selles ahelas mõjuvate elektromotoorsete jõudude summa võrdub nulliga, sest vastasel juhul tekiks mähistes isegi koormuse puudumisel tunduva suurusega vool, mis võib põhjustada generaatori ülekuumenemist.

Kolme sümmeetrilise elektromotoorse jõu summa on null. Selles on kerge veenduda, kui liita nende elektromotoorsete jõudude vektorid. Joonisel 5-7 on näidatud kolm elektromotoorsete jõudude vektorit. Liites vektori $\overline{E}_A$ ja $\overline{E}_B$, saame vektori, mis on võrdne ja vastassuunaline vektoriga $\overline{E}_C$, s. o.

$$\overline{E}_A + \overline{E}_B = -\overline{E}_C$$

ja kolme vektori summa

$$\overline{E}_A + \overline{E}_B + \overline{E}_C = -\overline{E}_C + \overline{E}_C = 0.$$

Väga ohtlik on generaatori mähiste ebaõige ühendamine kolmnurka, kui näiteks esimese faasi lõpp X ühendatakse teise faasi algusega B, kuid teise faasi lõpp Y ühendatakse mitte kolmanda faasi algusega C, vaid selle lõpuga Z, ja kolmanda faasi algus C ühendatakse esimese faasi algusega A.

Kuna sel juhul elektromotoorne jõud $\overline{E}_C$ lahutub $\overline{E}_A$ ja $\overline{E}_B$ summast, siis resulteeriv elektromotoorne jõud mähises

$$\overline{E}_A + \overline{E}_B - \overline{E}_C = -\overline{E}_C - \overline{E}_C = -2\overline{E}_C.$$

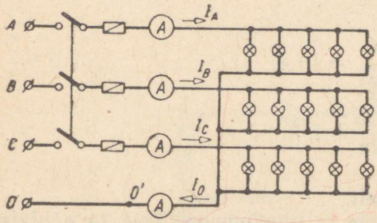
Järelikult, ebaõige kolmnurkühenduse korral võrdub elektromotoorsete jõudude summa absoluutväärtus faasi elektromotoorse jõu kahekordse väärtusega, mis generaatori mähiste väikese takistuse tõttu on samaväärne lühisega.

5-4. Tarbijate tähtühendus

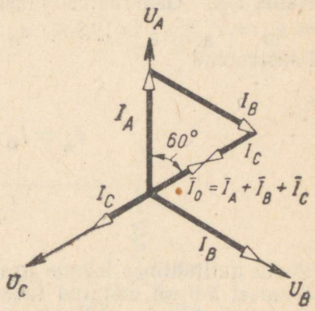
Elektrienergia tarbijaid võib samuti nagu generaatori mähiseidki ühendada tähte, kusjuures kolmefaasiline süsteem võib

olla neljajuhtmeline (valgustuskoormuse korral) või kolmejuhtmeline (jõukoormuse korral).

Neljajuhtmelise kolmefaasilise süsteemi puhul lülitatakse lambid nulljuhtme ja liinijuhtmete vahele (joon. 5-8).



Joon. 5-8. Lampide tähtühendus nulljuhtmega kolmefaasilises võrgus.



Joon. 5-9. Neljajuhtmelise süsteemi vektordiagramm ebaühtlase aktiivkoormuse korral.

Sel juhul töötavad tarbijad samasugustes tingimustes kui ühefaasilise süsteemi korral, sest nulljuhtme olemasolu tõttu on pinge üksikute tarbijate klemmidel võrdne generaatori vastava faasi pingega.

Nagu näha jooniselt 5-8, on voolud liinijuhtmetes võrdsed tarbijate või generaatori vastavate faaside vooluga, s. o.

$$I_l = I_f. \tag{5-6}$$

Generaatori faasivoolud määratakse samuti kui ühefaasilistes vahelduvvooluahelates, s. o.

$$I_A = \frac{U_A}{z_A};\quad I_B = \frac{U_B}{z_B};\quad I_C = \frac{U_C}{z_C}.$$

Faasivoolude ja faasipingete vaheline nihkenurk määratakse valemitega:

$$\cos\varphi_A = \frac{r_A}{z_A};\quad \cos\varphi_B = \frac{r_B}{z_B};\quad \cos\varphi_C = \frac{r_C}{z_C}.$$

Nulljuhtme voolu hetkväärtus võrdub vastavalt Kirchhoffi esimesele seadusele faasivoolude hetkväärtuste summaga, s. o.

$$i_0 = i_A + i_B + i_C.$$

Nulljuhtme voolu efektiivväärtuse saab määrata faasivoolude vektorite liitmise teel, s. o.

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C. \qquad (5\text{-}7)$$

Näide 5-2. Generaatori faasipinge $U_f = 125$ V, tarbija faasitakistused $z_A = z_B = r_A = r_B = 12{,}5\ \Omega$, $z_C = r_C = 25\ \Omega$. Leida vool nulljuhtmes.
Faasivoolud

$$I_A = I_B = \frac{125}{12{,}5} = 10\text{ A};$$

$$I_C = \frac{125}{25} = 5\text{ A}.$$

Voolu nulljuhtmes leiame graafiliselt.
Joonisel 5-9 on ehitatud faasipingete ja -voolude vektorid ja näidatud faasivoolude liitmine. Liitmise tulemuseks on nulljuhtme voolu vektor, mis vastab voolule $I_0 = 5$ A ja mis jääb pingest U_A maha nurga $\varphi = 60°$ võrra.

Nulljuhtme ristlõige võib olla võrdne liinijuhtmete ristlõikega või isegi väiksem, sest vool nulljuhtmes on tavaliselt väiksem kui voolud liinijuhtmetes.

Tuleb veel kord märkida, et tänu nulljuhtmele jäävad pinged tarbijate faasidel sõltumatult üksikute faaside koormusest muutumatuks. Kui aga nulljuhe katkeb, siis juhul, kui tarbijate faaside takistused ei ole võrdsed, on pinged tarbijate üksikutel faasidel erineva suurusega.

Väiksema takistusega faasidel pinge langeb, teistel faasidel aga tõuseb, võrreldes normaalse pingega, mis loomulikult on lubamatu. Eriti ohtlik on nulljuhtme katkemine siis, kui üks faas lühistub. Sel juhul tõuseb pinge teistel faasidel $\sqrt{3}$ korda ja kõik nendesse faasidesse lülitatud elektrilambid põlevad läbi. Nimetatud põhjusel ei ühendata nulljuhtmesse selle katkemise vältimiseks kaitsmeid ega lüliteid.

Kui tarbija kolme faasi takistused on võrdsed (elektrimootorid), siis on faasivoolud omavahel võrdsed ja nihutatud vastavatest faasipingetest ühesuuruste nurkade võrra, s. t. faasivoolude süsteem on samuti sümmeetriline. Sel juhul on faasivoolude summa null ja järelikult nulljuhtmes voolu ei ole. Loomulikult ei ole sel juhul nulljuhet vaja.

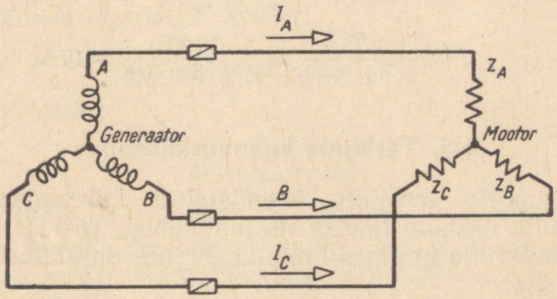
Sümmeetrilise kolmefaasilise süsteemi arvutus seisab ühe faasi arvutamises. Olgu generaatori ahelasse lülitatud ühesuuruste faasitakistustega elektrienergia tarbija (joon. 5-10).

Sel juhul faasipinge

$$U_f = \frac{U_l}{\sqrt{3}}.$$

Faasivool

$$I_f = \frac{U_f}{z_f}.$$



Joon. 5-10. Generaatori ja tarbija tähtühendus.

Faasipinge ja -voolu vahelise nihkenurga koosinus

$$\cos \varphi_f = \frac{r_f}{z_f}.$$

Ühe faasi aktiivvõimsus

$$P_f = U_f I_f \cos \varphi_f.$$

Kolme faasi võimsus sümmeetrilise pingete süsteemi ja tarbija faaside ühtlase koormuse korral

$$P = 3P_f = 3U_f I_f \cos \varphi_f. \qquad (5\text{-}8)$$

Võttes arvesse, et tarbijate tähtühenduse korral $I_f = I_l$ ja $U_f = \frac{U_l}{\sqrt{3}}$, saame aktiivvõimsuse kohta avaldise:

$$P = 3U_f I_f \cos \varphi_f = 3 \frac{U_l I_l}{\sqrt{3}} \cos \varphi_f = \sqrt{3}\, UI \cos \varphi. \qquad (5\text{-}9)$$

Ebasümmeetrilise pingete süsteemi või ebaühtlaselt koormatud faasidega tarbijate korral on kolmefaasilise süsteemi aktiivvõimsuseks üksikute faaside võimsuste summa.

Näide 5-3. Tähtühenduses kolmefaasiline mootor on lülitatud võrku pingega 380 V ja töötab võimsusega $P = 10$ kW ja võimsusteguriga $\cos\varphi = 0{,}8$. Leida mootori vool.

Mootori võimsus

$$P = \sqrt{3}\,UI\cos\varphi,$$

millest vool

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}\,U\cos\varphi} = \frac{10\,000}{1{,}73 \cdot 380 \cdot 0{,}8} = 19\text{ A}.$$

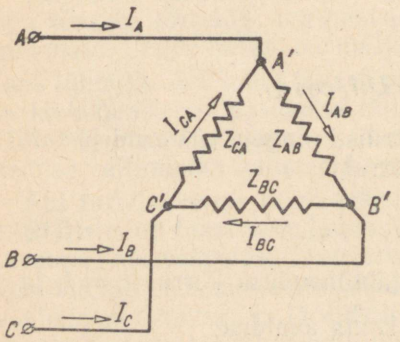
5-5. Tarbijate kolmnurkühendus

Elektrienergia tarbijate ühendamisel kolmnurka ühendatakse tarbija üksikud faasid liinijuhtmetega (5-11). Seejuures lülitatakse tarbija iga faas liinipingele, mis on ühtlasi ka faasipingeks, s. o.

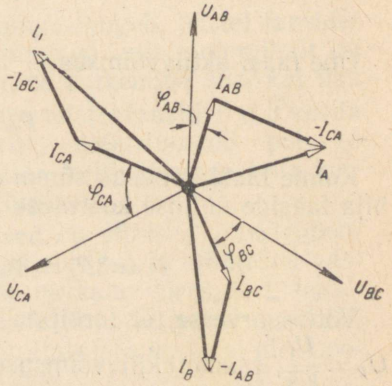
$$U_A = U_{AB};\ U_B = U_{BC};\ \ U_C = U_{CA}.$$

Sel juhul ei sõltu faasipinged tarbija faasitakistustest.

Valime faasivoolude positiivseteks suundadeks suunad punktist A' punkti B', punktist B' punkti C' ja punktist C' punkti A'.



Joon. 5-11. Tarbijate kolmnurkühendus.



Joon. 5-12. Kolmefaasilise süsteemi vektordiagramm tarbijate kolmnurkühenduse korral.

Liinivoolude positiivseks suunaks loeme suuna generaatorilt tarbijale.

Kirchhoffi esimese seaduse põhjal saab punkti A' kohta kirjutada:

$$i_A + i_{CA} = i_{AB},$$

millest

$$i_A = i_{AB} - i_{CA}.$$

Analoogiliselt punkti B' kohta:

$$i_B = i_{BC} - i_{AB}$$

ja punkti C' kohta

$$i_C = i_{CA} - i_{BC}.$$

Niisiis, liinivoolu hetkväärtus võrdub antud liinijuhtmega ühendatud faaside voolude hetkväärtuste algebralise vahega.

Liinivoolu vektor kujutab endast vastavate faasivoolude vektorite geomeetrilist vahet, s. o.

$$\bar{I}_A = \bar{I}_{AB} - \bar{I}_{CA}; \quad \bar{I}_B = \bar{I}_{BC} - \bar{I}_{AB}; \quad \bar{I}_C = \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC}.$$

Joonisel 5-12 on kujutatud kolmnurka ühendatud tarbija pingete ja voolude vektordiagramm. Diagrammil on liinivoolude vektorid saadud vastavate faasivoolude vektorite lahutamise teel teineteisest.

Sellel diagrammil on kõik vektorid tõmmatud ühest punktist. Ülevaatlikuma vektordiagrammi saamiseks nihutatakse mõnikord vektoreid paralleelselt endaga selliselt, et pingete vektorid moodustaksid kinnise kolmnurga (joon. 5-13).

Kui faasid on koormatud ühtlaselt, s. o.

$$z_{AB} = z_{BC} = z_{CA} = z_f$$

ja

$$\varphi_{AB} = \varphi_{BC} = \varphi_{CA} = \varphi_f,$$

siis on faasivoolude efektiivväärtused omavahel võrdsed ja nihutatud vastavatest faasipingetest ühesuuruste nurkade võrra (joon. 5-14). Faasivoolud on nihutatud üksteise suhtes 120°. Sel juhul moodustavad faasivoolud sümmeetrilise süsteemi.

Liini- ja faasivoolude vahelise seose leidmiseks tõmbame vabalt valitud faasivoolu vektori (näiteks I_{AB}) tipust ristsirge liinivoolu vektorile I_A.

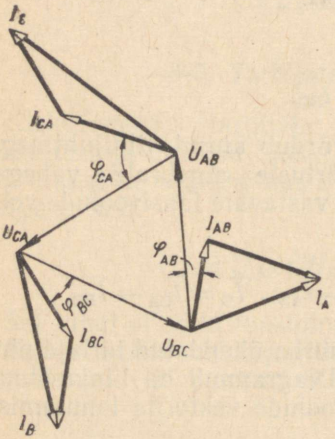
Täisnurksest kolmnurgast *OMN* leiame, et

$$\frac{1}{2} I_l = I_f \cos 30° = I_f \frac{\sqrt{3}}{2},$$

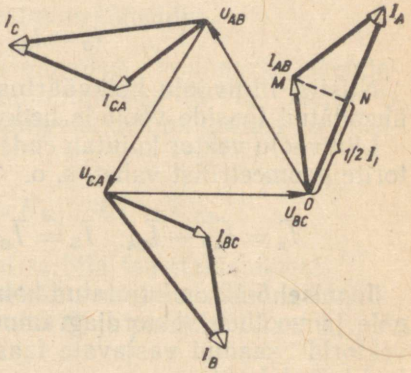
millest

$$I_l = \sqrt{3}\, I_f, \tag{5-10}$$

s. t. liinivool on faasivoolust suurem $\sqrt{3}$ korda.



Joon. 5-13. Kolmefaasilise süsteemi vektordiagramm tarbijate kolmnurkühenduse korral.



Joon. 5-14. Kolmefaasilise süsteemi vektordiagramm sümmeetrilise koormuse korral, kui tarbijad on ühendatud kolmnurka.

Samast kolmnurgast järeldub, et liinivoolud jäävad vastavatest faasivooludest maha 30° võrra.

Ühtlaselt koormatud faasidega kolmnurka ühendatud kolmefaasilise ahela arvutus seisab ühe faasi arvutamises.

Sel juhul faasipinge

$$U_f = U_l,$$

faasivool

$$I_f = \frac{U_f}{z_f},$$

liinivool

$$I_l = \sqrt{3}\, I_f.$$

Faasivoolu ja -pinge vahelise nihkenurga koosinus

$$\cos \varphi_f = \frac{r_f}{z_f}.$$

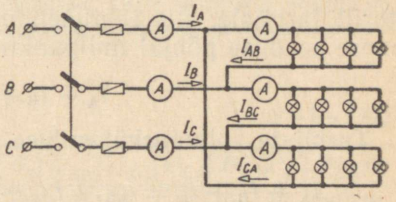
Ühe faasi aktiivvõimsus

$$P_f = U_f I_f \cos \varphi_f.$$

Sümmeetrilise pingete süsteemi ja ühtlaselt koormatud faasidega tarbijate korral kolme faasi võimsus

$$P = 3P_f = 3U_f I_f \cos \varphi_f = \sqrt{3}\, UI \cos \varphi. \quad (5\text{-}11)$$

Ebasümmeetrilise pingete süsteemi või ebaühtlaselt koormatud faasidega tarbijate korral on kolmefaasilise süsteemi aktiivvõimsuseks üksikute faaside võimsuste summa.



Joon. 5-15. Lampide kolmnurkühendus.

Kolmnurkühenduses lülitatakse võrku nii elektrilampe (joon. 5-15) kui ka elektrimootoreid.

Näide 5-4. Kolmnurkühenduses elektrimootor töötab pingel 120 V võimsusteguriga $\cos \varphi = 0{,}8$ ja võimsusega 3 kW. Leida liini- ja faasivoolud.

Avaldisest (5-11) järeldub, et

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}\, U \cos \varphi} = \frac{3000}{1{,}73 \cdot 120 \cdot 0{,}8} = 18 \text{ A}.$$

Faasivool

$$I_f = \frac{I_l}{\sqrt{3}} = \frac{18}{1{,}73} = 10{,}4 \text{ A}.$$

Näide 5-5. Kolmefaasilisse võrku (joon. 5-15) pingega $U_l = 120$ V on lülitatud elektrienergia tarbijad takistustega

$$r_{AB} = 10\ \Omega;\ r_{BC} = r_{CA} = 20\ \Omega.$$

Leida pinged tarbijate klemmidel, kui faasis *B* põleb kaitse läbi.

Kaitsme läbipõlemisel osutuvad faaside AB ja BC vahele lülitatud tarbijad ühendatuks järjestikku liinipingele $U_l = 120$ V.

Tarbijate vool

$$I_{AB} = I_{BC} = \frac{U_{AC}}{r_{AB} + r_{BC}} = \frac{120}{10 + 20} = 4 \text{ A}.$$

Pinged tarbijate klemmidel:

$$U'_{AB} = I_{AB} r_{AB} = 4 \cdot 10 = 40 \text{ V};$$
$$U'_{BC} = I_{BC} r_{BC} = 4 \cdot 20 = 80 \text{ V}.$$
$$U_{CA} = U_l = 120 \text{ V}.$$

Kui võtta liinivoolude positiivseks suunaks suund generaatorilt tarbijale, siis tähtühenduse korral võib Kirchhoffi esimese seaduse põhjal nullpunkti kohta kirjutada:

$$i_A + i_B + i_C = 0.$$

Tarbijate kolmnurkühenduse korral liinivoolude summa

$$i_A + i_B + i_C = i_{AB} - i_{CA} + i_{BC} - i_{AB} + i_{CA} - i_{BC} = 0.$$

Kui voolud on esitatud vektoritena, siis liinivoolude vektorite summa on null:

$$\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = 0. \qquad (5\text{-}12)$$

Seepärast on näiteks magnetvoog kolmefaasilise kaabli kolme soone ümber võrdne nulliga, mis võimaldab kasutada kaabli kaitseks mehaaniliste rikete eest terassoomust. Kui voolude summa ei oleks null, siis põhjustaks resulteeriva voolu poolt tekitatav magnetvoog ümbermagneetimiskadusid kaabli soomuses ja selle ülekuumenemist.

5-6. Laboratoorne töö. Neljajuhtmeline kolmefaasiline ahel

(lampide ühendamine nulljuhtmega tähte)

Enne töö tegemisele asumist tutvuda raamatu lõpus toodud lisaga ja § 5-4.

Tööplaan

1. Tutvuda töö tegemisel vajalike riistadega. Märkida üles nende tehnilised põhiandmed.
2. Koostada skeem (joon. 5-8) ja lasta seda juhendajal kontrollida.

3. Külgeühendamata nulljuhtme (00′) korral lülitada kõikidesse faasidesse ühesuurune koormus ja mõõta faasi- ning liinipinged, pinge punktide 00′ vahel ja liinivoolud: U_A, U_B, U_C, U_0, U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}, I_A, I_B, I_C.

Arvutada faasivõimsused P_A, P_B, P_C.

4. Külgeühendamata nulljuhtme korral muuta koormust faasis *C*, jättes lampide arvu faasides *A* ja *B* endiseks. Mõõta faasi- ja liinipinged ning liinivoolud faasi *C* mitmesuguste takistuste korral, kaasa arvatud juhud, kui faasi *C* takistus on null ja lõpmatult suur. Arvutada faasivõimsused.

5. Mõõteriistade näidud ja arvutustulemused märkida tabelisse 5-1.

6. Ühtlase ja ebaühtlase koormuse kõigi juhtude kohta ehitada vektordiagrammid.

7. Ühendada külge nulljuhe, mõõta faasi- ja liinipinged, liinivoolud ning vool nulljuhtmes faasi *C* mitmesuguste takistuste korral, välja arvatud faasi *C* lühis. Arvutada faasivõimsused. Välja selgitada nulljuhtme takistuse mõju ahela režiimile. Mõõteriistade näidud ja arvutustulemused märkida tabelisse 5-1.

Tabel 5-1

Katse nr.	Z_0	I_A	I_B	I_C	I_0	U_A	U_B	U_C	U_0	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	P_A	P_B	P_C	P
	Ω	A	A	A	A	V	V	V	V	V	V	V	W	W	W	W

5-7. Laboratoorne töö. Kolmejuhtmeline kolmefaasiline ahel

(lampide ühendamine kolmnurka)

Enne töö tegemisele asumist tutvuda § 5-5 sisuga.

Tööplaan

1. Tutvuda töö tegemisel vajalike riistadega. Märkida üles nende tehnilised põhiandmed.

2. Koostada skeem (joon. 5-15) ja lasta see juhendajal kontrollida.

3. Ühtlaselt koormatud faaside puhul mõõta faasi- ja liinivoolud; veenduda, et $I_l = \sqrt{3}\, I_f$. Mõõta faasipinged ja arvutada faasivõimsused. Ehitada vektordiagramm.

4. Mõõteriistade näidud ja arvutustulemused märkida tabelisse 5-2.

5. Muuta kolmanda faasi takistust (z_{CA}), kusjuures kahe ülejäänud faasi takistused (z_{AB} ja z_{BC}) on omavahel võrdsed. Iga katse kohta märkida mõõtmistulemused tabelisse 5-2. Arvutada faasivõimsused. Ehitada ühe katse kohta vektordiagramm.

6. Koormata kõik faasid ühtlaselt, keerata välja kaitse faasist *C*. Märkida tabelisse mõõteriistade näidud ja ehitada selle katse kohta vektordiagramm.

Tabel 5-2

Katse nr.	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	I_{AB}	I_{BC}	I_{CA}	I_A	I_B	I_C	$\frac{I_1}{I_f}$	P_{AB}	P_{BC}	P_{CA}	P
	V	V	V	A	A	A	A	A	A	—	W	W	W	W

KUUES PEATÜKK

ELEKTRIMÕÕTMISED JA MÕÕTERIISTAD

6-1. Põhimõisted

Elektrimõõtmised tagavad elektriseadmete katkestamatu töötamise ja nende parema kasutamise, võimaldavad ratsionaalselt läbi viia mitmesuguseid tootmisprotsesse ning kokku hoida kütust ja tooraineid, millel on, arvesse võttes meie sotsialistliku tööstuse hiiglaslikke mastaape, eriti suur rahvamajanduslik tähtsus.

Käesoleval ajal on Nõukogude Liidus olemas elektrimõõteriistaehituse tööstus, mille poolt valmistatavad kõige mitmesugusemad mõõteriistad rahuldavad tööstuse ja teaduslike asutuste vajadusi.

Mõõtmise all mõistetakse mingi suuruse võrdlemist teise samaliiki suurusega, mis on leppeliselt võetud mõõtühikuks.

Mõõtühikuks võetud suuruse täpselt valmistatud mudelit nimetatakse *mõõduks*.

Seadist, mille abil võrreldakse mõõdetavat suurust mõõtühikuga, nimetatakse *mõõteriistaks*.

Mõõte, mis on ette nähtud mõõtühikute säilitamiseks ja reprodutseerimiseks ning praktilistel mõõtmistel kasutatavate mõõtude kontrollimiseks, nimetatakse *algmõõtudeks*.

Mõõteriistu, mis on ette nähtud praktilistel mõõtmistel kasutatavate mõõteriistade kontrollimiseks ja gradueerimiseks, nimetatakse *normaalmõõteriistaks*. Normaalmõõteriistu kontrollitakse võrdlemise teel Mendelejevi-nimelise Üleliidulise Metroloogia Teadusliku Uurimise Instituudi (ВНИИМ) etaloonidega.

Igasugusel mõõtmisel erineb mõõtmistulemus teatud määral mõõdetava suuruse tegelikust väärtusest.

Mõõdetava suuruse tegelikuks väärtuseks loetakse normaalmõõteriistadega saadud väärtust.

Suuruse mõõtmisel leitud väärtuse ja selle tegeliku väärtuse vahet nimetatakse absoluutseks veaks. Seda tähistatakse tähega Δ (delta), mis märgitakse mõõdetavat suurust tähistava tähe ette.

Mõõtmise kvaliteeti iseloomustab suhteline viga. Suhteliseks veaks nimetatakse absoluutse vea ja mõõdetava suuruse tegeliku väärtuse suhet protsentides.

Näide 6-1. Voolu mõõtmisel saadi selle väärtuseks 51 A. Voolu tegelik väärtus $I = 50$ A. Leida absoluutne ja suhteline viga.

Absoluutne viga

$$\Delta I = I_1 - I = 51 - 50 = 1 \text{ A}.$$

Suhteline viga

$$\gamma_s = \frac{\Delta I}{I} 100\% = \frac{1}{50} \cdot 100\% = 2\%.$$

6-2. Elektrimõõteriistade liigitus

Elektrimõõteriistu saab liigitada kahte põhirühma: a) vahetult näitavad mõõteriistad ja b) võrdlevad riistad.

Vahetult näitavad mõõteriistad annavad oma skaalal mõõdetava suuruse arvväärtuse. Sellisteks mõõteriistadeks on näiteks ampermeeter, voltmeeter, arvesti.

Võrdlevates riistades võrreldakse mõõdetavat suurust vastava mõõduga (ilma selleta ei ole mõõtmine võimalik). Sellisteks riistadeks on näiteks sildlülituses takistusmõõtja (vt. § 6-8).

Praktikas kasutatakse peamiselt vahetult näitavaid mõõteriistu, sest need on lihtsamad, odavamad ja annavad mõõtmistulemuse kiiremini. Võrdlevaid mõõteriistu kasutatakse tavaliselt täpseteks mõõtmisteks.

Mõõteriistade liigitus mõõdetava suuruse järgi on toodud tabelis 6-1 ja toimimisviisi (süsteemi) järgi — tabelis 6-2.

Vastavalt Riiklikule Üleliidulisele standardile (ГОСТ 1845-52) jaotatakse vahetult näitavad mõõteriistad peale arvestite seitsmesse täpsusklassi: 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5 ja 4. Mõõteriista klassi tähis skaalal on piiratud ringiga.

Mõõteriista täpsusklassi tähistavad arvud väljendavad

mõõteriistade taandatud viga. T a a n d a t u d v e a k s nimetatakse normaalsetes tingimustes [1] asuva mõõteriista maksi-

T a b e l 6-1

Mõõdetav suurus	Mõõteriista nimetus	Tingmärk
Vool	Ampermeeter	
Pinge	Voltmeeter	
Võimsus	Vattmeeter	
	Kilovattmeeter	
Energia	Hektovatt-tundide arvesti	
	Kilovatt-tundide arvesti	
Faasinihe	Fasomeeter	
Sagedus	Sagedusmõõtja	
Takistus	Oommeeter	
	Megaoommeeter	

[1] Mõõteriist asub normaalsetes tingimustes, kui ta on üles seatud skaalal märgitud asendis, ümbritseva keskkonna temperatuur on 20° C ja välised magnetväljad (peale Maa magnetvälja) puuduvad.

Süsteem	Tingmärk
Magnetelektriline	
Magnetelektriline tahkealaldajaga	
Magnetelektriline termomuundajaga	
Elektromagnetiline	
Elektrodünaamiline	
Ferrodünaamiline	
Induktsioonsüsteemiline	
Elektrostaatiline	
Vibratsioonsüsteemiline	

Märgi tähendus	Tingmärk
Mõõteriista isolatsiooni on proovitud pingega 2 kV	
Kasutatav vertikaalasendis	
Kasutatav horisontaalasendis	
Kasutatav kaldasendis 60° nurga all	

maalse absoluutse vea (Δx) ja mõõteriista mõõteulatuse (x_m) suhet protsentides.

Mõõteriista m õ õ t e u l a t u s e k s nimetatakse suurimat väärtust, mida antud mõõteriistaga saab mõõta. Niisiis taandatud viga

$$\gamma_t = \frac{\Delta x}{x_m} \cdot 100\%. \qquad (6\text{-}1)$$

Üldjuhul võib viga olla positiivne või negatiivne.

Mingi suuruse määramisel mõõteriista järgi nimetatakse suhteliseks mõõtmisveaks mõõteriista maksimaalse võimaliku absoluutse vea Δx ja mõõtmisel saadud väärtuse (x_1) suhet protsentides. Seega mõõtes mõõteriistaga suurust x_1, väljendub suhteline viga järgmiselt:

$$\gamma_{x_1} = \frac{\Delta x}{x_1} \cdot 100\%. \qquad (6\text{-}2)$$

Korrutades ja jagades seda avaldist mõõteriista mõõteulatusega, saame:

$$\gamma_{x_1} = \frac{\Delta x}{x_1} \cdot 100\% \cdot \frac{x_m}{x_m} = \frac{\Delta x}{x_m} \cdot 100\% \cdot \frac{x_m}{x_1} = \gamma_t \frac{x_m}{x_1}. \qquad (6\text{-}3)$$

Valemist (6-3) selgub, et suhteline viga saadakse taandatud vea korrutamisel mõõteulatuse ning mõõdetava suuruse suhtega.

Näide 6-2. Leida suhteline viga voolu mõõtmisel ampermeetriga, mille täpsusklass on 1,5 ja mõõteulatus $I_m = 50$ A, kui ampermeetri näit $I_1 = 20$ A.

Maksimaalne võimalik suhteline viga

$$\gamma_{I_1} = \gamma_t \frac{I_m}{I_1} = \pm 1{,}5 \cdot \frac{50}{20} = \pm 3{,}75\%.$$

Suhteline viga on seda suurem, mida väiksem on mõõdetav suurus, võrreldes mõõteriista mõõteulatusega; seepärast tuleb mõõteriistad valida sellise mõõteulatusega, et mõõdetava suuruse väärtus vastaks skaala teisele poolele.

6-3. Mõõteriistade mõõtemehhanismid

Iga mõõteriista põhiosaks on mõõtemehhanism.

Mõõdetava suuruse või sellega funktsionaalselt seotud suu-

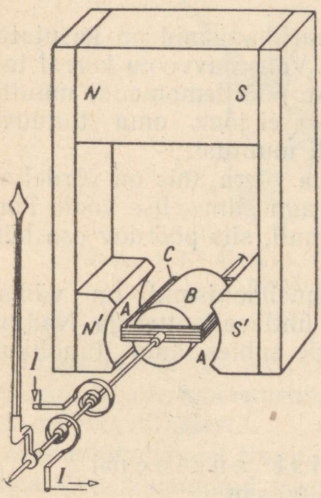
ruse toimel mõõteriista mehhanismile pöördub selle liikuv osa tehtud nurga võrra, mis määrab mõõdetava suuruse väärtuse.

Käsitleme levinumaid mõõtemehhanismide süsteeme.

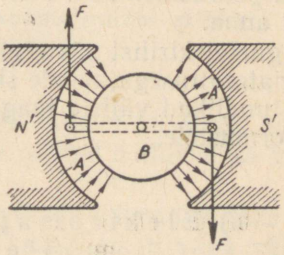
a) Magnetelektrilist süsteemi mõõtemehhanism

Liikumatu terassilindri *B* ja püsivmagneti *NS* pooluskingade *N'S'* vahelises õhupilus *A* tekib magnetväli (joon. 6-1 ja 6-2). Õhupilus asetseb ristkülikukujuline pool (raam) *C*. Pool on kinnitatud kahe pooltelje külge, milledest ühega on ühendatud mõõteriista osuti. Osuti vaba otsa all paikneb skaala. Vool juhitakse liikuvasse pooli kahe spiraalvedru kaudu.

Pooli läbiva voolu ja magnetvälja vastastikuse mõju tule-



Joon. 6-1. Magnetelektriline mõõtemehhanism.



Joon. 6-2. Pöördemomendi saamine magnetelektrilises mõõtemehhanismis.

musena kujuneb jõupaar *FF* (joon. 6-2), mis tekitab pöördemomendi M_p. Selle momendi mõjul pöördub pool *C* nurga α võrra, mispuhul pöördemoment tasakaalustub mõõteriista vedrude poolt tekitatava vastumomendiga. Kuna vastumoment on võrdeline vedru keerdumisnurgaga, pöördemoment aga on võrdeline vooluga, siis on liikuva osa pöördenurk võrdeline vooluga. Selle nurga järgi määratakse voolu või sellega funktsionaalselt seotud mõõdetava suuruse väärtus.

Kõik mõõteriistad varustatakse summutitega, s. o.

seadistega, mis vähendavad pärast mõõteriista sisselülitamist tekkivate liikuva osa võnkumiste kestust.

Magnetelektrilistel mõõteriistadel kasutatakse magnetilist summutust. Mõõtemehhanismi pooli *C* mähis paikneb alumiiniumist karkassil (alusel), mis moodustab kinnise ringi. Liikuva osa pöördumisel muutub karkassiga ahelduv magnetvoog. Selle tulemusena indutseeritakse karkassis voolud; nende voolude ja püsivmagneti magnetvälja vastastikuse mõju tulemusena tekib pidurdusmoment, mis tagab liikuva osa võnkumiste kiire sumbumise.

Seoses pooli mähise ja vedrude väikse ristlõikega valmistatakse käsitletavad mõõtemehhanismid nõrkadele vooludele ($1 \cdot 10^{-8} \div 1 \cdot 10^{-2}$ A).

Magnetelektrilist süsteemi mõõtemehhanismid on kasutatavad ainult alalisvoolu mõõtmiseks. Vahelduvvoolu korral toimub voolu hetkväärtusega võrdelise pöördemomendi muutumine väga kiirelt, mistõttu liikuv osa ei jõua oma tunduva inertsi tõttu jälgida pöördemomendi muutusi.

Sel juhul pöördub liikuv osa nurga võrra, mis on võrdeline pöördemomendi keskväärtusega. Et aga siinuselise voolu korral on pöördemomendi keskväärtus null, siis pöörduv osa hälvet ei anna.

Magnetelektrilist süsteemi mõõtemehhanismid on väikse energiatarvitusega, nende skaala on ühtlase jaotusega. Nad on vähe tundlikud väliste magnetväljade suhtes, kuid tundlikud ülekoormustele.

b) Elektromagnetilist süsteemi mõõtemehhanism

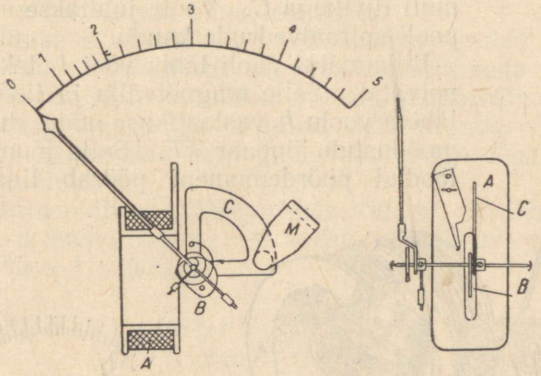
Elektromagnetiline mõõtemehhanism (joon. 6-3) koosneb poolist *A* ja südamikust (teraslehekesest) *B*, mis on kinnitatud osutiga ühisele teljele. Samale teljele on kinnitatud ka vastumomenti tekitav spiraalvedru ja summuti sektorikujuline alumiiniumleheke *C*, mis paikneb püsivmagneti *M* pooluste vahel.

Pooli läbiv vool tekitab magnetvälja, mis magneedib südamiku. Viimane tõmbub pooli sisse, pöörates seejuures mõõteriista liikuvat osa voolust sõltuva nurga võrra. Selle pöördenurga järgi määratakse mõõdetava voolu väärtus.

Elektromagnetilist süsteemi mõõtesüsteemid on kasutatavad nii alalis- kui ka vahelduvvoolu puhul, sest vahelduvvoolu korral muutub üheaegselt voolu suuna muutumisega samuti mag-

netvälja suund ja seega ka südamiku polaarsus, mistõttu südamikule mõjuva jõu suund ei muutu.

Südamiku jääkväljatiheduse tõttu võib elektromagnetilist süsteemi mõõtemehhanismi liikuva osa pöördenurk olla ühesuguste voolu väärtuste korral erinev, sõltudes sellest, kas



Joon. 6-3. Moskva tehase elektromagnetiline mõõtemehhanism tüüp ЭНМ.

voolu antud väärtus on saadud voolu tugevnemisel või nõrgenemisel. Nende mõõtemehhanismide näidud sõltuvad ka välistest magnetväljadest.

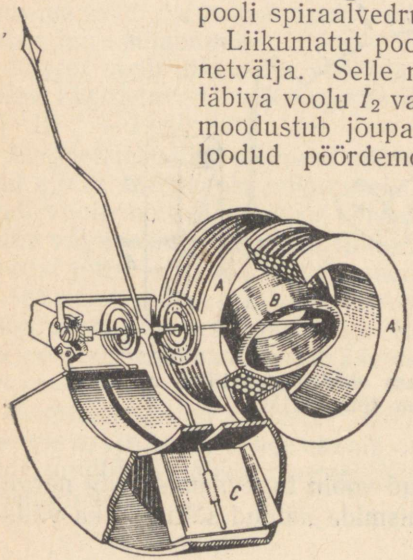
Jääkmagnetismist tingitud mõõtevigade vähendamiseks valmistatakse südamikud permalloist, mis omab väga väikest jääkväljatihedust. Väliste magnetväljade poolt tekitatavate mõõtevigade vähendamiseks paigutatakse mõõtemehhanismid terasest ekraanidesse (kestadesse) või kasutatakse astaatilist mõõtemehhanismi, mis koosneb kahest poolist ja vastavalt kahest ühele teljele kinnitatud südamikust.

Astaatilise mõõtemehhanismi poole läbiv vool tekitab kaks vastassuunalist magnetvälja, mis põhjustavad kaks ühesuunalist pöördemomenti. Südamikkudele mõjuv väline homogeenne väli tekitab kaks lisapöördemomenti, mis on omavahel vastassuunalised ja seetõttu kompenseerivad teineteist.

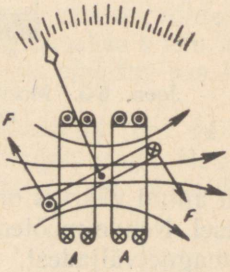
c) Elektrodünaamilist süsteemi mõõtemehhanism

Elektrodünaamilist süsteemi mõõtemehhanism (joon. 6-4 ja 6-5) koosneb kahest poolist: liikumatust poolist *A* ja liikuvast poolist *B*. Liikuv pool asetseb ühel teljel osutiga ja õhksummuti tiivikuga *C*. Vool juhitakse liikuvasse pooli spiraalvedrude kaudu.

Liikumatut pooli läbiv vool I_1 tekitab magnetvälja. Selle magnetvälja ja liikuvat pooli läbiva voolu I_2 vastastikuse mõju tulemusena moodustub jõupaar *FF*. Selle jõupaari poolt loodud pöördemoment pöörab liikuvat pooli



Joon. 6-4. Elektrodünaamiline mõõtemehhanism.



Joon. 6-5. Pöördemomendi saamine elektrodünaamilises mõõtemehhanismis.

sellise nurga võrra, mispuhul pöördemoment muutub võrdseks vedrude vastumomendiga. Selle pöördenurga järgi määratakse mõõdetava suuruse väärtus.

Alalisvoolu korral on nii pöördemoment kui ka liikuva osa pöördemoment võrdeline poole läbivate voolude korrutisega.

Vahelduvvoolu korral on pöördemomendi hetkväärtus võrdeline voolude hetkväärtuste korrutistega, kuid pöördemomendi keskväärtus (perioodi vältel) on võrdeline voolude efektiivväärtuste ja nendevahelise nurga koosinuse korrutisega, s. o.

$$M_k = k_1 I_1 I_2 \cos \psi. \qquad (6\text{-}4)$$

Liikuva osa pöördenurk on võrdeline momendi keskväärtusega, järelikult

$$\alpha = k_2 I_1 I_2 \cos \psi.$$

Kuna kirjeldatud mõõtemehhanismis teras puudub, siis ei esine vigu jääkväljatiheduse tõttu. Seetõttu saab neid mõõtemehhanisme valmistada väga täpsetena.

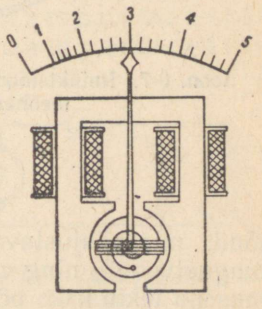
Elektrodünaamilist süsteemi mõõtemehhanismide sisemised magnetväljad on suhteliselt nõrgad, mistõttu seda süsteemi mõõtemehhanismid on tundlikud väliste magnetväljade suhtes. Välistest magnetväljadest tingitud mõõtevigade vältimiseks kasutatakse samu abinõusid mis elektromagnetilist süsteemi mõõteriistade puhul.

Elektrodünaamilised mõõtemehhanismid on võrdlemisi tundlikud ülekoormuste suhtes, sest vedrude ja liikuva pooli juhtmed on väikse ristlõikega.

d) Ferrodünaamilist süsteemi mõõtemehhanism

Ferrodünaamiliste mõõtemehhanismide tööpõhimõte on samasugune kui elektrodünaamilistel mehhanismidel. Nad erinevad viimastest selle poolest, et liikumatu pool on kinnitatud terassüdamikule ja et liikuva pooli sees paikneb terassilinder (joon. 6-6). Südamik ja silinder on koostatud lehtterasest.

Terase kasutamine tugevdab mõõtemehhanismi magnetvälja, mis ühelt poolt põhjustab pöördemomendi suurenemist ning võimaldab valmistada need mõõteriistad tugevama konstruktsiooniga ja teiselt poolt vähendab väliste magnetväljade mõju mõõteriista näitudele. Kuid terase kasutamise tõttu suurenevad jääkväljatihedusest ja pöörisvooludest tingitud vead.



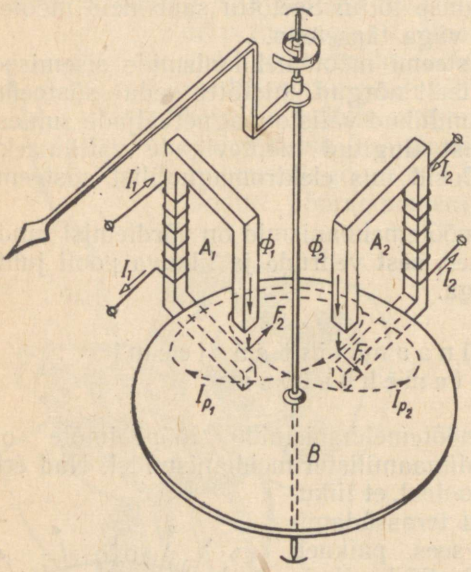
Joon. 6-6. Ferrodünaamiline mõõtemehhanism.

e) Induktsioonsüsteemiline mõõtemehhanism

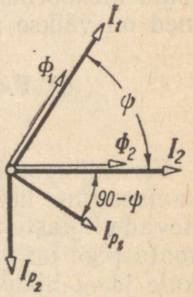
Induktsioonsüsteemiline mõõtemehhanism (joon. 6-7) koosneb kahest liikumatust elektromagnetist A_1 ja A_2 ning liiku-

vast alumiiniumkettast B, mis on kinnitatud ühele teljele osutiga.

Elektromagneti poole läbivad vahelduvvoolud I_1 ja I_2 tekitavad magnetvood Φ_1 ja Φ_2, mis ahelduvad kettaga. Need muutuvad magnetvood indutseerivad kettas elektromotoorsed



Joon. 6-7. Induktsioonsüsteemiline mõõtemehhanism.



Joon. 6-8. Induktsioonsüsteemilise mõõtemehhanismi vektordiagramm.

jõud, mis põhjustavad pöörisvoolud I_{p1} ja I_{p2}. Voolu I_{p1} ja magnetvoo Φ_2 ning voolu I_{p2} ja voo Φ_1 vastastikuse mõju tulemusena tekib kaks pöördemomenti, mille mõjul ketas pöördub. Vastumomenti tekitatakse spiraalvedruga.

Voolu I_{p1} ja magnetvoo Φ_2 vastastikusest toimest tingitud pöördemomendi keskväärtus (perioodi vältel) on võrdeline nende suuruste ja nendevahelise nurga koosinuse $[\cos(90 - \psi)]$ korrutisega (vt. vektordiagrammi joonisel 6-8). Kuid kuna $I_{p1} = \Phi_{1m}$ ja $\cos(90 - \psi) = \sin\psi$, siis esimene pöördemoment

$$M_1 \equiv \Phi_{1m}\Phi_{2m}\sin\psi.$$

Analoogiliselt saab näidata, et teine pöördemoment M_2 on võrdeline samadele suurustele. Järelikult resulteeriv moment

$$M = M_1 + M_2 \equiv \Phi_{1m}\Phi_{2m} \sin \psi. \qquad (6\text{-}5)$$

Mõõtemehhanismi pöördenurk (olles võrdeline pöördemomendi keskväärtusega) on võrdeline samade suuruste korrutisega, s. o.

$$\alpha \equiv \Phi_{1m}\Phi_{2m} \sin \psi.$$

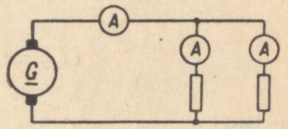
Induktsioonsüsteemilised mõõteriistad on kasutatavad vahelduvvoolu mõõtmiseks, mille sagedus on konstantne ja võrdub mõõteriista nimisagedusega.

Nende mõõtemehhanismid on konstruktsioonilt tugevad ja töökindlad ekspluatatsioonis.

Induktsioonsüsteemiliste mõõtemehhanismide näidud ei sõltu välistest magnetväljadest, kuid sõltuvad temperatuurist, mistõttu nad ei ole kuigi täpsed.

6-4. Voolu mõõtmine

Mõõteriistu, mis on ette nähtud alla $1 \cdot 10^{-6}$ A tugevuse voolu mõõtmiseks, nimetatakse galvanomeetriteks; suuremate voolude mõõtmiseks ettenähtud mõõteriistu — mikroampermeetriteks, milliampermeetriteks, ampermeetriteks või kiloampermeetriteks, sõltuvalt nendega mõõdetava voolu väärtusest.



Joon. 6-9. Ampermeetrite lülitusskeem.

Igasuguse ampermeetri osuti hälbenurk sõltub tema mõõtemehhanismi läbivast voolust. Selleks et ampermeetri osuti näidu järgi määrata voolu vooluahela mingis harus, peab see vool läbima ampermeetrit. Järelikult tuleb ampermeeter lülitada mõõdetavasse harusse järjestikku.

Ampermeetri lülitamine ahelasse ei tohi rikkuda selle töörežiimi, järelikult peab ampermeetri takistus olema väike, võrreldes vastava tarbija või haru takistusega. Ampermeetri väiksele takistusele (r_a) vastab ka väike kaovõimsus, sest

$$P_{a \cdot n} = I^2_{a \cdot n} r_a,$$

kus $I_{a \cdot n}$ — ampermeetri nimivool.

Juhul kui mõõdetav vool on suurem ampermeetri (või ampermeetri mõõtemehhanismi) nimivoolust (mõõteulatusest), kasutatakse mõõtepiirkonna laiendamiseks alalisvoolu korral *šunte* (vt. § 6-4, *a*) ja vahelduvvoolu korral *voolutransformaatoreid* (vt. § 8-9).

§ 6-3 käsitletud mõõtemehhanismidest võib kõiki kasutada voolu mõõtmiseks, kuid igaühel neist on oma kasutusala.

Käsitleme eri süsteemi ampermeetreid ja nende kasutamist.

a) *Magnetelektrilist süsteemi ampermeetrid*

Magnetelektrilist süsteemi mõõtemehhanismi liikuva osa pöördenurk sõltub tema pooli läbivast voolust, mis võimaldab mõõteriista skaalat gradueerida otseselt voolu ühikutes.

Seda süsteemi mõõtemehhanismide maksimaalseks nimivooluks on 10—100 mA. Järelikult seda süsteemi galvanomeeter, mikroampermeeter ja milliampermeeter kujutab endast mõõtemehhanismi, mille mähis on ühendatud mõõteriista kestal paiknevate klemmidega.

Magnetelektrilist süsteemi ampermeetri moodustab magnetelektriline mehhanism koos šundiga, mille ülesandeks on mõõtepiirkonna laiendamine. Šunt lülitatakse mõõtemehhanismiga paralleelselt.

Mõõdetav vool I jaguneb punktis a kahte ossa: mõõtemehhanismi vooluks I_{mm} ja šundi vooluks $I_š$ (joon. 6-10). Pinge langu punktide a ja b vahel:

$$U_{ab} = I_{mm} r_{mm} = I \frac{r_{mm} r_š}{r_{mm} + r_š},$$

millest

$$I = I_{mm} \frac{r_{mm} + r_š}{r_š} = p I_{mm}, \qquad (6\text{-}6)$$

kus r_{mm} — mõõtemehhanismi takistus;

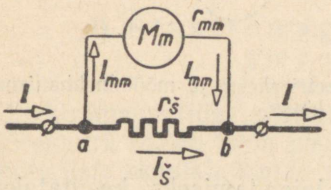
$r_š$ — šundi takistus.

Konstantsete r_{mm} ja $r_š$ väärtuste korral on mõõdetava voolu I ja mõõtemehhanismi läbiva voolu I_{mm} suhe p konstantne suurus. Järelikult saab mõõtemehhanismi mõõdetavat voolu määrata liikuva osa pöördenurga järgi.

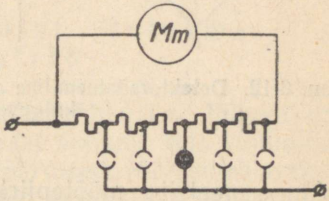
Šuntide ristlõige peab olema selline, et nad ei kuumeneks, sest vastasel juhul väheneb mõõtmise täpsus.

Šundid vooludele 25—50 A monteeritakse mõõteriista kesta sisse. Suurtele vooludele ettenähtud šundid paigaldatakse ampermeetrist eraldi.

Tehnilised ampermeetrid varustatakse tavaliselt ühemõõtepiirkonnalise šundiga.



Joon. 6-10. Mõõtemehhanism šundiga.



Joon. 6-11. Ampermeeter mitmemõõtepiirkonnalise šundiga.

Normaal- ja laboratoorsed mõõteriistad, näiteks tüüp M-16, varustatakse mitmemõõtepiirkonnalise šundiga.

Mitme mõõtepiirkonnaga šundi skeem on esitatud joonisel 6-11. Mõõteriista mitmesugused piirkonnad saadakse šundi takistuse muutmise teel pistiku ümberasetamisel ühest pesast teise.

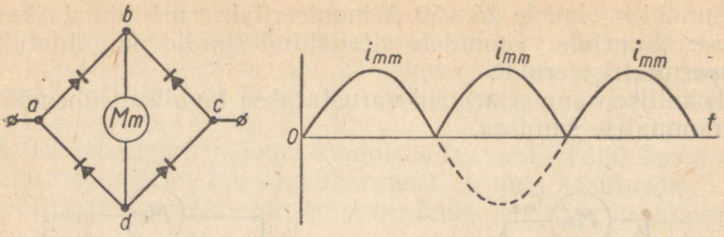
Seda süsteemi ampermeetreid valmistatakse nii normaal- ja laboratoorsete mõõteriistadena (täpsusklassiga 0,1—0,5) kui ka kilbimõõteriistadena (täpsusklassiga 1 ja 2,5) alalisvoolu mõõtmiseks.

b) Detektorsüsteemilised ampermeetrid

Detektorsüsteemilised ampermeetrid koosnevad magnetelektrilist süsteemi mõõtemehhanismist ja pooljuhtalaldajatest (vt. § 10—4).

Joonisel 6-12 on toodud ühe sellise ampermeetri skeem.

Esimese poolperioodi vältel kulgeb vool suunas $a — b — d — c$, teise poolperioodi vältel aga suunas $c — b — d — a$. Seega läbib mõõtemehhanismi ühe vahelduvvoolu perioodi vältel kaks poollainet ühes suunas. Kuna mõõtemehhanismi läbiva siinuselise voolu keskväärtus on võrdeline mõõdetava voolu efektiivväärtusega, siis on ka ampermeetri mõõtemehhanismi pöördenurk võrdeline voolu efektiivväärtusega. Ampermeetri skaalale kantakse alati voolu efektiivväärtused.



Joon. 6-12. Detektorsüsteemilise ampermeetri skeem ja mõõtemehhanismis kulgeva voolu kõver.

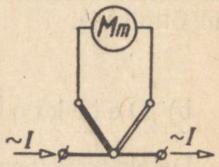
Ampermeetrite mõõtepiirkonna laiendamiseks kasutatakse šunte.

Alaldajatega ampermeetrid valmistatakse täpsusklassidega 1,5 ja 2,5. Neid kasutatakse peamiselt kõrgema sagedusega (kuni 10 kHz) vahelduvvoolu mõõtmiseks.

c) Termoelektrilist süsteemi ampermeetrid

Termoelektrilist süsteemi ampermeetrid koosnevad magnetelektrilisest mõõtemehhanismist ja termomuundajast.

Kui keevitada kokku kahe eri metallist elektrijuhi otsad ja keevituskohta kuumutada, siis kujuneb juhtide vabadel (keevitamata) otstel teatud kindla märgiga potentsiaalivahe. Seda potentsiaalivahet nimetatakse termoelektromotoorseks jõuks ja selliseid kokkukeevitatud juhte termopaariks.



Joon. 6-13. Termoelektrilise ampermeetri skeem.

Termoelektromotoorse jõu väärtus sõltub termopaari moodustavatest metallidest ja temperatuurivahest termopaari keevituskoha ja vabade otste vahel, kui aga vabade otste temperatuur on konstantne, siis termopaari keevituskoha temperatuurist.

Kõige lihtsam termoelektriline ampermeeter kujutab endast magnetelektrilist süsteemi mõõtemehhanismi, mille klemmid on ühendatud termopaari otstega, termopaari keevituskoht aga on keevitatud kuumendi külge (joon. 6-13).

Kuumendit läbiva voolu toimel tõuseb termopaari keevituskoha temperatuur ja mõõtemehhanismis tekib vool, mille tulemusena selle liikuv osa pöördub. Pöördenurk sõltub mõõde-

tavast vahelduvvoolust. Ampermeetri skaalale kantakse voolu efektiivväärtused.

Termoelektrilisi ampermeetreid kasutatakse kõrge sagedusega (kuni 10 MHz) voolu mõõtmiseks. Nende täpsusklass on 1,5 ja 2,5.

d) Elektromagnetilist süsteemi ampermeetrid

Elektromagnetilist süsteemi mõõtemehhanismi liikuva osa pöördenurk sõltub tema pooli läbivast voolust, mis võimaldab mõõteriista skaalale kanda voolu väärtused. Mõõtemehhanismi pool on liikumatu, mistõttu selle võib valmistada ükskõik millise ristlõikega juhtmest; järelikult võib seda süsteemi ampermeetreid valmistada mistahes nimivoolule. Kodumaine tööstus valmistab elektromagnetilist süsteemi kilbiampermeetreid nimivoolule kuni 200 A.

Seda süsteemi ampermeetrid on saavutanud ulatusliku leviku kilbimõõteriistadena (täpsusklass 1,5 ja 2,5) vahelduvvooluseadmetes.

Astaatilisi elektromagnetilisi ampermeetreid (näiteks tüüp ACT-A täpsusklassiga 0,5) kasutatakse laialdaselt laboratoorsete mõõteriistadena vahelduvvoolu mõõtmiseks.

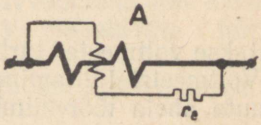
e) Elektrodünaamilist süsteemi ampermeetrid

Elektrodünaamilist süsteemi ampermeetriteks on sama süsteemi mõõtemehhanism (vt. § 6-3, *c*), mille skaalale on kantud mõõdetava voolu väärtustele vastavad jaotused.

Mõõtemehhanismi liikuv pool peab hõõrdumisest tingitud mõõtevigade vähendamiseks olema kerge, mistõttu see tuleb valmistada väikse ristlõikega juhtmest. Mõõteriista nimivool ei ületa tavaliselt 100 mA. Liikumatu pooli võib valmistada



Joon. 6-14. Elektrodünaamilise milliampermeetri poolide ühendusskeem.



Joon. 6-15. Elektrodünaamilise ampermeetri poolide ühendusskeem.

suurema ristlõikega juhtmest ja tema nimivool võib olla 5 A ja rohkem. Seepärast ühendatakse milliampermeetrites poolid järjestikku (joon. 6-14), ampermeetrites aga paralleelselt (joon. 6-15).

Kui poolid on ühendatud järjestikku, siis poole läbivad voolud $I_1 = I_2 = I$; nende voolude vaheline faasinihe $\psi = 0$ ja mõõteriista liikuva osa pöördenurk on võrdeline voolu ruuduga:

$$\alpha = k_2 I_1 I_2 \cos \psi = k_2 I^2.$$

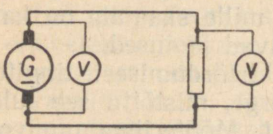
Kui poolid on ühendatud paralleelselt, siis on voolud kummaski harus I_1 ja I_2 võrdelised mõõdetava vooluga I; kui seejuures ahelate takistused on valitud selliselt, et voolud I_1 ja I_2 on faasis ($\psi = 0$), siis on ampermeetri liikuva osa pöördenurk nagu eelmisel juhulgi võrdeline voolu ruuduga:

$$\alpha = k_2 I^2.$$

Elektrodünaamilisi ampermeetreid kasutatakse normaal- ja laboratoorsete mõõteriistadena (täpsusklass 0,2 ja 0,5) töötusliku ja kõrgema sagedusega vahelduvvoolu mõõtmiseks.

6-5. Pinge mõõtmine

Mõõteriistu, mis on ette nähtud pinge mõõtmiseks, nimetatakse *millivoltmeetriteks*, *voltmeetriteks* või *kilovoltmeetriteks* sõltuvalt mõõdetava pinge väärtusest.



Joon. 6-16. Voltmeetrite lülitusskeem.

Voltmeetri osuti hälbenurk sõltub tema klemmidele rakendatud pingest. Selleks et voltmeetri näidu järgi määrata pinget vooluahela mingite punktide vahel, tuleb need punktid ühendada voltmeetri klemmidega. Näiteks pinge mõõtmiseks tarbija klemmidel (joon. 6-16) tuleb voltmeeter ühendada nendele klemmidele. Seega ühendatakse voltmeeter tarbijaga (või generaatoriga) paralleelselt.

Voltmeetri lülitamine paralleelselt ahelaelemendiga ei tohi muuta ahela töörežiimi; seepärast peab voltmeetri takistus olema tunduvalt suurem selle ahelaelemendi takistusest, millega ta paralleelselt ühendatakse. Voltmeetri suurele takistusele (r_v) vastab väike nimivool ja väike kaovõimsus, sest

$$I_{v.n} = \frac{U_{v.n}}{r_v} \text{ ja } P_{v.n} = \frac{U^2_{v.n}}{r_v},$$

kus $I_{v.n}$ — voltmeetri nimivool;
$U_{v.n}$ — voltmeetri nimipinge;
$P_{v.n}$ — voltmeetri kaovõimsus.

§ 6-3 käsitletud mõõtemehhanismidest võib kõiki kasutada pinge mõõtmiseks.

Kui mõõtemehhanismi takistus on muutumatu, siis pinge tema klemmidel on võrdeline vooluga, s. o.

$$U_{mm} = I_{mm}\, r_{mm},$$

kus I_{mm} — mõõtemehhanismi vool;
r_{mm} — mõõtemehhanismi takistus.

Järelikult on mõõtemehhanismi liikuva osa pöördenurk võrdeline mitte ainult vooluga, vaid ka pingega.

Tegelikult sõltub mõõtemehhanismi takistus, mis kujutab endast vaskjuhtmest mähise takistust, siiski temperatuurist (muutudes 4% temperatuuri 10° C kohta), mis rikub pinge ja voolu vahelise võrdelisuse ja järelikult ka pinge ja pöördenurga vahelise võrdelisuse.

Selleks et liikuva osa pöördenurk oleks võrdeline pingega, lülitatakse järjestikku mõõtemehhanismiga manganiinist *eeltakisti*, mille takistus on tunduvalt suurem mõõtemehhanismi omast. Manganiini äärmiselt väikse temperatuuriteguri tõttu muutub voltmeetri takistus praktiliselt temperatuurist sõltumatuks ja liikuva osa pöördenurk on võrdeline pingega voltmeetri klemmidel:

$$U_v = I_{mm}\,(r_{mm} + r_e), \qquad (6\text{-}7)$$

kus r_e — eeltakisti takistus.

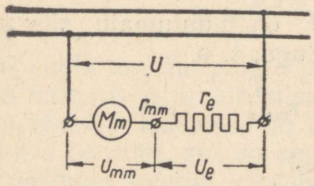
Eeltakisteid kasutatakse peale selle pinge mõõtepiirkonna laiendamiseks, sest mõõtemehhanismi mõõteulatus on tavaliselt väga väike.

Kõrgete pingete mõõtmiseks vahelduvvooluahelates kasutatakse mõõtepiirkonna laiendamiseks eeltakistite kõrval *pingetrafosid* (vt. § 8-9).

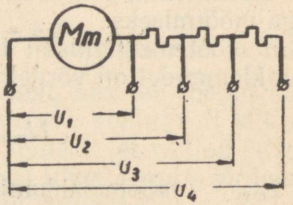
Käsitleme eri süsteemi voltmeetreid ja nende kasutamist.

a) Magnetelektrilist süsteemi voltmeetrid

Magnetelektrilist süsteemi voltmeeter koosneb sama süsteemi mõõtemehhanismist ja sellega järjestikku ühendatud eeltakistist (joon. 6-17).



Joon. 6-17. Mõõtemehhanism eeltakistiga.



Joon. 6-18. Voltmeeter mitmemõõtepiirkonnalise eeltakistiga.

Mõõteriista skaalale on kantud jaotused, mis vastavad pingele tema klemmidel:

$$U = I(r_{mm} + r_e),$$

mis ületab pinge mõõtemehhanismil ($U_{mm} = Ir_{mm}$)

$$p = \frac{r_{mm} + r_e}{r_{mm}}$$

korda.

Tehnilised voltmeetrid varustatakse ühemõõtepiirkonnaliste eeltakistitega.

Normaal- ja laboratoorsed mõõteriistad, näiteks tüüp M-16, varustatakse mitmemõõtepiirkonnaliste eeltakistitega. Mitme mõõtepiirkonnaga eeltakisti skeem on esitatud joonisel 6-18. Pinge mitmesugused mõõtepiirkonnad saadakse eeltakisti takistuse muutumise teel pistiku ümberasetamisel ühest pesast teise või juhtme ümberühendamisel ühelt klemmilt teisele (joon. 6-18).

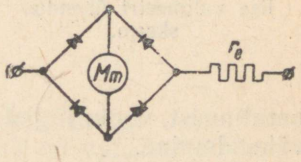
Seda süsteemi voltmeetreid valmistatakse nii normaal- ja laboratoorsete mõõteriistadena (täpsusklass 0,1—0,5) kui ka kilbimõõteriistadena (täpsusklass 1 ja 2,5) alalispinge mõõtmiseks.

b) Detektorsüsteemilised voltmeetrid

Detektorsüsteemilised voltmeetrid koosnevad magnetelektrilisest mõõtemehhanismist, pooljuhtalaldajast ja eeltakistist.

Joonisel 6-19 on toodud üks sellise voltmeetri skeem.

Mõõtemehhanismi liikuva osa pöördenurk, olles võrdeline mehhanismi läbiva voolu keskväärtusega (voltmeetri konstantse takistuse korral), on võrdeline voltmeetri klemmidele rakendatud pinge kesk- või efektiivväärtusega. Voltmeetri skaalale kantakse tavaliselt pinge efektiivväärtusele vastavad jaotused.



Joon. 6-19. Detektorsüsteemilise voltmeetri skeem.

Alaldajatega voltmeetrite täpsusklass on 1,5 ja 2,5. Neid kasutatakse peamiselt kõrgema sagedusega (kuni 10 MHz) pinge mõõtmiseks.

c) Elektromagnetilist süsteemi voltmeetrid

Elektromagnetilist süsteemi voltmeeter koosneb sama süsteemi mõõtemehhanismist nimivooluga 25—50 mA ja sellega järjestikku ühendatud eeltakistist (joon. 6-17).

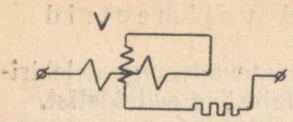
Induktiivsusvaba eeltakisti takistus on palju suurem mõõtemehhanismi pooli reaktiivtakistusest, mistõttu voltmeetri takistus kujutab endast praktiliselt aktiivtakistust. Seega ei sõltu voltmeetri takistus (ja järelikult ka näit) voolu liigist ega sagedusest.

Voltmeetri skaalale on kantud tema klemmidele rakendatud pingele vastavad jaotused.

Seda süsteemi voltmeetrid on saavutanud ulatusliku leviku kilbimõõteriistadena (täpsusklass 1,5 ja 2,5) vahelduvvooluseadmetes. Astaatilisi elektromagnetilisi voltmeetreid (näiteks tüüp ACT-B täpsusklassiga 0,5) kasutatakse laialdaselt laboratoorsete mõõteriistadena vahelduvpinge mõõtmiseks.

d) Elektrodünaamilist süsteemi voltmeetrid

Elektrodünaamilist süsteemi voltmeeter koosneb sama süsteemi mõõtemehhanismist (vt. § 6-3) nimivooluga 20—30 mA



Joon. 6-20. Elektrodünaamilise voltmeetri ühendusskeem.

ja sellega järjestikku ühendatud eeltakistist (joon. 6-20).

Voltmeetri skaalale on kantud jaotused, mis vastavad voltmeetri klemmidele rakendatud pingele.

Samuti nagu elektromagnetilist süsteemi voltmeetri puhul on ka siin eeltakisti ülesandeks pinge mõõtepiirkonna laiendamine ja temperatuurist, voolu liigist ning sagedusest tingitud mõõtevigade vähendamine.

Seda tüüpi voltmeetreid kasutatakse normaal- ja laboratoorsete mõõteriistadena (täpsusklass 0,2 ja 0,5) vahelduvpinge mõõtmiseks.

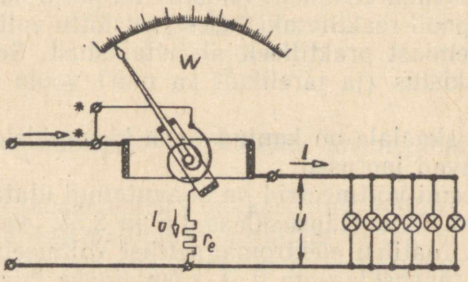
6-6. Võimsuse mõõtmine

Alalisvoolu korral määratakse võimsus valemiga

$$P = IU.$$

Seega tuleb sel juhul võimsuse leidmiseks mõõta ampermeetriga vool ja voltmeetriga pinge.

Alalisvoolu võimsust võib mõõta samuti elektrodünaamilise vattmeetriga.



Joon. 6-21. Elektrodünaamilise vattmeetri ehitus ja lülitusskeem.

Elektrodünaamiline vattmeeter koosneb sama süsteemi mõõtemehhanismist, mille liikumatu pool ühendatakse tarbijaga järjestikku, eeltakistiga ühendatud liikuv pool aga tarbijaga paralleelselt (joon. 6-21).

Vastavalt lülitusskeemile nimetatakse järjestikust mähist voolumähiseks, paralleelset mähist aga pingemähiseks.

Elektrodünaamilise mõõtemehhanismi liikuva osa pöördenurk tema lülitamisel alalisvooluahelasse on võrdeline mähiseid läbivate voolude korrutisega, s. o.

$$\alpha = k_2 I I_U,$$

kus I — voolumähise vool;
I_U — pingemähise vool.

Pingemähise muutumatu takistuse korral on vool $I_U = U : r_U$ võrdeline pingega. Järelikult on vattmeetri liikuva osa pöördenurk võrdeline võimsusega:

$$\alpha = k_2 I I_U = k_2 I \frac{U}{r_U} = k_3 I U = k_3 P.$$

Vattmeetri skaalale kantakse võimsusele vastavad jaotused. Aktiivvõimsus vahelduvvoolu korral

$$P = IU \cos \varphi.$$

Selle võimsuse mõõtmiseks kasutatakse elektrodünaamilisi, ferrodünaamilisi ja induktsioonsüsteemilisi vattmeetreid.

Elektrodünaamilise vattmeetri lülitamisel vahelduvvooluahelasse pöördub mõõtemehhanismi liikuv osa nurga võrra, mis on määratav valemiga:

$$\alpha = k_2 I_1 I_2 \cos \psi = k_2 I I_U \cos \psi.$$

Vool induktiivsusvabas konstantse takistusega pingemähises $I_U = U : r_U$ on võrdeline pingega ja on sellega faasis (joon. 6-22). Järelikult on nurk ψ voolude I ja I_U vahel võrdeline nurgaga voolumähise voolu I ja pingemähise klemmidele rakendatud pinge U vahel. Vattmeetri liikuva osa pöördenurk

$$\alpha = k_2 I I_U \cos \psi = k_2 I \frac{U}{r_U} \cos \varphi = k_3 I U \cos \varphi = k_3 P, \qquad (6\text{-}8)$$

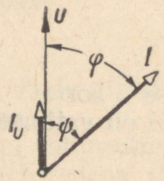
s. t. pöördenurk on võrdeline aktiivvõimsusega.

Elektrodünaamilisi vattmeetreid kasutatakse peamiselt normaalmõõteriistadena (täpsusklass 0,1—0,5).

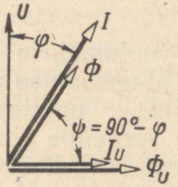
Tehniliste vattmeetritena kasutatakse ferrodünaamilisi ja induktsioonsüsteemilisi vattmeetreid (täpsusklass 1,5 ja 2,5).

Induktsioonsüsteemiline vattmeeter (tüüp ВИО) koosneb

sama süsteemi mõõtemehhanismist (joon. 6-7), mille üks mähis on lülitatud tarbijaga järjestikku (voolumähis), teine aga tarbijaga paralleelselt (pingemähis). Vattmeetri mähiseid läbivad voolud I ja I_U tekitavad magnetvood Φ ja Φ_U. Kui voolumähise voog Φ on võrdeline vooluga I ja on



Joon. 6-22. Elektrodünaamilise vattmeetri vektordiagramm.



Joon. 6-23. Induktsioonsüsteemilise vattmeetri vektordiagramm.

sellega faasis ning pingemähise voog Φ_U on võrdeline pingega U, kuid jääb sellest faasis $^1/_4$ perioodi võrra maha (samuti nagu vool pingemähises) (joon. 6-23), siis vattmeetri liikuva osa pöördenurk

$$\alpha = k_1 \Phi \Phi_U \sin\psi = k_2 IU \sin(90 - \varphi) = k_2 IU \cos\varphi = k_2 P.$$

Niisiis on vattmeetri liikuva osa pöördenurk võrdeline aktiivvõimsusega.

Voolu suuna muutmine vattmeetri ühes mähises põhjustab tema liikuva osa pöördumise vastupidises suunas. Seepärast tuleb vattmeetri lülitamisel ahelasse pöörata tähelepanu klemmide märgistusele.

Vattmeetri voolumähise algusega ühendatud klemm (mis ühendatakse toiteallikaga) on märgistatud tähekesega (*). Vattmeetri voolumähisega ühendatav pingemähise klemm (pingemähise algus) on märgistatud sama tingmärgiga.

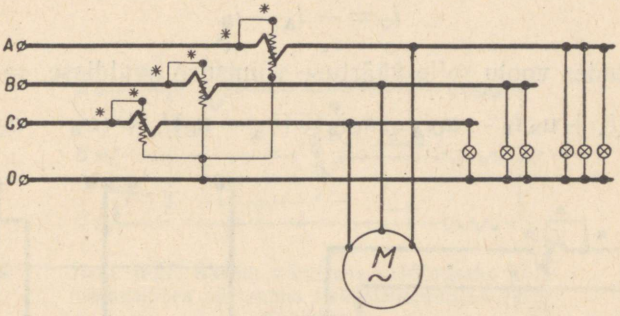
Vattmeetrid valmistatakse tavaliselt nimivoolule 5 A ja nimipingele 220 V.

Kui on vaja mõõta võimsust ahelas, kus vool on üle 5 A ja pinge ületab 220 V, siis lülitatakse vattmeetrid ahelasse vooluja pingetrafode kaudu, mida käsitletakse § 8-9.

Kolmefaasilise neljajuhtmelise süsteemi (joon. 6-24) võimsus võrdub üksikute faaside võimsuste summaga, s. o.

$$P = P_A + P_B + P_C = U_A I_A \cos\varphi_A + U_B I_B \cos\varphi_B + U_C I_C \cos\varphi_C.$$

Sel juhul tuleb võimsuse mõõtmiseks lülitada ahelasse kolm vattmeetrit nii, et iga vattmeeter mõõdaks eri faasi võimsust. Üldise võimsuse saamiseks tuleb üksikute vattmeetrite näidud liita.



Joon. 6-24. Skeem võimsuse mõõtmiseks neljajuhtmelises kolmefaasilises süsteemis.

Kolme vattmeetri asemel on otstarbekas kasutada üht kolmeelemendilist vattmeetrit.

Elektrodünaamiline kolmeelemendiline vattmeeter koosneb kolmest liikumatust ja kolmest liikuvast poolist, mille külge on kinnitatud osuti. Mõõteriista skaalale on kantud kolmefaasilisele võimsusele vastavad jaotused. Selle vattmeetri lülitusskeem sarnaneb kolme ühefaasilise vattmeetri lülitusskeemile.

Kolmefaasilise kolmejuhtmelise süsteemi võimsust saab ühtlaselt koormatud faaside korral mõõta ühte faasi lülitatud vattmeetri abil. Kolmefaasilise võimsuse saamiseks tuleb vattmeetri näit korrutada kolmega.

Joonisel 6-25 on antud vattmeetri ühendamise skeem mootori võimsuse mõõtmiseks, kui nullpunkt on kättesaadav.

Joonisel 6-26 on toodud vattmeetri skeem kolmnurka ühendatud mähistega mootori võimsuse mõõtmiseks.

Ebasümmeetrilise koormuse korral mõõdetakse kolmefaasilise kolmejuhtmelise süsteemi võimsust kaheelemendilise vattmeetriga. Kaheelemendilisel induktsioonvattmeetri (tüüp ВИТ) liikuvaks osaks on osutiga ühendatud alumiiniumketas, millele mõjub kaks elektromagnetite süsteemi, milledest kumbki koosneb voolu- ja pingemagnetist.

Kolmefaasilise süsteemi hetkvõimsus

$$p = p_A + p_B + p_C = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C.$$

Kui elektrienergia tarbijad on ühendatud tähte, siis

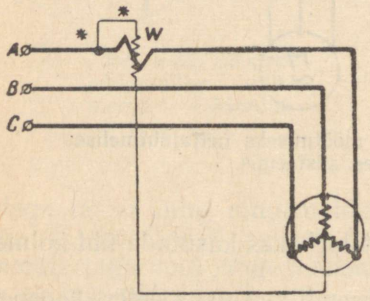
$$i_A + i_B + i_C = 0,$$

millest

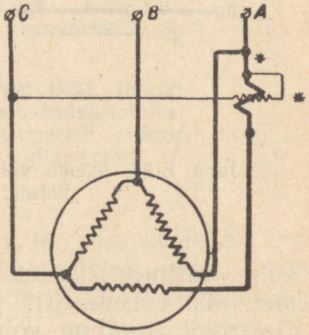
$$i_C = -i_A - i_B.$$

Asetades voolu selle väärtuse võimsuse avaldisse, saame:

$$p = u_A i_A + u_B i_B - u_C i_A - u_C i_B = (u_A - u_C) i_A + (u_B - u_C) i_B.$$



Joon. 6-25. Skeem võimsuse mõõtmiseks kolmefaasilises süsteemis sümmeetrilise koormuse korral, kui nulljuhe on kättesaadav.



Joon. 6-26. Skeem võimsuse mõõtmiseks kolmefaasilises süsteemis sümmeetrilise koormuse korral, kui tarbija on ühendatud kolmnurka.

Kuna tähtühenduse korral võrdub kahe faasipinge vahe liinipingega:

$$u_A - u_C = u_{AC} \quad \text{ja} \quad u_B - u_C = u_{CB},$$

siis

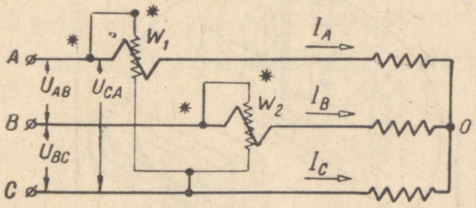
$$p = u_{AC} i_A + u_{BC} i_B = p_1 + p_2, \qquad (6\text{-}9)$$

s. t. kolmefaasilise süsteemi hetkvõimsust võib kujutada kahe komponendi p_1 ja p_2 summana.

Järelikult kui vattmeetri esimese elemendi voolumähis lülitada järjestikku faasi A (joon. 6-27) ning pingemähis faaside A ja C vahele ja teise elemendi voolumähis lülitada faasi B ning pingemähis faaside B ja C vahele, siis vattmeetri liikuvale osale mõjuv pöördemoment on võrdeline kolmefaasilise süsteemi võimsuse hetkväärtusega. Vattmeetri liikuva osa

pöördenurk, olles võrdeline pöördemomendi keskväärtusega, on võrdeline kolmefaasilise süsteemi aktiivvõimsusega.

Kaheelemendilise vattmeetri käsitletud lülitusskeem on üks võimalikest lülitusskeemidest. Vattmeetri lülitamiseks kolmefaasilisse süsteemi võib kasutada üldist juhist: vattmeetri



Joon. 6-27. Skeem võimsuse mõõtmiseks kolmefaasilises süsteemis kaheelemendilise vattmeetriga.

voolumähised lülitatakse kahte vabalt valitud faasi, pingemähiste algused ühendatakse voolumähiste algustega, pingemähiste ülejäänud klemmid aga ühendatakse selle faasiga, kuhu ei ole lülitatud voolumähist.

Kaheelemendilise vattmeetri asemel võib kasutada kaht üheelemendilist vattmeetrit, mis tuleb lülitada kolmefaasilisse süsteemi sama skeemi järgi kui kaheelemendiline vattmeetergi. Sel juhul tuleb kolmefaasilise süsteemi võimsuse saamiseks liita algebraliselt mõlema vattmeetri näidud.

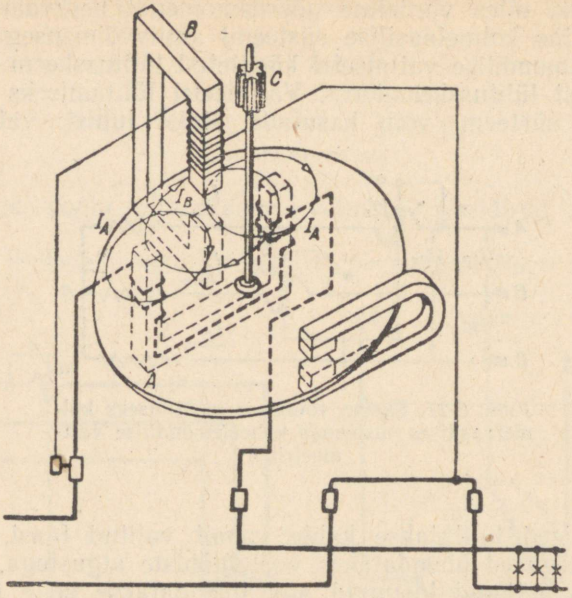
6-7. Ühefaasilise ja kolmefaasilise süsteemi energia mõõtmine

Vahelduvvoolu energia mõõtmiseks kasutatakse induktsioonarvestit, mille ehitus on näidatud joonisel 6-28.

Arvesti koosneb teljele kinnitatud alumiiniumkettast ja kahest elektromagnetist — voolumagnetist *A* ja pingemagnetist *B*.

Elektromagnetite mähiseid läbiv vool tekitab kaks magnetvoogu, mis ahelduvad kettaga ja indutseerivad selles pööris-voolud I_A ja I_B. Voolu I_A ja magnetvoo Φ_B ning voolu I_B ja voo Φ_A vastastikuse mõju tulemusena tekib nagu induktsioonvattmeetriski pöördemoment M, mis on võrdeline tarbija võimsusega:

$$M = k_1 P.$$



Joon. 6-28. Induktsioonarvesti ehitus ja lülitusskeem.

Pöördemomendi tõttu hakkab arvesti ketas pöörlema.

Ketta pöörlemisel pidurdava püsivmagneti väljas indutseeritakse kettas pöörisvoolud; nende voolude ja sama magneti välja vastastikuse mõju tulemusena tekib pidurdusmoment, mis on võrdeline ketta pöörlemiskiirusega n, s. o.

$$M_p = k_2 n.$$

Muutumatu koormuse korral pöörleb ketas konstantse kiirusega. Sel juhul on pöördemoment ja pidurdusmoment omavahel võrdsed:

$$M = M_p,$$

millest järeldub, et

$$k_1 P = k_2 n$$

ehk

$$P = \frac{k_2}{k_1}\ n = kn.$$

Saadud avaldisest nähtub, et arvesti ketta pöörlemiskiirus on võrdeline tarbitava võimsusega.

Kui aja t vältel tarbitakse energiat $W = Pt$, siis, pidades silmas, et $P = kn$, saame:

$$W = Pt = knt = kN, \qquad (6\text{-}10)$$

kus $N = nt$ — ketta pöörete arv aja t vältel.

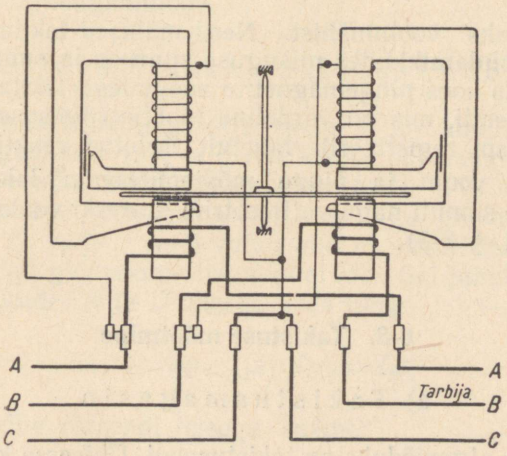
Seega on arvestit läbiv energia võrdeline arvesti ketta pöörlemiskiirusega.

Suurus

$$k = \frac{W}{N} \qquad (6\text{-}11)$$

on arvuliselt võrdne ketta ühe pöörde vältel arvestit läbiva energiaga ja seda nimetatakse arvesti konstandiks. Võrgust tarbitav energia registreeritakse arvesti arvestusmehhanismi poolt, mida käitatakse arvesti teljele kinnitatud hammasrattalt C.

Energia mõõtmiseks kolmefaasilises neljajuhtmelises võrgus kasutatakse kolmeelemendilist arvestit, mille põhimõtteline lülitusskeem on samasugune kui vastaval vattmeetril (joon. 6-24). Niisugune arvesti koosneb kolmest elektromagnetite süsteemist, mis toimivad ühisele teljele kinnitatud

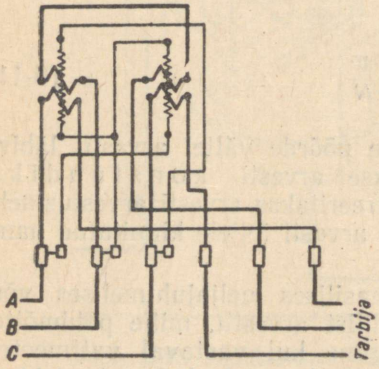


Joon. 6-29. Ühe kettaga kaheelemendilise arvesti ehitus ja lülitusskeem.

kolmele kettale. Arvestil on üks arvestusmehhanism. Kolmeelemendilise arvesti elektromagnetite elementide ehitus ei erine ühefaasilise arvesti ehitusest.

Kolmefaasilises kolmejuhtmelises võrgus mõõdetakse energiat kaheelemendilise arvestiga. Sel arvestil on kaks elektromagnetite süsteemi, mis toimivad ühisele teljele kinnitatud kahele kettale või ühele kettale (joon. 6-29).

Mõnikord kasutatakse kaheelemendilise arvesti asemel kaht üheelemendilist (ühefaasilist) arvestit. Nii kaheelemendilise arvesti kui ka kahe üheelemendilise arvesti lülitusskeem ei erine kaheelemendilise vattmeetri lülitusskeemist.



Joon. 6-30. Reaktiivenergia arvesti ИР lülitusskeem.

Reaktiivenergia mõõtmiseks kolmefaasilises süsteemis kasutatakse reaktiivenergia arvesteid.

Ühe sellise arvesti (tüüp ИР) skeem on toodud joonisel 6-30.

Kaheelemendiline induktsioonarvesti ИР erineb vastavast aktiivenergia arvestist selle poolest, et igal voolumagnetil on mitte üks, vaid kaks voolumähist. Need mähised tekitavad voolumagnetite südamikkudes niisuguse suuruse ja suunaga magnetvood, mis koos pingemagnetite voogudega tekitavad sellise pöördemomendi, mis on võrdeline reaktiivvõimsusega. Arvestusmehhanism registreerib vahetult tarbitud reaktiivenergiat.

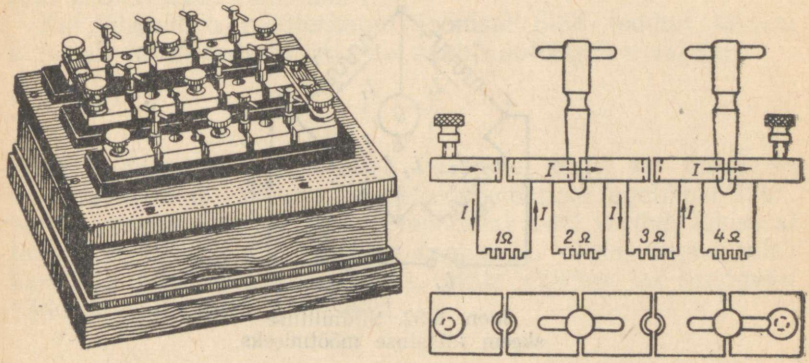
Arvestite voolu ja pinge mõõtepiirkonna laiendamiseks kasutatakse samuti nagu vattmeetrite juureski voolu- ja pingetrafosid (vt. § 8-9).

6-8. Takistuse mõõtmine

a) Takistusmagasin

Takistuse algmõõduks on takistuspool. Ühisesse kasti paigutatud takistuspoolide komplekti nimetatakse takistusmagasiniks (joon. 6-31).

Takistuspoolid valmistatakse manganiinist, mille takistuse temperatuuritegur on väga väike; seetõttu on pooli takistus peaaegu temperatuurist sõltumatu.



Joon. 6-31. Takistusmagasin.

Poolide otsad ühendatakse messingplaatide külge (joon. 6-31), milledes on koonilised augud vastava pooli lühistamiseks pistiku abil.

b) Sildlülituses takistusemõõtja

Sildlülituses takistusemõõtja (joon. 6-32) koosneb kolmest takistusmagasinist: r_1, r_2 ja r, mis koos mõõdetava takistusega r_x moodustavad suletud vooluahela $ABCD$, mille ühte diagonaali lülitatakse galvanomeeter, teise aga galvaanielement. Takistused r_1, r_2 ja r saab valida nii, et sisselülitatud lülitite L_1 ja L_2 puhul galvanomeetrit vool ei läbi. Sel juhul on potentsiaalid punktides B ja D ühesuurused ning

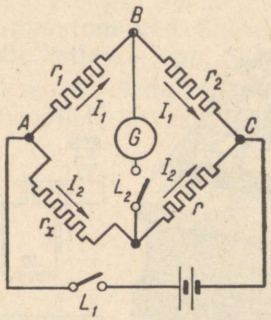
$$I_1 r_1 = I_2 r_x \quad \text{ja} \quad I_1 r_2 = I_2 r.$$

Jagades ühe võrrandi teisega, saame:

$$\frac{I_1 r_1}{I_1 r_2} = \frac{I_2 r_x}{I_2 r},$$

millest

$$r_x = r\frac{r_1}{r_2}. \qquad (6\text{-}12)$$



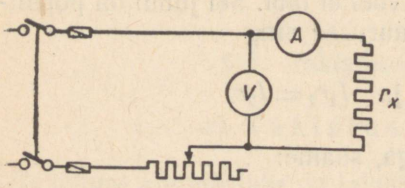
Joon. 6-32. Sildlülituse skeem takistuse mõõtmiseks.

Mõõtmiseks ühendatakse mõõdetav takistus r_x takistusemõõtja vastavate klemmidega, valitakse takistuste r_1 ja r_2 sobiv suhe ja takistuse r muutmisega viiakse galvanomeetri osuti nulli.

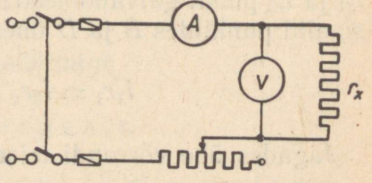
c) Takistuse mõõtmine voltmeetri ja ampermeetri abil

Kui lülitada alalisvooluvõrku joonisel 6-33 näidatud lülitus ja märkida üles mõõteriistade näidud, siis saab valemi

$$r'_x = \frac{U}{I}$$



Joon. 6-33. Takistuse mõõtmine voltmeetri ja ampermeetri abil (suure takistuse korral).



Joon. 6-34. Takistuse mõõtmine voltmeetri ja ampermeetri abil (väikse takistuse korral).

abil leida otsitava takistuse väärtuse. Kuid mõõtmistulemus on suurem mõõdetava takistuse tegelikust väärtusest ampermeetri takistuse võrra, sest sellise skeemi järgi lülitatud voltmeeter mõõdab ka ampermeetril tekkivat pingelangu. Seda skeemi tuleb kasutada juhul, kui mõõdetav takistus on tunduvalt suurem ampermeetri takistusest.

Kui ühendada mõõteriistad joonisel 6-34 toodud skeemi kohaselt ja lülitada võrku, siis saab analoogilise valemi

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

järgi leida otsitava takistuse väärtuse. Kuid sel juhul on mõõtmistulemus väiksem mõõdetava takistuse tegelikust väärtusest, sest ampermeetri poolt mõõdetav vool võrdub takistust ja voltmeetrit läbivate voolude summaga. Seda skeemi tuleb kasutada takistuste mõõtmiseks, mille väärtus on tunduvalt väiksem voltmeetri takistusest.

d) Oommeetrid

Takistuse otseseks mõõtmiseks ettenähtud mõõteriistu nimetatakse oommeetriteks või megaoommeetriteks (megeriteks).

Nad jaotatakse kahte rühma: 1) oommeetrid, mille näidud sõltuvad toiteallika pingest, ja 2) oommeetrid, mille näidud ei sõltu toiteallika pingest.

Nii esimesed kui ka teised võivad olla kas järjestikku- või paralleellülituses.

Esimesse rühma kuuluv järjestikku-lülituses oommeeter (joon. 6-35) koosneb magnetelektrilist süsteemi mõõtemehhanismist, eeltakistist ja toiteallikast, milleks on kuivelementide patarei. Mõõdetav takistus r_x lülitatakse järjestikku eeltakistiga.

Kui lüliti L on sisse lülitatud, läbib mõõteriista vool

$$I = c\alpha = \frac{U}{r_x + r_{mm} + r_e}, \qquad (6\text{-}13)$$

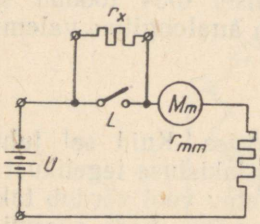
kus α — mõõtemehhanismi liikuva osa pöördenurk;

$C = \frac{I}{\alpha}$ — võrdelisuse tegur.

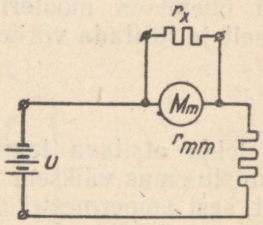
Avaldisest (6-13) järeldub, et liikuva osa pöördenurk

$$\alpha = \frac{U}{c} \cdot \frac{1}{r_x + r_{mm} + r_e}.$$

Mõõtemehhanismi ja eeltakisti takistused on kõigis oommeetrites konstantsed. Kui suhe U/c jääb samuti konstantseks, siis sõltub oommeetri liikuva osa pöördenurk ainult otsitavast takistusest ja mõõteriista skaalale võib kanda takistuse väärtused.



Joon. 6-35. Järjestikku-lülituses oommeetri skeem.



Joon. 6-36. Paralleellülituses oommeetri skeem.

Toitepatarei pinge aja jooksul muutub. Selleks et säilitada suhe U/c muutumatuna, tuleb reguleerida suurust c. Selle suuruse reguleerimiseks muudetakse magnetšundi abil väljatihedust mõõtemehhanismi õhupilus. Magnetšundiks on terasplaat, mille kaugust mõõtemehhanismi pooluskingadest $N'S'$ saab kruvi abil muuta.

Reguleerimine toimub järgmiselt. Toiteallikas ja mõõdetav takistus ühendatakse oommeetriga, lüliti L suletakse (joon. 6-35) ning kruvi pööramisega viiakse magnetšunt sellisele kaugusele pooluskingadest, mispuhul oommeetri osuti näitab nulli. Seejärel lüliti L avatakse ja mõõteriista osuti näitab skaalal mõõdetava takistuse väärtust.

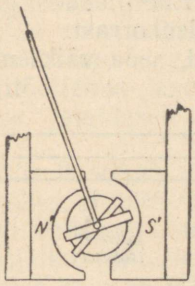
Paralleellülituses oommeeter (joon. 6-36) koosneb samuti magnetelektrilist süsteemi mõõtemehhanismist ja eeltakistist. Mõõdetav takistus lülitatakse mõõtemehhanismiga paralleelselt.

Võib tõestada, et muutumatute takistuste r_{mm} ja r_e ning suhte U/c korral sõltub mõõtemehhanismi pöördenurk ainult mõõdetavast takistusest r_x.

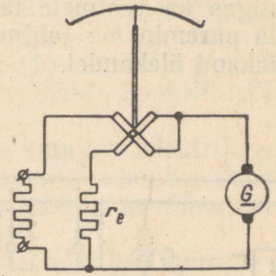
Oommeetritel, mille näidud ei sõltu toiteallika pingest, on osutiga ühisele teljele kinnitatud kahe liikuva raamiga magnetelektrilist süsteemi mõõtemehhanism (joon. 6-37). Vool juhitakse liikuvatesse raamidesse elastsete lintide kaudu, mis praktiliselt ei tekita vastumomenti. Pöördemomentide puudumisel on mõõtemehhanism indiferentses (ükskõikses) tasakaalus.

Mehhanismi liikumatu osa koosneb magnetist, pooluskingadest ja terassilindrist.

Raamides kulgeva voolu ja magneti välja vastastikusel mõjul tekib kaks vastassuunalist pöördemomenti. Nende pöörde-



Joon. 6-37. Logomeetri mõõtemehhanism.



Joon. 6-38. Logomeetri skeem.

momentide vahe mõjul pöördub liikuv osa seni, kuni momendid võrdsustuvad. Seejuures määrab mõõtemehhanismi liikuva osa pöördenurga raamides esinevate voolude suhe, s. o.

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right).$$

Mõõtemehhanisme, mille pöördenurk sõltub voolude suhtest, nimetatakse logomeetriteks.

Kui kaks raami koos nendega järjestikku ühendatud kahe takistiga moodustavad kaks paralleelharu (joon. 6-38), milledest üks on mõõdetav takistus r_x ja teine muutumatu väärtusega eeltakisti r_e, siis, võttes arvesse, et voolud paralleelharudes jagunevad pöördvõrdeliselt harude takistustega, võib kirjutada:

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left(\frac{r_x}{r_e}\right).$$

Järelikult sõltub logomeetri liikuva osa pöördenurk ainult mõõdetava takistuse suurusest. Mõõteriista skaalale kantakse mõõdetava takistuse väärtustele vastavad jaotused.

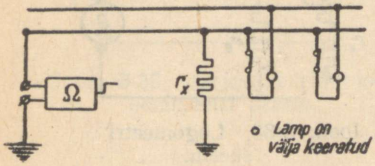
Logomeetri toiteallikana kasutatakse tavaliselt väikest magnetelektrilist generaatorit, mis monteeritakse mõõteriista kestasse ja käitatakse käsitsi.

e) Isolatsioonitakistuse mõõtmine

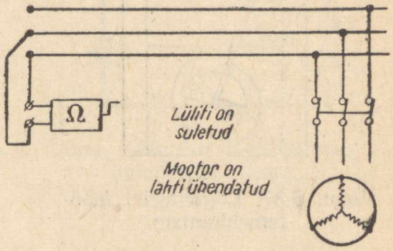
Elektrijaamas toodetav elektrienergia kantakse tarbijaile üle juhtmete süsteemi kaudu.

Alati püütakse saavutada seda, et elektrienergia ülekanne toimuks võimalikult väikeste kadudega. Energiakaod sõltuvad muuhulgas ka juhtmete isolatsiooni seisukorrast.

Mida paremini on juhtmed isoleeritud, seda väiksemad on energiakaod ülekandel.



Joon. 6-39. Skeem juhtmete ja maa vahelise isolatsioonitakistuse mõõtmiseks.



Joon. 6-40. Skeem juhtmetevahelise isolatsioonitakistuse mõõtmiseks.

Juhtmete isolatsioon muutub ekspluatatsioonis pidevalt, seepärast tuleb seda perioodiliselt kontrollida.

Elektrotehniliste eeskirjade kohaselt peab madalpingeseadmetes isolatsioonitakistus kahe teineteisele järgneva kaitsme vahel või viimase kaitsme järel asuval võrguosal olema vähemalt 1000 oomi võrgu nimipinge iga voldi kohta; näiteks 120 V pingega võrgu isolatsioonitakistus peab olema vähemalt $1000 \times 120 = 120\,000$ oomi.

Võrgu isolatsioonitakistust mõõdetakse megaoommeetriga ehk megeriga; seejuures peab mõõdetav võrguosa olema pingestamata.

Isolatsiooni mõõtmiseks ühendatakse megeri üks klemm (millel on tähis *Л*) proovitava juhtmega, teine klemm aga (millel on tähis *З*) ühendatakse maaga (joon. 6-39). Pöörates megeri vänta nimikiirusega, loetakse skaalalt otsitav takistuse väärtus.

Samasugusel viisil mõõdetakse ka teiste võrgujuhtmete isolatsioonitakistust maa suhtes. Kahe juhtme vahelise isolatsiooni mõõtmiseks ühendatakse megeri klemmid kahe proovitava juhtmega (joon. 6-40). Analoogiliselt mõõdetakse ka elektrimasinate isolatsioonitakistust.

6-9. Mitteelektriliste suuruste mõõtmine elektrilisel teel

Mitteelektriliste suuruste mõõtmine elektriliste meetodite abil moodustab mõõtetehnika laialdase ala.

Sotsialistliku plaanimajanduse tingimustes iseloomustab kaasaegset tootmist range kontroll tehnoloogiliste protsesside üle, mida on võimalik teostada ainult mõõtetehnika ja automaatika vahenditega. Seepärast kasutatakse metallurgia-, metallitöötlemis-, keemia-, tekstiili-, toiduainete- jne. tööstuse tehastes laialdaselt kõige erinevamaid kontroll-mõõteseadiseid.

Tavaliselt seisab mitteelektriliste suuruste elektriline mõõtmine selles, et mitteelektriline suurus muundatakse temast sõltuvaks elektriliseks suuruseks, mille mõõtmine võimaldab määrata vajaliku mitteelektrilise suuruse.

Seadist, mis on ette nähtud mitteelektrilise suuruse muundamiseks elektriliseks, nimetatakse t u n d l a k s (mõõtesaatjaks).

Tundlad jaotatakse kahte põhirühma: parameetrilisteks ja genereerivateks tundlateks.

P a r a m e e t r i l i s t e s t u n d l a t e s muudab mitteelektriline suurus mingit tundla parameetrit (takistust, induktiivsust, mahtuvust); sellele vastavalt liigitatakse nad takistustundlateks, induktiivtundlateks ja mahtuvustundlateks.

G e n e r e e r i v a t e s t u n d l a t e s põhjustab mitteelektriline suurus elektromotoorse jõu; sõltuvalt selle elektromotoorse jõu tekkimise iseloomust liigitatakse nad induktsioontundlateks, termoelektrilisteks tundlateks jt.

Niisiis seadis mitteelektriliste suuruste mõõtmiseks elektrilisel teel koosneb lihtsaimal juhul kolmest elemendist: tundlast, elektrilülitusest ja mõõtemehhanismist, mille skaala gradueeritakse mõõdetava mitteelektrilise suuruse ühikutes.

Tavaliselt aga on mitteelektriliste suuruste mõõteseadis palju komplitseeritum, sest kasutatakse keerukaid lülitusi, näiteks sildlülitust, samuti toiteallikaid, stabilisaatoreid, võimendajaid jne.

Näidetena käsitleme mõningaid tundlaid ja nende kasutamist.

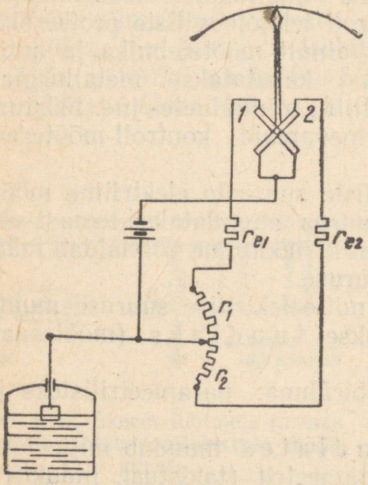
a) T a k i s t u s t u n d l a d

Joonisel 6-41 on kujutatud reostaattundla kasutamise skeem. Lülitus on ette nähtud vedeliku mahu ja nivoo mõõtmiseks. Ujuki asendi muutumine kutsub esile takistuste r_1 ja r_2 muu-

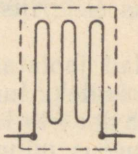
tumise, mis on järjestikku logomeetri mähistega *1* ja *2*. Nende takistuste muutumisel muutub voolude suhe logomeetri mähistes, mille tulemusena logomeetri näit muutub. Logomeetri skaalale on kantud kas vedeliku mahu väärtused või vedeliku nivoo väärtused.

Traat-takistustundlaid rakendatakse konstruktsioonides ja detailides esineva deformatsiooni mõõtmiseks.

Traattundel valmistatakse suure eritakistusega traadist, läbimõõduga 0,02—0,05 mm, ja kinnitatakse



Joon. 6-41. Nivoomõõtja skeem.



Joon. 6-42. Traattundla skeem.

liimi abil kahe õhukese paberilehe vahele (joon. 6-42). Traadi otstesse keevitatakse vasest väljaviigud. Selline tundel liimitakse katsetatava konstruktsiooni või detaili pinnale, kus see teeb kaasa kõik detaili deformatsioonid. Deformeerimisel muutub tundla takistus, mida mõõdetakse elektrilisel teel.

Takistustundel temperatuuri mõõtmiseks (termotakisti) koosneb metalltraadist (vasest, terasest, niklist, plaatinast), mis on mähitud isoleerainest alusele. Paigutades sellise termotakisti mõõdetava temperatuuriga keskkonda, muutub selle takistus sõltuvalt temperatuurist.

Sel juhul saab temperatuuri määrata kahel meetodil.

1. Mõõdetakse sillaga termotakisti takistus r_{x1} teadaoleval algtemperatuuril Θ_1 ja takistus r_{x2} otsitaval temperatuuril Θ_{x2}. Teades takistuse temperatuuritegurit α, arvutatakse valemi (2-25) abil otsitav temperatuur Θ_{x2}.

2. Algtemperatuuril $\Theta_1 = 20°$ C sild tasakaalustatakse (joon. 6-32), kusjuures

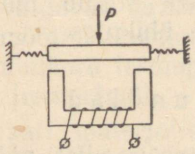
$$\frac{r_{x1}}{r} = \frac{r_1}{r_2}.$$

Paigutades termotakisti mõõdetava temperatuuriga keskkonda, annab galvanomeetri osuti hälbe, mis sõltub sillale rakendatud pingest ja termotakisti takistusest.

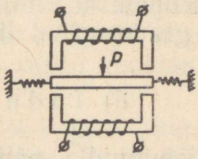
Kui hoida reostaadi abil silla klemmidele rakendatud pinge konstantsena, siis sõltub galvanomeetri näit ainult termotakisti takistusest r_x, seega ka temperatuurist. Järelikult võib galvanomeetri skaalale kanda mitmesugustele temperatuurile vastavad väärtused ja osuti asendi järgi leida otsitava temperatuuri.

b) Induktiivtundlad

Ühe induktiivtundla skeem on kujutatud joonisel 6-43. Tundel koosneb elektromagnetist, mille ankur võib mõõdetava mehaanilise suuruse mõjul liikuda. Ankru asendi muutumisel muutub õhupilu ja järelikult ka elektromagneti pooli induktiivsus.



Joon. 6-43. Induktiivtundla skeem.



Joon. 6-44. Diferentsiaalse induktiivtundla skeem.

Mõõtemehhanismi liikuva osa pöördenurk sõltub elektromagneti pooli induktiivsusest ja järelikult võib mõõtemehhanismi skaala gradueerida mõõdetava mehaanilise suuruse ühikutes.

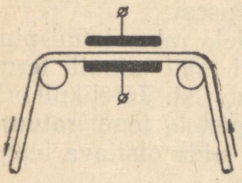
Laialdaselt on levinud nn. diferentsiaalsed induktiivtundlad (joon. 6-44), mille puhul ankru liikumisel muutuvad kahe elektromagneti õhupilud. Õhupilude muutumine kutsub esile ühe pooli induktiivsuse suurenemise ja teise vähenemise, mistõttu suureneb tundla tundlikkus.

c) Mahtuvustundlad

Mahtuvustundlaks on tasapinnaline (harvem teistsuguse kujuga) kondensaator, mille mahtuvus sõltub elektroodide pindalast ja vahekaugusest, nende vastastikusest asendist ning

samuti dielektriku mõõdetest ja omadustest (dielektrilisest läbitavusest).

Mahtuvustundlaid saab kasutada mitmesuguste mitteelektriliste suuruste mõõtmiseks, mille väärtus võib olla seoses kondensaatori mahtuvust määrava suuruse muutumisega; näiteks võib neid kasutada: vedeliku mahu ja nivoo mõõtmiseks, mitmesuguste mehaaniliste suuruste (jõud, rõhk, lineaarne nihe, pöördenurk) mõõtmiseks, kiudainete niiskuse mõõtmiseks jne.



Joon. 6-45. Skeem lindi paksuse mõõtmiseks mahtuvustundla abil.

Kummilindi paksuse mõõtmiseks võib kasutada tundlat, mille skeem on toodud joonisel 6-45. Katsetatav lint tõmmatakse läbi kondensaatori kahe liikumatu plaadi vahelt. Kui lindi paksus on muutumatu, siis on ka kondensaatori mahtuvus konstantne. Lindi paksuse muutumisel kondensaatori plaatide vahe muutub ja õhu ning kummi erinevate dielektriliste läbitavuste tõttu tundla mahtuvus kas suureneb või väheneb.

Mõõtemehhanism, mille pöördenurk sõltub mahtuvusest, võib olla gradueeritud lindi paksuse ühikutes.

d) Induktsioontundlad

Induktsioontundla näitena käsitleme seadist pöörlemiskiiruse määramiseks (induktsioontahhomeetrit).

Tundlaks on väike magnetelektriline elektrimasin, mille klemmipinge on võrdeline tema ankru pöörlemiskiirusega. Et aga selle masina ankur on mehaanilise ülekande kaudu ühendatud masina võlliga, mille pöörlemiskiirust mõõdetakse, siis on magnetelektrilise elektrimasina klemmipinge võrdeline mõõdetava pöörlemiskiirusega. See pinge rakendatakse magnetelektrilist süsteemi mõõtemehhanismile, mille skaala on gradueeritud pöörlemiskiiruse ühikutes.

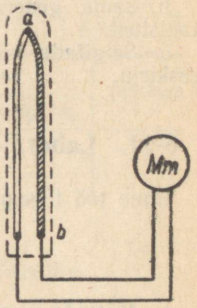
e) Termoelektrilised tundlad

Termoelektrilisest tundlast ja mõõtemehhanismist koosnevat seadist, mis on ette nähtud temperatuuri mõõtmiseks, nimetatakse termoelektriliseks püromeetriks.

Termoelektriliseks tundlaks on termopaar, mis ühendatakse magnetelektrilist süsteemi mõõtemehhanismiga (joon. 6-46).

Termopaari keevituskoha kuumendamisel tekib termoelektro-

motoorne jõud, mille suurus sõltub temperatuuride vahest keevituskoha ja vabade otste vahel. Kui vabade otste temperatuur on konstantne, siis sõltub termoelektromotoorne jõud ainult termopaari keevituskoha temperatuurist. Termoelektromotoorne jõud põhjustab mõõtemehhanismi ahelas voolu ja järelikult pöördub selle liikuv osa teatud nurga võrra, mille suuruse järgi saab otsustada termopaari keevituskoha temperatuuri üle. Mõõtemehhanismi skaala gradueeritakse temperatuuri ühikutes. Termopaari keevituskoht paigutatakse punkti, mille temperatuuri tuleb mõõta. Termopaari juhtmed peavad olema küllalt pikad, et ühendusjuhtmetega ühendatud vabad otsad asuksid sama temperatuuriga keskkonnas, mille juures püromeeter gradueeriti.



Joon. 6-46. Termoelektrilise tundla skeem.

Kõrge temperatuuri mõõtmisel ei põhjusta vabade otste temperatuuri tähtsusetu kõikumine märgatavat viga. Madalama temperatuuri mõõtmisel aga avaldavad termopaari vabade otste temperatuuri kõikumised mõõtmistulemustele tunduvat mõju ja seepärast asetatakse mõnikord termopaari vabad otsad konstantse temperatuuriga termostaati.

Termopaari materjalideks on: vask-kopeel (kuni 600° C), raud-kopeel (kuni 800° C), kromeel-kopeel (kuni 800° C), kromeel-alumeel (kuni 1300° C).

Termopaari kaitseks mehaaniliste vigastuste ja põlevate gaaside kahjuliku toime eest paigutatakse ta messingist, terasest, portselanist või šamotist kaitsetorusse.

6-10. Laboratoorne töö. Isolatsioonitakistuse mõõtmine

Enne töö tegemisele asumist tutvuda raamatu lõpus toodud lisaga ja § 6-8, *d* ning *e* ja § 9-25.

Tööplaan

1. Märkida üles mõõteriistade tehnilised andmed.
2. Mõõta megeri abil:

a) valgustusvõrgu kummagi juhtme isolatsioonitakistus maa suhtes (joon. 6-39);

b) juhtmevaheline isolatsioonitakistus.

Enne mõõtmist sulgeda kõik lülitid ja vinnaklülitid, välja keerata hõõglambid ning lahutada võrgust teised energiatarbijad (joon. 6-40).

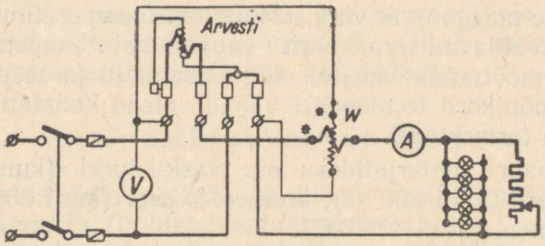
3. Selgitada, kas valgustusvõrgu isolatsioon rahuldab ekspluatatsiooni eeskirju.
4. Mõõta megeri abil:
a) kolmefaasilise asünkroonmootori kõigi faaside isolatsioonitakistus kere (maa) suhtes;
b) sama generaatori staatori iga kahe faasi vahelist isolatsioonitakistust.
5. Selgitada, kas mootori isolatsioonitakistus rahuldab ekspluatatsiooni eeskirju.

6-11. Laboratoorne töö. Induktsioonarvesti kontrollimine

Enne töö tegemisele asumist tutvuda § 6-7 sisuga.

Tööplaan

1. Märkida üles mõõteriistade tehnilised andmed.
2. Koostada skeem (joon. 6-47) ja lasta see juhendajal kontrollida.
3. Voolu puudumisel arvesti voolumähises ja nimipinge puhul pingemähisel veenduda, et arvesti ketas ei pöörle, s. t. veenduda arvesti tühijooksu puudumises.



Joon. 6-47. Lülitusskeem arvesti kontrollimiseks.

4. a) Nimipingel valida selline koormus, mis moodustab 10% arvesti nimivõimsusest ja lugeda ära arvesti ketta täispöörete arv 100—150 sekundi vältel. Märkida vattmeetri, ampermeetri, voltmeetri ja sekundimõõtja näidud tabelisse 6-3.
b) Leida valemiga

$$k = \frac{Pt}{N}$$

tegelik arvestikonstant, s. t. arvesti ketta ühe pöörde vältel tarbitav tegelik energia.
c) Leida arvesti viga nimetatud koormusel valemi järgi:

$$\gamma = \frac{k_n - k}{k} \cdot 100\%,$$

kus k_n — arvesti sildil näidatud nimikonstant.

5. Korrata 4. punktis nimetatud katset ja arvutusi, kui koormus moodustab 25, 50, 75 ja 100% arvesti nimivõimsusest.

6. Jõuda selgusele, kas rahuldab arvesti standardi nõudeid vea suhtes, võttes arvesse, et standardi järgi II täpsusklassi kuuluva arvesti puhul ei tohi viga nimetatud koormustel olla üle $\pm 2{,}5\%$.

Tabel 6-3

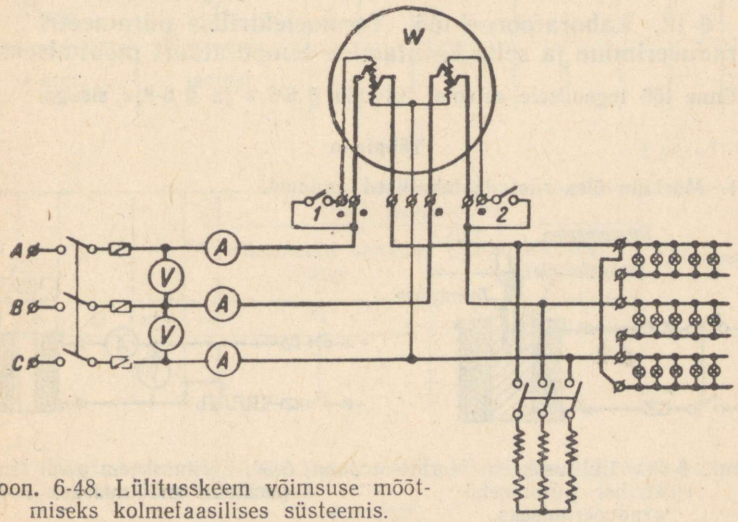
Vaatluse nr.	P	U	I	$\cos\varphi$	t	N	k	k_n	γ	Märkus
	W	V	A	—	sec	pööret	Wsec/p	Wsec/p	%	

6-12. Laboratoorne töö. Võimsuse mõõtmine kolmefaasilises ahelas

Enne töö tegemisele asumist tutvuda § 6-6 sisuga.

Tööplaan

1. Märkida üles mõõteriistade tehnilised andmed.
2. Koostada skeem (joon. 6-48) ja lasta see juhendajal kontrollida.
3. Sümmeetrilise aktiivkoormusega lülitus pingestada ja märkida tabelisse 6-4: voolud, pinged ja kaheelemendilise vattmeetriga mõõdetud võimsus P (ühepooluselised lülitid on suletud), vattmeetri esimese elemendi poolt mõõdetav võimsus P' (ühepooluseline lüliti *2* on avatud) ja teise elemendi poolt mõõdetav võimsus P'' (ühepooluseline lüliti *1* on avatud).



Joon. 6-48. Lülitusskeem võimsuse mõõtmiseks kolmefaasilises süsteemis.

Veenduda selles, et $P = P' + P'' = \sqrt{3}IU$.

Leida suhe P/P' ja P/P''.

4. Korrata punktis 3 näidatud mõõtmised ja arvutused koormuse teistsuguse väärtuse puhul.

5. Asendada aktiivkoormus sümmeetrilise aktiiv-reaktiivkoormusega ja märkida tabelisse 6-4 punktis 3 nimetatud suurused.

Veenduda selles, et $P = P' + P''$.

Leida $\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{3}IU}$; φ; P/P' ja P/P''.

6. Muutes reaktiivkoormust, korrata punktis 5 nimetatud mõõtmisi ja arvutusi kolmel erineval koormusel.

Kui võrrelda suhet P/P' mitmesugustel koormustel, samuti suhet P/P'' mitmesugustel koormustel, on kerge veenduda, et need suhted ei ole konstantsed. See annab õiguse väita, et vattmeetri ühe elemendi näitude järele ei saa otsustada kolmefaasilise süsteemi võimsuse üle.

7. Sooritada kaks võimsuse mõõtmist ebasümmeetrilise aktiiv-reaktiivkoormuse korral. Mõõteriistade näidud märkida tabelisse 6-4.

Tabel 6-4

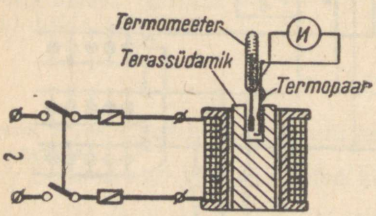
Jrk. nr.	I_A	I_B	I_C	U_{AB}	U_{BC}	P	P'	P''	$P' + P''$	$\sqrt{3}IU$	P/P'	P/P''	$\cos\varphi$	φ	Märkusi
	A	A	A	V	V	W	W	W	W	W	—	—	—	0	

6-13. Laboratoorne töö. Termoelektrilise püromeetri gradueerimine ja selle kasutamine temperatuuri mõõtmiseks

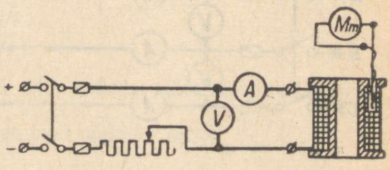
Enne töö tegemisele asumist tutvuda § 6-9, *e* ja § 6-8, *c* sisuga.

Tööplaan

1. Märkida üles riistade tehnilised andmed.



Joon. 6-49. Lülitusskeem termoelektrilise püromeetri gradueerimiseks.



Joon. 6-50. Lülitusskeem pooli temperatuuri mõõtmiseks.

2. Koostada skeem (joon. 6-49) termoelektrilise püromeetri kontrollimiseks ja lasta see juhendajal kontrollida.

Märkus. Termopaar ja termomeeter, mille järgi püromeetrit graduеeritakse, paigutatakse pooli terassüdamiku ōōnesse. Poolist lastakse läbi vahelduvvool, mille toimel südamikus tekkivad pöörisvoolud põhjustavad selle soojenemise.

3. Sulgeda lüliti mitmesugustel temperatuuridel ja märkida termomeetri ning püromeetri mōōtemehhanismi näidud tabelisse 6-5.

4. Katse andmete põhjal konstrueerida gradueerimiskōver $n = f(\Theta)$.

5. Pooli temperatuuri mōōtmiseks koostada lülitus joonisel 6-50 näidatud skeemi järgi ja lasta see juhendajal kontrollida.

Märkus. Termopaar paigutatakse keerdudevahelisse pilusse.

6. Sulgeda lüliti ja märkida tabelisse 6-6 mōōteriistade näidud iga 5 minuti järel 60 minuti jooksul. Esimene näit kanda tabelisse kohe pärast lüliti sulgemist. Saadud andmete põhjal määrata: 1) pooli temperatuur mitmesugustel ajahetkedel termoelektrilise püromeetri näitude järgi; 2) pooli temperatuur samadel ajahetkedel pooli takistuse muutumise järgi, kasutades valemit:

$$\Theta_n = \frac{r_n - r_1}{\alpha r_1} + \Theta_1,$$

mis on saadud valemi 2-25 ümberkorraldamise teel.

Takistus r_1 temperatuuril Θ_1 ja takistus r_n vastavalt temperatuuril Θ_n määratakse ampermeetri ja voltmeetri näitude põhjal valemiga

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

Tabel 6-5

Θ_{term}	°C									
n mm	jaotust									

Tabel 6-6

U	I	$r = \frac{U}{I}$	t	n	Pooli temperatuur		Märkusi
					püromeetri näitude järgi	pooli takistuse järgi	
V	A	Ω	min	—	°C	°C	

7. Saadud andmete alusel konstrueerida kōver, mis väljendab temperatuuri muutumist sōltuvalt ajast

$$\Theta = f(t).$$

ALALISVOOLUMASINAD

7-1. Üldmõisted

Elektrimasinateks nimetatakse seadmeid, mis on ette nähtud mehaanilise energia muundamiseks elektrienergiaks või, vastupidi, elektrienergia muundamiseks mehaaniliseks energiaks. Esimesel juhul nimetatakse neid generaatoriteks, teisel juhul — mootoriteks.

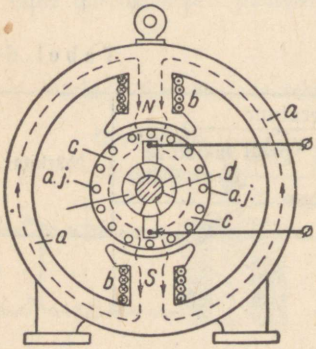
Alalisvoolu-elektrimasinad leiavad kasutamist elektriraudteedel, elektrolüüsiseadmetes, šahti tõstukites, valtsimispinkides ja samuti mehhanismides, kus on vaja reguleerida kiirust suurtes piirides.

7-2. Alalisvoolumasina ehitus ja tööpõhimõte

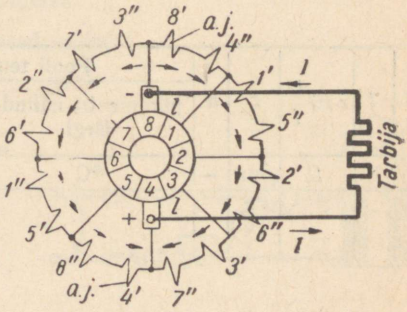
Joonisel 7-1 on skemaatiliselt kujutatud alalisvoolumasina ehitus. Masin koosneb kahest põhiosast: paigalseisvast ja liikuvast.

Esimene neist on terasike *a* väljaulatuvate poolustega *NS*, millele on asetatud ergutusmähis *bb*.

Liikuvaks osaks on ankur *c* kommutaatoriga *d*, mis on kinnitatud masina võllile. Ankruks on silindriline terassüdamik, mille välispinnale on kinnitatud aktiivjuhtmed *aj*. Ankru mõle-



Joon. 7-1. Alalisvoolumasina ehituse skeem.



Joon. 7-2. Alalisvoolumasina ankrumähise skeem.

mapoolses otsas on aktiivjuhtmed omavahel ühendatud, moodustades kinnise mähise (joon. 7-2). Kommutaator koosneb üksikutest isoleeritud kiilukujulistest plaatidest — lamellidest, mille külge on ühendatud ankrumähise otsmised ühendusjuhtmed. Kommutaatorile on asetatud kaks liikumatut harja *e*. Harjade külge ühendatakse välisahel. Harjad jaotavad ankrumähise kahte võrdsesse ossa nii, et need osad moodustavad välisahela suhtes kaks paralleelharu.

Kui lasta ergutusmähisest läbi alalisvool (ergutusvool), siis tekib magnetvoog, mis sulgub läbi pooluste, ikke ja ankru. Selle magnetvoo kaks jõujoont on näidatud joonisel 7-1 punktiirina.

Kui käitada masina ankur primaarjõumasinaga (näiteks sisepõlemismootoriga), hakkavad ankrumähise aktiivjuhtmed magnetväljas liikuma konstantse kiirusega ning neis indutseeritakse elektromotoorne jõud.

Ankrumähis on valmistatud nii, et iga paralleelharu üksikjuhtmeis indutseeritud elektromotoorsed jõud on samasuunalised. Peale selle kõik aktiivjuhtmed, millest paralleelharud koosnevad, pöörlevad ühes ja samas magnetväljas, kusjuures järjestikku ühendatud juhtmete arv igas harus jääb praktiliselt muutumatuks. Seetõttu jääb harjadevaheline elektromotoorne jõud, mis võrdub kummagi paralleelharu aktiivjuhtmete elektromotoorsete jõudude summaga, konstantseks.

Kui harjadega on ühendatud välisahel takistusega r, siis kulgeb selles ankru elektromotoorse jõu mõjul alalisvool

$$I = I_a = \frac{E}{r + r_a}, \qquad (7\text{-}1)$$

mis on samasuunaline elektromotoorse jõuga.

Sellest avaldisest järeldub, et masina elektromotoorne jõud võrdub generaatori klemmipinge ja ankru pingelangu summaga.

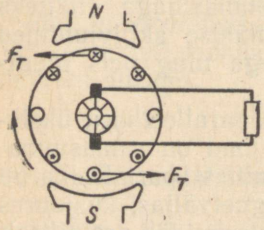
$$E = Ir + Ir_a = U + Ir_a. \qquad (7\text{-}2)$$

Et ankru aktiivjuhtmed asuvad masina magnetväljas, siis mõjuvad neile elektromagnetilised jõud ja järelikult tekib jõumoment ankru pöörlemistelje suhtes. Joonisel 7-3 näidatud ankru pöörlemissuuna ja magnetvälja suuna puhul saab parema käe reegli abil määrata elektromotoorse jõu ja voolu suuna ankru juhtmeis. Seejärel määrame vasaku käe reegli abil elektromagnetilise jõu ja jõumomendi suuna. Nüüd on kerge veenduda, et jõumomendi suund on vastupidine ankru pöörlemissuunale, s. t. ta on pidurdusmomendiks. Et ankur

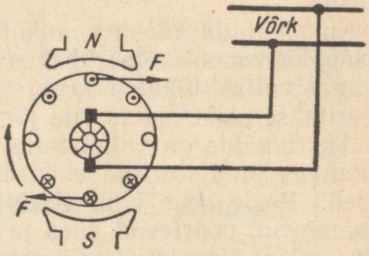
pöörleks ühtlase kiirusega, on vaja, et primaarjõumasin arendaks sama suure, kuid vastassuunalise momendi — pöördemomendi. Seejuures peab primaarjõumasin igas ajaühikus kulutama teatud hulga mehaanilist energiat, mis muundub elektrienergiaks.

Elektrimasina töötamisel generaatorirežiimis on iseloomustavaks see, et generaatori ankrus indutseeritav elektromotoorne jõud on alati suurem generaatori klemmipingest, s. t.

$$E > U.$$



Joon. 7-3. Alalisvoolugeneraatori töötamise skeem.



Joon. 7-4. Alalisvoolumootori tööpõhimõte.

Oletame nüüd, et sama elektrimasin on mehaaniliselt sidurdatud mingi tööpingiga. Masina ergutusmähist läbib nagu ennegi alalisvool, mis tekitab ergutusmagnetvälja. Ühendades nüüd harjad elektrivõrguga (joon. 7-4), läbib masina ankrut vool $I = I_a$. Kuna ankrumähise juhtmed asuvad magnetväljas, siis mõjuvad neile elektromagnetilised jõud ning seega ka jõumoment ankru telje suhtes. Joonisel 7-4 näidatud voolu ja magnetvoo suuna puhul on võimalik määrata elektromagnetilise jõu ning seega ka jõumomendi suund, mis antud juhul on pöördemomendiks.

Pöördemomendi toimel hakkab masina ankur ning temaga ühendatud tööpingi võll pöörlema. Et ankur pöörleks konstantse kiirusega, peab elektrimasin arendama pöördemomenti, mis on võrdne, kuid vastassuunaline koormuse pidurdusmomendiga. Seejuures tarbib masin igas ajaühikus teatud hulga elektrienergiat, mis muundub mehaaniliseks energiaks. Tõepoolest, masina ankru pöörlemisel magnetväljas indutseeritakse ankrumähise aktiivjuhtmeis elektromotoorne jõud, mille suund on vastupidine ankru voolu suunaga. Selles on lihtne

veenduda eelmise reegli abil. Teiste sõnadega, indutseeritud elektromotoorne jõud on nüüd vastuelektromotoorseks jõuks.

Seega vool elektrimootori ankrus

$$I_a = \frac{U - E}{r_a} \tag{7-3}$$

ja vastuelektromotoorne jõud

$$E = U - Ir_a. \tag{7-4}$$

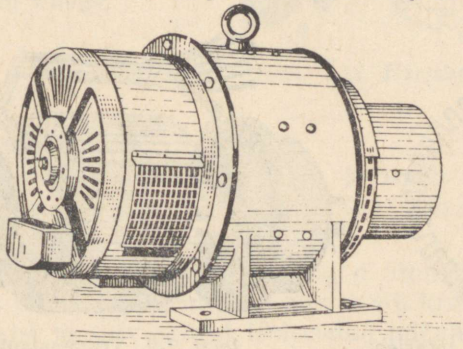
Elektrimasina töötamisel mootorina on iseloomustavaks see, et ankrus indutseeritud elektromotoorne jõud on masina klemmipingest väiksem:

$$E < U.$$

Üldistades käsitletud protsesse võime teha järelduse, et üks ja seesama alalisvoolumasin võib töötada nii generaatorina kui ka mootorina. Seda tõestas esmakordselt 1883. a. E. H. Lenz.

7-3. Alalisvoolumasina põhiosad

Alalisvoolumasina väliskuju on näidatud joonisel 7-5.



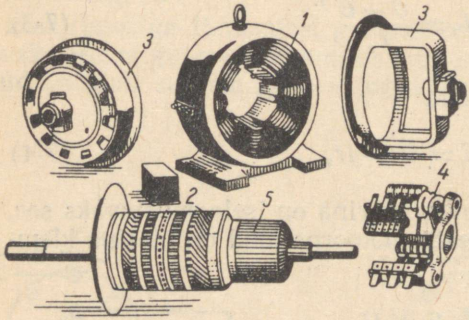
Joon. 7-5. Alalisvoolumasina ПН väliskuju.

Joonisel 7-6 on näidatud masin lahtivõetuna.

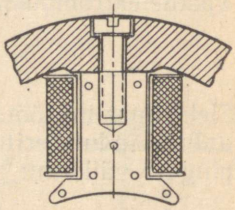
Silindri sisepinnale on kinnitatud lehtterasest poolused (pooluste südamikud) (joon. 7-7). Nad on valmistatud leht-

terasest. Mõnikord valmistatakse pooluste südamikud ja pooluskingad eraldi (kui viimased on valuterasest).

Ankru südamik valmistatakse lehtterasest. Nii ankru kui



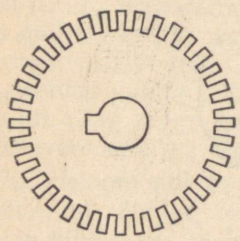
Joon. 7-6. Alalisvoolumasina detailid: *1* — ike; *2* — ankur; *3* — laagrikilbid; *4* — harjasild harjahoidjate ja harjadega.



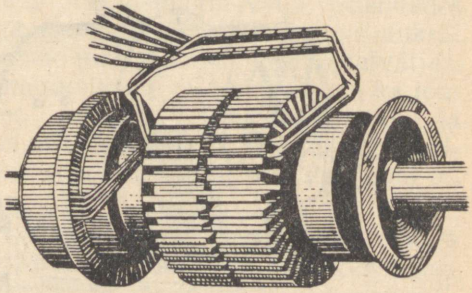
Joon. 7-7. Poolusesüdamik ergutusmähisega.

ka pooluskingade terasplekid on teineteisest isoleeritud kas lakikihi või õhukese paberiga (0,05 mm). See on vajalik pöörisvoolukadude vähendamiseks.

Kettakujuliste ankruplekkide välisservadesse on sisse stantsitud hambakujulised sisselõiked ja keskele auk võlli ja kiilu jaoks (joon. 7-8). Need plekid asetatakse pakkideviisi võllile.



Joon. 7-8. Ankru terasleht.



Joon. 7-9. Trummelankur.

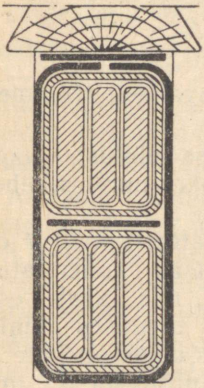
Üksikute plekipakkide vahele jäetakse õhuvahed (joon. 7-9), et neis saaks tsirkuleerida ankru jahutusõhk.

Hambakujulised sisselõiked plekkide servades moodustavad uurded, milledesse asetatakse ankrumähise juhtmed. Juhtmed

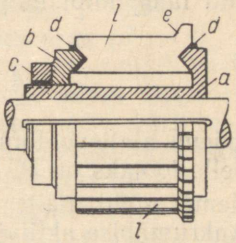
kinnitatakse kas puitkiilude (joon. 7-8) või terastraadist bandaažide abil.

Ankur kinnitatakse masina terasvõllile, mille otsad toetuvad laagritele.

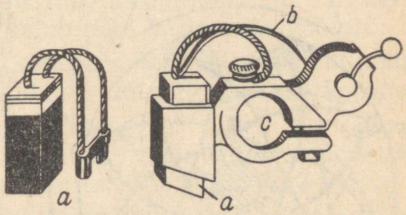
Laagrid monteeritakse masina otskilpides (joon. 7-6) asuvaisse laagripesadesse. Otskilbid on poltide abil kinnitatud masina kere külge.



Joon. 7-10. Ankrumähise kinnitamine kiiluga.



Joon. 7-11. Kommutaator.



Joon. 7-12. Harjahoidja harjaga.

Kommutaator (joon. 7-9 ja 7-11) koosneb kiilukujulistest vaskplaadikestest (lamellidest) *1*, mis on teineteisest isoleeritud mikaniitlehtede[1] abil.

Kommutaatori lamellid on puksile *a* kinnitatud surveseibi *b* abil, mis omakorda kinnitub mutri *c* või kruvidega. Lamellid on puksist ja surveseibist isoleeritud mikaniitmansetiga *d*. Kommutaatori lamellide väljaulatuvais otstes *e* on väikesed sissesaetud lõhed, milledesse joodetakse mähise üksikute osade (sektsioonide) otsad (joon. 7-11).

[1] Mikaniit — isoleermaterjal, mis koosneb kõrge surve all šellakiga kokkuliimitud vilgukivilehekestest.

Pärast montaaži kommutaator treitakse ja lihvitakse, mille tulemusena ta välispind omandab silindrilise kuju.

Masina harjad kujutavad endast söest või grafiidist valmistatud prismasid, mis asetatakse harjahoidjatesse (joon. 7-12).

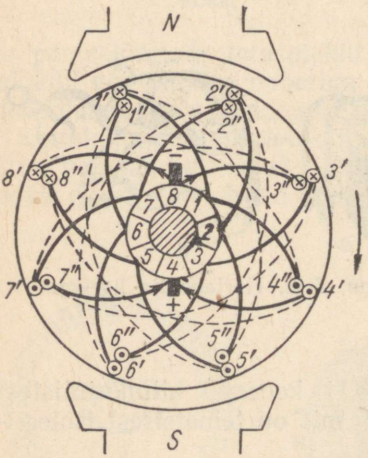
Harjahoidjasse asetatud hari *a* surutakse vastu kommutaatorit vedru *b* mõjul.

Harjahoidja kinnitub klambri *c* abil harjasilla sõrmele (joon. 7-6, *d*). Harjahoidja on viimasest isoleeritud. Harjasild on kinnitatud laagrikilbi külge.

7-4. Ankrumähis

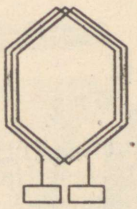
Tänapäeva alalisvoolumasina ankur on tavaliselt trummeltüüpi. Selle loojaks on P. N. Jablotškov.

Käsitleme nüüd näite varal ankrumähise ehitust (joon. 7-13). Ankrumähise aktiivjuhtmed asuvad ankru uuretes kahes kihis.



Joon. 7-13. Alalisvoolumasina ankrumähise skeem.

Kommutaatori lamell *1* on ankru esiotsas ühendatud juhtmega *1′*, mis asub esimese uurde ülemises kihis. Ankru teises otsas on juhe *1′* ühendatud juhtmega *5″*, mis asub viienda uurde alumises kihis. Ankru esiotsas on juhe *5″* ühendatud kommutaatori lamelliga *2*.



Joon. 7-14. Ankrumähise sektsioon.

Seda ankrumähise osa, mis asub kahe teineteisele järgneva lamelli vahel mähise kerimise suunas, nimetatakse mähise sektsiooniks. Seega esimene sektsioon, mis koosneb juhtmeist

1′ — 5″, on ühendatud lamellide *1* ja *2* vahele. Teine sektsioon, mis koosneb juhtmeist *2′ — 6″*, on ühendatud lamellidele *2 — 3*. Järgmised mähise sektsioonid moodustuvad, nagu nähtub jooniselt 7-13 ja 7-2, juhtmeist *3′ — 7″*, *4′ — 8″*, *5′ — 1″*, *6′ — 2″*, *7′ — 3″* ja *8′ — 4″*. Juhe *4″* on ankru esiotsas ühendatud lamelli *1* külge. Seega moodustavad järjestikku ühendatud mähise sektsioonid kinnise ahela.

Joonisel 7-13 on peale märgitud elektromotoorsete jõudude suunad, mis on leitud parema käe reegli põhjal.

Pole raske märgata, et mähise ühes osas (*8′ — 4″*, *1′ — 5″*, *2′ — 6″*, *3′ — 7″*) on elektromotoorse jõu suund vastupidine elektromotoorse jõu suunaga mähise teises osas (*4′ — 8″*, *5′ — 1″*, *6′ — 2″*, *7′ — 3″*). Juhtmete sümmeetrilise asetuse tõttu magnetvälja suhtes on neis mähiseosades indutseeritavad elektromotoorsed jõud võrdsed. Seetõttu on välisahela puudumisel vool ankrumähises võrdne nulliga.

Asetame kommutaatori lamellile *8* ühe harja ja lamellile *4* teise harja ning ühendame välisahelaga. Siis kulgeb vool harjalt *4* (positiivne, +) välisahela kaudu harjale *8* (negatiivne hari, —). Seejuures kujutab ankrumähis enesest kaht paralleelharu. Kumbagi paralleelharu läbib pool välisahela voolust.

Mähise sektsioonid võivad koosneda kas ühest või mitmest keerust. Joonisel 7-14 on näidatud kolmest keerust koosnev mähise sektsioon.

Mähise sektsioonid valmistatakse vastavatel šabloonidel ning asetatakse valmiskujul ankru uurdeisse (joon. 7-9).

Tavaliselt koosneb mähis mitmestsajast juhtmest, seega on sama palju ka kommutaatori lamelle, kuid mähise valmistamise põhimõte jääb samaks.

7-5. Ankrumähises indutseeritav elektromotoorne jõud

Generaatori või mootori ankru pöörlemisel magnetväljas indutseeritakse tema mähises elektromotoorne jõud. Kuna magnetvälja tihedus on ankru ümbermõõdu mitmesugustes punktides erinev, siis on loomulikult ka ankrumähise üksikuis juhtmeis indutseeritavad elektromotoorsed jõud erinevad. Masina elektromotoorne jõud, mis võrdub ühe paralleelharu juhtmeis indutseeritud elektromotoorsete jõudude summaga, avaldub üksikjuhtme elektromotoorse jõu keskväärtuse ja haru juhtmete arvu korrutisega.

Kui ühe pooluse magnetvoog on Φ, masina pooluste arv —

$2p$ ja ankru pind — s, siis magnetvälja tiheduse keskväärtus ankru pinnal

$$B_k = \frac{2p\Phi}{S} = \frac{2p\Phi}{\pi dl}, \qquad (7\text{-}5)$$

kus d — ankru läbimõõt;
l — ankru pikkus.

Elektromotoorse jõu keskväärtus igas juhtmes, kui ankru pöörlemiskiirus on n p/min:

$$E_k = B_k l v = \frac{2p\Phi}{\pi dl} l \cdot \frac{\pi dn}{60} = \Phi \cdot 2p \cdot \frac{n}{60}.$$

Kui ankrumähise juhtmete arv on N ning tema paralleelharude arv $2a$, siis igas ankrumähise paralleelharus on $\frac{N}{2a}$ järjestikku ühendatud juhet. Ankrumähise igas paralleelharus indutseeritud elektromotoorne jõud ning seega masina elektromotoorne jõud:

$$E = 2p\frac{n}{60} \cdot \frac{N}{2a} \cdot \Phi = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} N\Phi.$$

Tähistades antud masina puhul konstantset suurust $N\frac{p}{60a}$ tähega k, saame:

$$E = k\Phi n. \qquad (7\text{-}6)$$

Seega on masina elektromotoorne jõud võrdeline magnetvooga ja ankru pöörlemiskiirusega.

7-6. Masina pöördemoment ja võimsus

Igas alalisvoolumasinas esineb ankruvoolu ja ergutusvoolu poolt tekitatud magnetväljade koosmõju. Selle tagajärjel mõjub igale ankrujuhtmele jõud $F = B_k lI$; N ankrujuhtme puhul on ankru ümbermõõdu puutuja suunas mõjuv jõud

$$F = B_k lIN.$$

Asendades sellesse valemisse väljatiheduse B_k avaldise (7-5) ja voolu igas juhtmes $I = \frac{I_a}{2a}$ saame:

$$F = \frac{2p\Phi}{\pi dl} l \cdot \frac{I_a}{2a} N = \frac{p}{\pi da} N\Phi I_a.$$

Masina pöördemoment

$$M = F\frac{d}{2} = \frac{P}{2\pi a} N\Phi I_a = C\Phi I_a, \qquad (7\text{-}7)$$

kus $C = \frac{P}{2\pi a}$ N on iga masina puhul konstantne suurus. Seega mootori pöördemoment või generaatori pidurdusmoment on võrdeline ankru vooluga ja masina magnetvooga.

Võimsus mehaanilise energia muundamisel elektrienergiaks generaatoris või elektrienergia muundamisel mehaaniliseks energiaks mootoris

$$P = M\omega = \frac{p}{2\pi a} N\Phi I_a \frac{2\pi n}{60} = \frac{p}{a} \cdot \frac{n}{60} N\Phi I_a. \qquad (7\text{-}8)$$

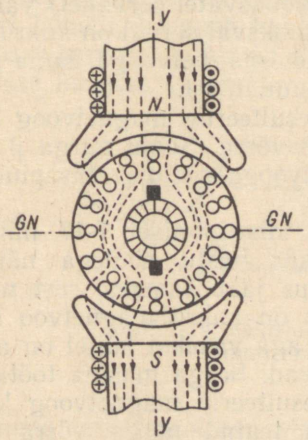
Arvestades ankrus indutseeritud elektromotoorse jõu valemit (§ 7-5), saame:

$$P = EI_a. \qquad (7\text{-}9)$$

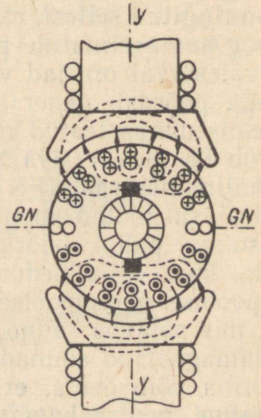
Seega on alalisvoolumasina ankru poolt arendatav võimsus võrdne ankru elektromotoorse jõu ja voolu korrutisega.

7-7. Ankrureaktsioon

Masina ergutusmähist läbiv vool tekitab magnetvoo, mida nimetatakse pooluste magnetvooks (joon. 7-15). Selle mag-

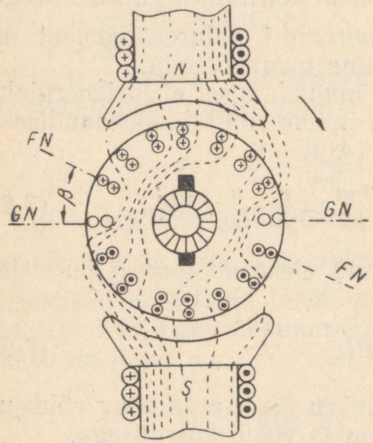


Joon. 7-15. Pooluste magnetväli.



Joon. 7-16. Ankru magnetväli.

netvoo telg ühtib pooluste teljega (Y-Y). Ankrumähist läbiv vool tekitab voo, mida nimetatakse ankru magnetvooks (joon. 7-16). Harjad on kommutaatoril asetatud alati nii, et ankru pöörlemisel oleks elektromotoorne jõud harjade poolt lühistatavais sektsioonides võrdne nulliga. Siis ühtib ankru magnetvoo telg geomeetrilise neutraaliga (GN), s. t. tasapinnaga, mis jaotab kahe naaberpooluse vahemaa pooleks ning läbib ankru võlli telgjoone.



Joon. 7-17. Masina resulteeriv magnetväli.

Masina koormamisel ankru magnetvoog ja pooluste magnetvoog summeeruvad. Resulteeriva voo pilt on näidatud joonisel 7-17.

Ankrureaktsiooniks nimetatakse koormatud masina ankruvoolu tagasimõju ergutusmagnetväljale, mistõttu masina magnetväli moondub.

Kui masin töötab generaatorina joonisel 7-17 näidatud pöörlemissuunaga, siis magnetvälja tihedus põhjapooluse parempoolsel ja lõunapooluse vasakpoolsel serval (nn. pealejooksval serval) suureneb, kuna aga vastasservadel (mahajooksvatel servadel) väheneb. See on tingitud sellest, et mahajooksval serval on ankru magnetvoog samasuunaline pooluste magnetvooga, kuna pealejooksval serval on nad vastassuunalised.

Seega pöördub generaatori resulteeruv magnetvoog ankru pöörlemissuunas teatud nurga β võrra. Sama nurga β võrra pöördub ka resulteeriva magnetvooga ristiolev tasapind, nn. füüsikaline neutraal (FN).

Kui masin töötab mootorina, siis joonisel 7-17 näidatud voolusuuna puhul pöörleb ankur vastu noolega näidatud suunda, kuid väljatiheduse jaotus jääb samaks, sest näiteks põhjapooluse parempoolses osas on ankru magnetvoo suund sama, mis põhivoo suund, kuna aga vasakul küljel on ankru- ja põhimagnetvoo suunad erinevad. Seega masina töötamisel mootorina võib öelda, et nii resulteeriv magnetvoog kui ka füüsikaline neutraal pöörduvad teatud nurga võrra vastu ankru pöörlemise suunda.

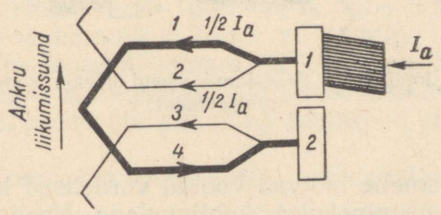
Üldiselt võib öelda, et ankrureaktsiooni mõjul masina mag-

netvoog nõrgeneb, sest terase küllastumise tagajärjel pooluse ühe poole lisamagneetimine ei kompenseeri teise poole lahtimagneetimist.

7-8. Kommuteerimine

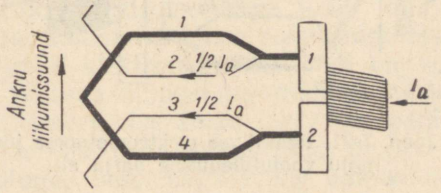
Ankru pöörlemisel asub ankrumähise iga sektsioon vaheldumisi kord ühes, kord teises paralleelharus.

Mähise sektsioonide ümberlülitamist ühest harust teise ja sellega kaasuvaid füüsikalisi nähtusi nimetatakse üldiselt kommuteerimiseks ning selleks vajalikku aega — kommuteerimisajaks.



Joon. 7-18. Sektsiooni asend enne kommuteerimist.

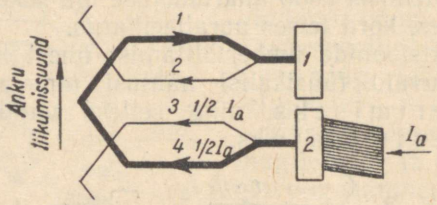
Joonisel 7-18 on näidatud juhtmeist *1* ja *4* moodustatud sektsioon, mis asub mähise alumises paralleelharus. Sektsioon liigub alt ülespoole. Välisahela vool, läbinud harja ja kommutaatori lamelli, hargneb kaheks. Osa voolust ($\frac{1}{2}$ I_a) suundub alumisse harusse (juhtmed *1* — *4* — *3* jne.), teine osa suundub ülemisse harusse (juhe *2*).



Joon. 7-19. Sektsiooni asend kommuteerimisperioodi keskel.

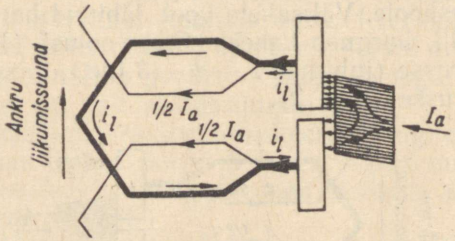
Kommuteerimisprotsess algab momendist, mil kommutaatori lamell *2* puudutab harja. Seejuures sektsioon *1* — *4* lühistub harja kaudu (joon. 7-19).

Kommuteerimisaja vältel jäävad voolud juhtmeis *2* ja *3* konstantseiks ja võrdseiks $\frac{1}{2} I_a$, sest juhe *2* on kogu aeg ülemises, juhe *3* aga alumises paralleelharus. Sektsiooni *1* — *4* vool hakkab aga muutuma. Algul ta nõrgeneb ning saavutab nullväärtuse hetkel, mil kommutaatori lamellide *1* ja *2* ühenduspinnad harjaga osutuvad võrdseiks. See on seletatav sellega, et kommutaatori lamellide üheaegsel kokkupuutumisel



Joon. 7-20. Sektsiooni asend pärast kommuteerimist.

harjaga on lamelle läbivad voolud võrdelised harja ja lamellide vahelise üleminekukihi juhtivustega. Need juhtivused ise on aga võrdelised harja ja lamelli puutepindade suurusega. Mähise edasiliikumisel vool sektsioonis muudab suunda ja hakkab uuesti tugevnema. Ajaks, mil hari lahkub lamellilt *1*, saavutab vool väärtuse $\frac{1}{2} I_a$. Sellega lõpeb kommuteerimisprot-



Joon. 7-21. Reaktiivse elektromotoorse jõu mõju voolutihedusele harja all.

sess. Sellest momendist alates asub sektsioon *1* — *4* juba ankrumähise ülemises harus (joon. 7-20). Seega muutub vool kommuteerimisaja jooksul väärtuselt $+\frac{1}{2} I_a$ väärtuseni $-\frac{1}{2} I_a$.

Vaadeldud juhul jäi voolutihedus harja all konstantseks, mistõttu on tagatud harja ühtlane soojenemine ja sädelemiseta kommuteerimine.

Selline olukord oleks võimalik juhul, kui ankru pöörlemiskiirus oleks väike ja vool muutuks sektsioonis väga aeglaselt.

Tegeliku pöörlemiskiiruse korral aga kutsub voolu muutus lühistatud sektsioonis esile endainduktsiooni magnetvoo kiire muutumise ning endainduktsiooni elektromotoorse jõu tekkimise selles sektsioonis. Seda elektromotoorset jõudu nimetatakse kommuteerimise elektromotoorseks jõuks (e_{komm}). Tema suund ühtib kommuteerimisprotsessi esimesel poolel sektsiooni läbiva voolu suunaga.

Kommuteerimise elektromotoorse jõu olemasolu kutsub lühistatud sektsioonis esile lisavoolu i_l, mille tagajärjel voolutihedus harja mahajooksva serva all tunduvalt suureneb ja harja lahkumine lamellilt toimub sädelemisega. Sädelemine on seletatav sellega, et lühistatud sektsiooni katkestamisel vabanev magnetvälja energia muundub soojuseks, millega kaasub sädelemine.

Kommutatsiooni parandamiseks vähendatakse lisavoolu $i_l = \frac{e_0}{\Sigma r}$. Selleks suurendatakse üleminekutakistust, kasutades söeharju. Kõvad söeharjad annavad suurema üleminekutakistuse kui pehmed harjad. Seetõttu kasutatakse esimesi kõrgema pingega masinatel, teisi aga madalama pinge korral.

Kommutatsioonitingimuste parandamiseks kasutatakse peale selle veel abipooluseid (joon. 7-22), mis paigutatakse peapooluste vahele magnetvälja geomeetrilisele neutraaljoonele.

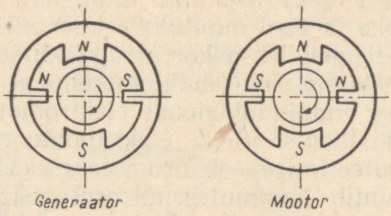
Abipooluste abil saab tekitada sellise magnetvälja, et kommuteeriva sektsiooni liikumisel selles väljas indutseeritakse sektsioonis selline elektromotoorne jõud, mis on võrdne ja vastassuunaline kommuteerimise elektromotoorse jõuga.

Kommuteerimise elektromotoorne jõud on võrdeline ankru vooluga. Kui lülitada abipooluste mähised järjestikku ankrumähisega, indutseeritakse abipooluste voo poolt kommuteerivas sektsioonis elektromotoorne jõud, mis on samuti võrdeline ankruvooluga, sest magnetvoog abipoolustes on väikse väljatiheduse korral ($B = 7000 - 8000$ G) võrdeline vooluga.

Selleks et saada elektromotoorset jõudu, mis oleks vastassuunaline kommuteerimise elektromotoorse jõuga, peavad peapoolustele generaatori pöörlemissuunas järgnevad abipoolused olema vastupidise polaarsusega (joon. 7-22).

Kui generaator läheb üle mootorirežiimile, siis ankru pöörlemissuuna endiseks jäädes muudab ankru vool oma suunda.

Mootori puhul on kommuteerimise elektromotoorne jõud generaatori omaga võrreldes vastassuunaline. Järelikult kommu-



Joon. 7-22. Pea- ja abipooluste paigutus.

teerimise elektromotoorse jõu kompenseerimiseks peavad abipoolused olema vastupidise polaarsusega, võrreldes generaatoriga, mis toimubki automaatselt voolu suuna muutumise tõttu nii ankrumähises kui ka abipooluste mähises.

7-9. Alalisvoolugeneraatorite tüübid

Alalisvoolumasina ergutusvoolu on võimalik saada kas mingist kõrvalisest (sõltumatust) vooluallikast (akumulaatorist, teisest generaatorist) või samalt generaatorilt. Esimesel juhul nimetatakse masinat *võõrergutusega* generaatoriks, teisel juhul aga *endaergutusega* generaatoriks.

Ergutusmähise ühendusviisist sõltuvalt eristatakse järgmisi endaergutusega generaatoritüüpe:

1) haruvoolugeneraatorid, mille ergutusmähis on ühendatud ankru vooluahelaga paralleelselt; 2) peavoolugeneraatorid, mille ergutusmähis on ühendatud ankru vooluahelasse järjestikku; 3) kompaundgeneraatorid, millel on kaks ergutusmähist. Üks neist ühendatakse ankru vooluahelaga paralleelselt, teine järjestikku.

Alalisvoolugeneraatorite õigeks ekspluateerimiseks on vaja teada tema nimiandmeid: võimsust P_n, pinget U_n, voolu I_n, pöörlemiskiirust n_n. Nimiandmed on tavaliselt antud generaatori sildil.

Teiselt poolt on vaja teada ka üksikute generaatorit iseloomustavate suuruste vastastikust seost. Need seosed antakse tavaliselt kõveratena, mida nimetatakse ka karakteristikuteks,

sest nad iseloomustavad (karakteriseerivad) ülevaatlikult masina tööd.

Nende karakteristikute hulka kuuluvad:

1. Tühijooksukarakteristik — generaatori ankrumähises indutseeritava elektromotoorse jõu sõltuvus ergutusvoolust I_e tühijooksul konstantse pöörlemiskiiruse korral, s. t.

$$E = f(I_e),$$

kui $n = \text{const}$ ja $I_a = 0$.

2. Väliskarakteristik — generaatori klemmipinge sõltuvus koormusest konstantse pöörlemiskiiruse ja ergutusvoolu või ergutusahela takistuse korral, s. t.

$$U = f(I_a),$$

kui $n = \text{const}$ ja $I_e = \text{const}$ või $r_e = \text{const}$.

3. Reguleerimiskarakteristik — ergutusvoolu sõltuvus koormusvoolust konstantse klemmipinge ja pöörlemiskiiruse korral, s. t.

$$I_e = f(I_a),$$

kui $U = \text{const}$ ja $n = \text{const}$.

Elektrimasinate karakteristikute abstsissid ja ordinaadid võivad olla väljendatud vastavais mõõtühikuis või protsentides antud masina nimisuurustest.

7-10. Võõrergutusega generaator

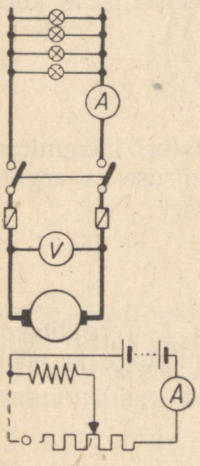
Võõrergutusega generaatori ühendusskeem on näidatud joonisel 7-23.

Ergutusmähise klemmidele on ühendatud akupatarei, reostaat [1] ergutusvoolu reguleerimiseks ja ampermeeter. Ankruklemmidele ühendatakse energiatarbijad. Voolu ja pinge mõõtmiseks on ahelasse lülitatud ampermeeter ja voltmeeter.

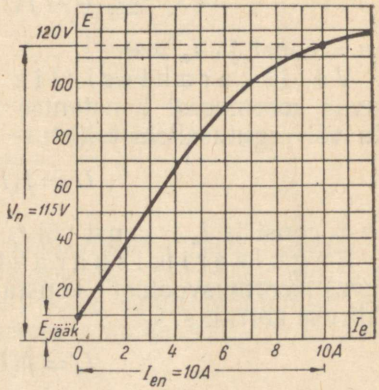
Kui panna generaatori ankur pöörlema nimikiirusega ja kui seejuures ankru vooluahel ning ergutusahel on avatud, siis saame ankru klemmidel pinge, mis moodustab 2—5% nimi-

[1] Ergutusreostaadil on olemas lisakontakt, mille kaudu ergutusmähis ergutusvoolu väljalülitamisel lühistatakse. Seejuures kulub ergutusahelas salvestatud magnetvälja energia mähise soojendamiseks. Vastasel korral tekitab magnetväljas salvestatud energia ergutusahela katkestamisel reostaadi viimase kontakti ja liugkontakti vahel kaarleegi, mis põletab kontakte.

pingest (U_n). See on elektromotoorne jõud, mis indutseeritakse ankrumähises ankru pöörlemisel pooluste jääkmagnetväljas ning seda nimetatakse jääkelektromotoorseks jõuks $E_{jääk}$.



Joon. 7-23. Võõrergutusega generaatori ühendusskeem.



Joon. 7-24. Generaatori tühijooksukarakteristik.

Keerates reostaadi vänta lisakontaktilt esimesele ning seejärel järgmistele töökontaktidele, suureneb magnetvoog ja seega ka generaatori elektromotoorne jõud.

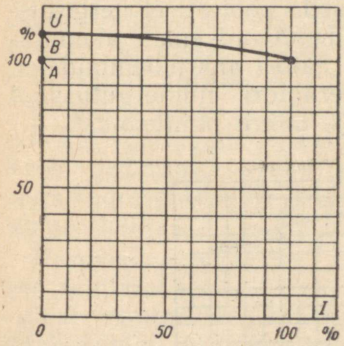
Märkides üles üksikutele ergutusvoolu väärtustele vastavad elektromotoorse jõu väärtused, võime koostada tühijooksukarakteristiku $E = f(I_e)$ (joon. 7-24).

Tühijooksukarakteristik võimaldab hinnata masina magnetsüsteemi küllastuse astet. Normaalselt asub masina nimipingele vastav punkt kõvera põlvikul (joon. 7-24). Kui see punkt asuks kõvera sirgjoonelisel osal, muutuks pinge sõltuvalt koormusest väga suurtes piirides. Teisest küljest, kui see punkt asuks ülevalpool kõvera põlve, oleks piiratud pinge reguleerimise võimalus.

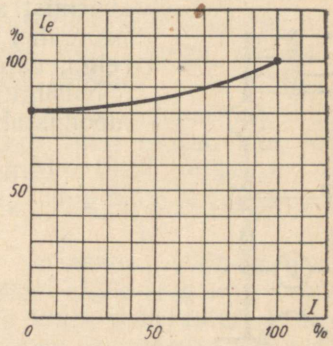
Väliskarakteristiku ülesvõtmiseks reguleeritakse välja generaatori nimipöörlemiskiiruse ja nimipinge juures ankru nimivool. Seejärel vähendatakse pidevalt ankruvoolu nullini ja, hoides seejuures ergutusvoolu ja masina pöörlemiskiiruse konstantsena, mõõdetakse klemmipinget ankruvoolu mitme-

sugustel väärtustel. Saadud andmete põhjal ehitatakse väliskarakteristik $U = f(I_a)$ (joon. 7-25).

Generaatori klemmipinge tõusmine koormuse (ankruvoolu) vähenemisel on tingitud kahest põhjusest: 1) ankrureaktsiooni



Joon. 7-25. Võõrergutusega generaatori väliskarakteristik.



Joon. 7-26. Võõrergutusega generaatori reguleerimiskarakteristik.

vähenemisest, mille tõttu suureneb generaatori magnetvoog ja indutseeritud elektromotoorne jõud, ja 2) sisepingelangu vähenemisest, mis kutsub esile pinge tõusmise ankru klemmidel, sest

$$U = E - Ir_a. \qquad (7\text{-}10)$$

Suhtelist pinge tõusu masina koormuse vähenemisel

$$\Delta U\% = \frac{OB - OA}{OA} \cdot 100\% = \frac{U_0 - U_n}{U_n} 100\% \qquad (7\text{-}11)$$

nimetatakse protsentuaalseks pingemuutuseks ning ta moodustab võõrergutusega generaatoritel 5—10%.

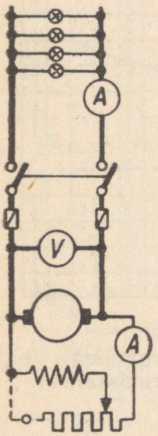
Reguleerime jälle masina klemmipinge nimipöörlemiskiiruse ja nimikoormuse juures võrdseks nimipingega. Vähendades koormust nullini, vähendame ühtlasi ka ergutusvoolu nii, et ankru klemmidel püsiks nimipinge (U_n). Mõõtes ergutusvoolu mitmesugustel koormusvoolu väärtustel, saame koostada masina reguleerimiskarakteristiku $I_e = f(I)$ (joon. 7-26). Viimane näitab, kuidas tuleb reguleerida generaatori ergutusvoolu, et hoida klemmipinge mitmesuguste koormuste puhul konstantsena.

7-11. Haruvoolugeneraator

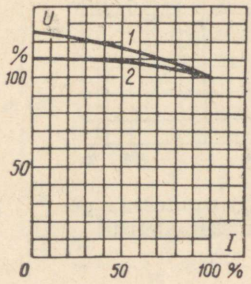
Joonisel 7-27 on näidatud haruvooluergutusega generaatori ühendusskeem.

Ta erineb võõrergutusega generaatori skeemist ainult selle poolest, et ergutusvooluahel pole ühendatud enam akupatareiga, vaid generaatori ankruklemmidega.

Niisuguse generaatori nimiergutusvool moodustab 2—3% ankru nimivoolust.



Joon. 7-27. Haruvoolugeneraatori ühendusskeem.



Joon. 7-28. Haruvoolugeneraatori väliskarakteristik (kõver *1*) ja võõrergutusega generaatori väliskarakteristik (kõver *2*).

Selle generaatori tühijooksukarakteristik võetakse üles analoogiliselt võõrergutusega generaatori tühijooksukarakteristikuga ning tal on samasugune kuju (joon. 7-24). Siinjuures peab märkima, et masin ergutub vaid sel juhul, kui magneetimisergutus on jääkväljatihedusega samasuunaline. Järelikult ergutusmähise õige ühendamise korral masina resulteeriv magnetvoog ja seega ka ankrus indutseeritud elektromotoorne jõud suurenevad. Elektromotoorse jõu suurenemine kutsub omakorda esile ergutusvoolu ning seega ka magnetvoo suurenemise jne.

Ergutusahela teatud kindla takistuse korral kasvab indutseeritud elektromotoorse jõu väärtus piirini, mil ta muutub võrdseks ergutusahela takistuse ja ergutusvoolu korrutisega.

Iseergutumist ei toimu juhul, kui ergutusmähis lülitatakse sisse nii, et ergutusmagnetvoo suund osutub vastupidiseks jääkmagnetvoo suunale.

Haruvoolugeneraatori väliskarakteristik (kõver *1* joonisel 7-28) võetakse üles analoogiliselt võõrergutusega generaatori vastava karakteristikuga (kõver *2* joonisel 7-28). Et haruvoolugeneraatori ergutusmähis on ühendatud ankru klemmidele, kutsub masina klemmipinge tõus koormuse vähenemisel esile ergutusvoolu suurenemise, mille tagajärjel suureneb magnetvoog ja masina elektromotoorne jõud. Seega on sellise generaatori väliskarakteristiku tõus järsum.

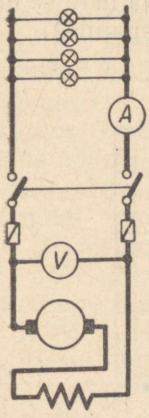
Protsentuaalne pingemuutus on haruvoolugeneraatoril suurem kui võõrergutusega generaatoril ning ulatub kuni 30%. Selle generaatori reguleerimiskarakteristik võetakse üles nagu võõrergutusega generaatorilgi ning ta on peaaegu samasuguse kujuga.

Haruvoolugeneraatori oluline erinevus võõrergutusega generaatorist seisab selles, et esimesel ei ole vaja eraldi vooluallikat ergutusahela toiteks. Seda tüüpi generaatoreid kasutatakse juhul, kui generaatori koormus on enam-vähem püsiv.

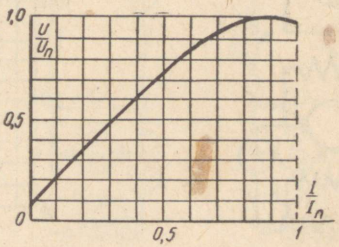
7-12. Peavoolugeneraator

Peavoolugeneraatori ühendusskeem on näidatud joonisel 7-29.

Selle generaatori ergutusmähise juhtme läbimõõt on võrdlemisi suur, sest see on arvestatud generaatori nimivoolule. Keerdude arv on aga väike, sest magneetimisergutust tekitatakse ankruvooluga võrdse voolu abil. Tühijooksukarakteristiku ülesvõtmine toimub samuti nagu võõrergutusega generaatorilgi ning sellel on samasugune kuju.



Joon. 7-29. Peavoolugeneraatori ühendusskeem.



Joon. 7-30. Peavoolugeneraatori väliskarakteristik.

Väliskarakteristik, s. t. generaatori klemmipinge sõltuvus koormusvoolust konstantse pöörlemiskiiruse korral on näidatud joonisel 7-30.

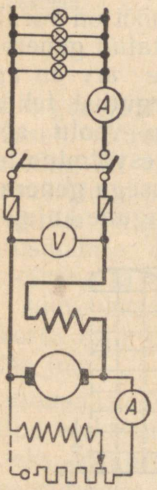
Generaatori klemmipinge tõuseb koormusvoolu suurendamisel nullist kuni nimivooluni, kuid edasisel voolu suurendamisel enam ei tõuse. Klemmipinge tõus on seletatav koormusvoolu ja seega ka ergutusvoolu suurenemisega, sest ergutusvoolu suurenemisega suureneb ka masina magnetvoog ja seega ka masina elektromotoorne jõud. Kuna nimikoormusel masina magnetsüsteem läheneb küllastusele, siis on magnetvoo juurdekasv selles piirkonnas väga väike. Peale selle suureneb ka ankrureaktsioon, mille tagajärjel generaatori elektromotoorne jõud väheneb. Suureneb ka generaatori sisepingelang, sest

$$U = E - I(r_a + r_e). \qquad (7\text{-}12)$$

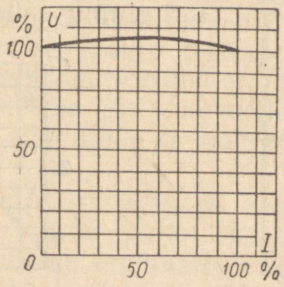
Ebasobiva väliskarakteristiku tõttu kasutatakse seda tüüpi generaatoreid ainult erijuhtudel.

7-13. Kompaundgeneraator

Joonisel 7-31 on antud kompaundgeneraatori ühendusskeem. Põhimähis, s. o. haruvoolumähis, ühendatakse ankru vooluahelaga paralleelselt, kuna peavoolumähis (abimähis) — järjestikku. Mõlemad mähised asuvad vastavalt samadel poolussüdamikel ning ühendatakse nii, et mõlema mähise mõju oleks samasuunaline (pärikompaund).



Joon. 7-31. Kompaundgeneraatori ühendusskeem.



Joon. 7-32. Kompaundgeneraatori väliskarakteristik.

Kompaundgeneraatori tühijooksukarakteristik ei erine haruvoolugeneraatori vastavast karakteristikust, sest tühijooksul vool kompaundgeneraatori peavoolumähises puudub.

Selle generaatori väliskarakteristik on näidatud joonisel 7-32.

Generaatori klemmipinge koormuse muutumisel nullist nimiväärtuseni jääb praktiliselt muutumatuks. See on ka arusaadav, sest haruvoolugeneraatorile omane pinge langus koormuse suurenemisel on siin kompenseeritud peavoolumähisest tekitatud magnetvoo suurenemisega seotud elektromotoorse jõu suurenemisega.

Kompaundgeneraatoreid kasutatakse väga laialdaselt juhul, kui järsult ja tihti muutuva koormuse korral on vaja hoida pinge konstantsena.

7-14. Generaatorite paralleeltöö

Elektrijaamades on tavaliselt mitu generaatorit. Kõik generaatorid ja energiatarbijad on ühendatud vasklattide — jaama kogumislattide külge.

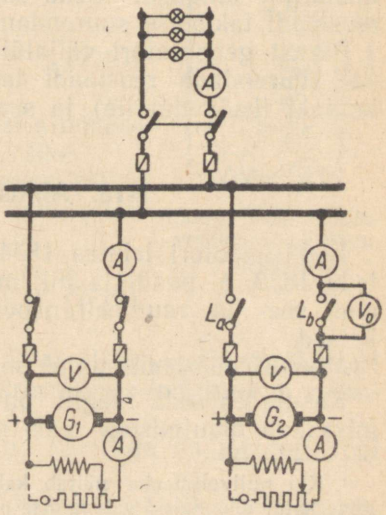
Üheaegselt töötavate generaatorite arv muutub sõltuvalt jaama koormusest.

Generaatorite paralleeltööks nimetatakse kahe või enama generaatori üheaegset töötamist ühistele kogumislattidele.

Kahe haruvoolugeneraatori paralleeltöö skeem on näidatud joonisel 7-33.

Oletame, et töötab ainult generaator G_1, kuid suurenev koormus nõuab ka teise generaatori G_2 sisselülitamist.

Sel juhul pannakse generaator G_2 primaarjõumasina poolt pöörlema nimipöörlemiskiirusega ning lülitatakse sisse lüliti L_a. Vähendades nüüd teise generaatori G_2 ergutusreostaadi takistust, reguleeritakse tema klemmipinge ($U_2 = E_2$) võrdseks elektrijaama kogumislattide



Joon. 7-33. Kahe haruvoolugeneraatori paralleeltöö skeem.

pingega U. Kui seejuures nullvoltmeetri (V_0) näit võrdub nulliga [1], lülitatakse sisse ka teine lüliti L_b. Pärast sisselülitamist on teise generaatori vool võrdne nulliga, sest

$$I_2 = \frac{E_2 - U}{r_{a2}} = 0.$$

Generaatori G_2 koormamiseks tuleb suurendada tema ergutusvoolu, milleks tuleb vähendada ergutusreostaadi takistust. Üheaegselt generaatori elektromotoorse jõu suurendamisega suurenevad ka generaatori vool ja võimsus. Voolu tugevnemine kutsub esile pidurdusmomendi (elektromagnetilise jõu) suurenemise. Et säilitada generaatori pöörlemiskiirus konstantsena, tuleb suurendada primaarjõumasina pöördemomenti ja võimsust, mida saavutatakse kütuse, auru või vee etteandmise suurendamisega.

Pinge reguleerimine jaama kogumislattidel toimub kõikide töötavate generaatorite elektromotoorse jõu üheaegse muutmise teel, mida saavutatakse nende ergutusvoolu muutmisega.

Kui on vaja generaator välja lülitada, tuleb see kõigepealt vabastada koormusest, s. t. viia generaatori vool nullini ja alles siis välja lülitada. Koormusest vabastamiseks vähendatakse elektromotoorset jõudu, kuni see muutub võrdseks kogumislattide pingega. Seda saavutatakse generaatori ergutusreostaadi takistuse suurendamisega.

Pärast generaatori väljalülitamist võrgust tuleb vähehaaval suurendada reostaadi takistust kuni ∞ (s. t. viia liugkontakt lisakontaktile) ja seejärel seisata primaarjõumasin.

7-15. Alalisvoolumootorid

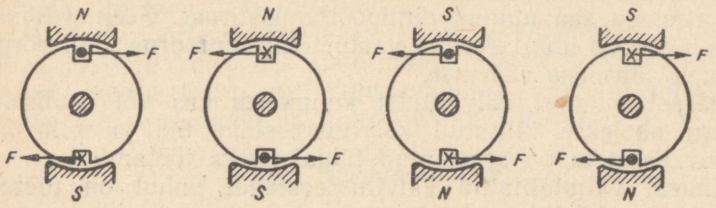
Elektrimootori leiutas 1834. a. B. S. Jakobi, kes kasutas teda 1838. a. paadi ja hiljem käru liikumapanemiseks. Need olid vee- ja raudteetranspordi elektrifitseerimise esimesed katsed.

Mootori pöörlemissuund on määratav vasaku käe reegliga.

Kasutades seda reeglit, on kerge näha, et mootori pöörlemissuuna muutmiseks tuleb muuta voolu suunda kas ankrus

[1] Kui nullvoltmeeter näitab kahekordset generaatori pinget, siis on generaator ühendatud vastupidise polaarsusega. Sel juhul ei tohi lülitit L_b sulgeda.
Õige ühenduse puhul peab ühe generaatori pluss olema ühendatud teise generaatori plussiga ja miinus — miinusega.

või ergutusmähises (joon. 7-34). Üheaegsel voolu suuna muutmisel nii ankrus kui ka ergutusmähises pöörlemissuund ei muutu. Mootori ühendusskeem on antud joonisel 7-35.



Joon. 7-34. Mootori pöörlemissuund.

Mootori käivitamisel, s. t. tema võrku lülitamisel, ühendatakse ankruga järjestikku käivitusreostaat (käiviti), millel on kolm klemmi: *Л* — liiniklemm, *Я* — ankruga ühendatud klemm ja *M* — ergutusmähisega ühendatud klemm.

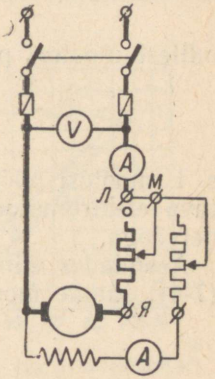
Võrgu vool läbib käivitusreostaadi ja klemmi *Я* kaudu ankru ja klemmi *M* kaudu ergutusahela. Kui käivitusreostaat puuduks, siis mootori käivitamisel läbiks ankrut vool

$$I_k = \frac{U}{r_a}, \qquad (7\text{-}13)$$

mis 10—20 korda ületab mootori nimivoolu, sest ankru takistus on väga väike.

Käivitusreostaadi abil piiratakse käivitusvoolu väärtuseni, mis moodustab $(1{,}5 \div 2)\ I_n$. Sel juhul

$$I_k = \frac{U}{r_a + r_k}. \qquad (7\text{-}14)$$



Joon. 7-35. Harupoolumootori ühendusskeem.

Käivitamisel arendab mootor momenti $M_k = CI_k\Phi$. Mootori ankur hakkab pöörlema ning ankrumähises indutseerub vastuelektromotoorne jõud.

Ankru pöörlemisel sisselülitatud käivitiga on mootori vool

$$I = \frac{U - E}{r_a + r_k}. \qquad (7\text{-}15)$$

Pöörlemiskiiruse kasvades suureneb vastuelektromotoorne

jõud ja vool nõrgeneb. Vajaliku pöördemomendi, seega ka voolu säilitamiseks tuleb käivitusreostaadi takistust pikkamööda vähendada, viies viimase nullini momendiks, mil ankur on peaaegu saavutanud nimipöörlemiskiiruse. Seejuures saavutab ankrus indutseeritav vastuelektromotoorne jõud võrgupingele lähedase väärtuse.

Pärast mootori käivitamist kuumeneb kas või osaliseltki ankru ahelasse lülitatud käivitusreostaat üle ja võib läbi põleda, sest ta on arvestatud lühiajaliseks töötamiseks.

Täiesti väljalülitatud käivitusreostaadi puhul on töötava mootori vool leitav valemiga:

$$I = \frac{U - E}{r_a}. \tag{7-16}$$

Ankrus indutseeritav vastuelektromotoorne jõud (7-6),

$$E = kn\Phi,$$

millest mootori pöörlemiskiirus

$$n = \frac{1}{k} \cdot \frac{E}{\Phi}, \tag{7-17}$$

s. t. mootori pöörlemiskiirus on võrdeline ankrus indutseeritava elektromotoorse jõuga ja pöördvõrdeline pooluste magnetvooga.

Asendades viimases valemis E tema avaldisega valemist (7-4), saame mootori pöörlemiskiiruse sõltuvuse koormusest:

$$n = \frac{1}{k} \cdot \frac{U - Ir_a}{\Phi}. \tag{7-18}$$

Nagu oli juba eespool näidatud, on mootori pöördemoment

$$M = CI\Phi,$$

ja mootori poolt arendatav võimsus, kaasa arvatud ka hõõrdekaod,

$$P = kI\Phi n.$$

Mootori tööprotsess kulgeb järgmiselt:

Mootori koormuse või pidurdusmomendi suurenemine kutsub esile tarbiva võimsuse P suurenemise, mis konstantse pinge U puhul toimub voolu I suurenemise arvel.

Vool suureneb seni, kuni mootori pöördemoment saavutab koormuse pidurdusmomendi väärtuse. Edaspidi töötab mootor etteantud koormuse puhul konstantse kiirusega niikaua, kuni toimub uus koormuse muutus.

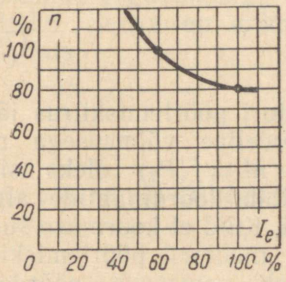
Mootori pöörlemiskiiruse ja tema pöördemomendi muutumise iseloom koormuse muutumisel sõltub mootori tüübist. Nagu generaatorid, nii jagunevad ka alalisvoolumootorid haruvoolu-, peavoolu- ja kompaundmootoriteks.

7-16. Haruvoolumootor

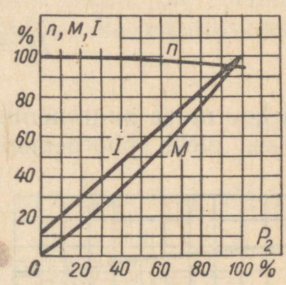
Haruvoolumootori ühendusskeem on näidatud joonisel 7-35. Ankrumähis ja ergutusmähis moodustavad kaks paralleelharu. Seega mootori poolt tarbitav vool

$$I = I_a + I_e. \qquad (7\text{-}19)$$

Mootori tööd iseloomustatakse tema üksikute suuruste vaheliste sõltuvuste abil, mis antakse mootori karakteristikute näol.



Joon. 7-36. Haruvoolumootori tühijooksukarakteristik.



Joon. 7-37. Haruvoolumootori töökarakteristikud.

Joonisel 7-36 on kujutatud tühijooksukarakteristik, mis kujutab mootori pöörlemiskiiruse n sõltuvust ergutusvoolust I_e tühijooksul konstantse klemmipinge U korral.

Nagu eespool oli näidatud (7-17 ja 7-18), on mootori pöörlemiskiirus võrdeline ankrus indutseeritava elektromotoorse jõuga ja pöördvõrdeline magnetvooga.

Mootori tühijooksul on ankru vool ja sisepingelang väiksed. Järelikult on ankrus indutseeritav elektromotoorne jõud peaaegu muutumatu ja ligikaudu võrdne klemmipingega. Järelikult tühijooksul sõltub pöörlemiskiirus ainult magnetvoost, olles sellega pöördvõrdeline.

Konstantsel koormusel jääb mootori pöörlemiskiiruse ja

ergutusvoolu vaheline sõltuvuse iseloom endiseks. Seega osutub võimalikuks, muutes reostaadi abil ergutusvoolu, reguleerida mootori kiirust (spetsiaalse ehituse puhul) suurtes piirides 1 : 1,5 : 3.

Joonisel 7-37 on antud haruvoolumootori töökarakteristikud.

Kõik kõverad on saadud mootori konstantse klemmipinge $U = \text{const}$ ja muutumatu ergutusvoolu $I_e = \text{const}$ korral.

Mootori pöörlemiskiirus n koormuse (P_2) muutumisel nullist nimiväärtuseni muutub tähtsusetul määral [$(5 \div 10\%) n_n$], sest mootori magnetvoog jääb peaaegu muutmatuks ja pingelang ankrus on isegi nimivoolu korral väga väike, võrreldes klemmipingega, mistõttu elektromotoorne jõud koormuse muutumisel muutub väga vähe.

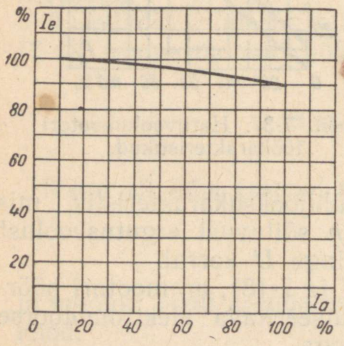
Mootori poolt võllil arendatav kasulik võimsus

$$P_2 = \frac{2\pi n M}{60},$$

millest pöördemoment

$$M = \frac{60 P_2}{2\pi n}. \qquad (7\text{-}20)$$

Kui koormuse suurenemisel mootori pöörlemiskiirus jääks endiseks, oleks pöördemoment võrdeline võimsusega ning kõver $M = f(P_2)$ oleks sirge, mis läbib koordinaatide algus-punkti. Kuid et koormuse suurenedes mootori pöörlemiskiirus väheneb, suureneb pöördemoment kiiremini kui konstantse pöörlemiskiiruse korral ning kõver $M = f(P_2)$ erineb sirgest ja kaldub ülespoole.



Joon. 7-38. Haruvoolumootori reguleerimiskarakteristik.

Nimipingel, nimipöörlemiskiirusel ja koormuse puudumisel ($P_2 = 0$) on mootori vool I_0 tähtsusetult väike [$(5 \div 10\%) I_n$], sest mootori tühijooksuvõimsus ($P_0 = I_0 U_n$) kujutab endast mootori kaovõimsust. Koormuse (P_2) suurenemine mootori võllil kutsub esile ka voolu suurenemise, mis on peaaegu võrdeline koormusega [$(I - I_0) U_n \approx \approx P_2$]. Seega on voolugraafik praktiliselt sirge.

Koormuse suurenemine põhjustab mootori pöörlemiskiiruse vähenemist. Pöörlemiskiiruse konstantsena säilitamiseks on vaja vähendada mootori ergutusvoogu, mida saavutatakse ergutusreostaadi abil ergutusvoolu vähendamise teel.

Joonisel 7-38 on antud mootori reguleerimiskarakteristik, mis kujutab endast ergutusvoolu sõltuvust koormusvoolust $I_e = f(I_a)$ mootori konstantse pinge ja konstantse kiiruse korral.

Sellest karakteristikust näeme, milline peaks olema ergutusvool mitmesugustel koormustel, et mootori pöörlemiskiirus ei muutuks.

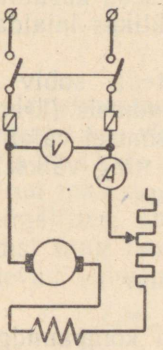
Haruvoolumootoreid kasutatakse niisugustes seadmetes, kus on vaja konstantset pöörlemiskiirust mitmesugustel koormustel.

7-17. Peavoolumootor

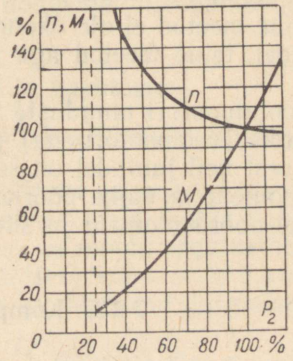
Peavoolumootori ühendusskeem on antud joonisel 7-39. Ankrumähis, ergutusmähis ja käivitusreostaat on ühendatud järjestikku. Seega on ankruvool ühtlasi ka ergutusvooluks $I_a = I_e$, kus

$$I_a = \frac{U - E}{r_a + r_e}. \qquad (7\text{-}21)$$

Kuna väikse väljatiheduse korral on magnetvoog võrdeline



Joon. 7-39. Peavoolumootori ühendusskeem.



Joon. 7-40. Peavoolumootori pöörlemiskiiruse ja pöördemomendi karakteristikud.

ergutusvooluga ($\Phi = kI_e$), siis ankruvoolu ja magnetvoo korrutisega võrdeline pöördemoment on võrdeline voolu ruuduga

$$M = CI_a\Phi = k_1 I_a I_e = k_1 I^2. \qquad (7\text{-}22)$$

Seega koormuse suurenemisel suureneb järsult ka pöördemoment (joon. 7-40). Mootori pöörlemiskiirus on avaldatav järgmiselt:

$$n = \frac{1}{k} \cdot \frac{U - I(r_a + r_e)}{\Phi}. \qquad (7\text{-}23)$$

Sellest järeldub, et koormuse suurenedes mootori pöörlemiskiirus langeb järsult (joon. 7-40), sest suurenevad mootori magnetvoog ja pingelang ankrus ning ergutusmähises.

Väikse koormuse korral on mootori pidurdusmoment väike ja tarbitav vool tähtsusetult väike. Järelikult on väike ka mootori magnetvoog.

Magnetvoo ja voolu väikeste väärtuste korral mootori kiirus suureneb, nagu selgub avaldisest (7-23), ja võib esineda avarii oht, sest koormuse äralangemisel võib mootori pöörlemiskiirus tõusta sedavõrd, et sellele järgneb mootori purunemine.

Seepärast ei tohi peavoolumootorit käivitada tühjalt või koormusega, mis on alla 20—25% nimikoormusest.

Peavoolumootori pöörlemiskiirust on võimalik reguleerida tema klemmipinge muutmisega, ühendades järjestikku ankru ahelasse muudetava takistuse, või mootori magnetvoo muutmisega, mida saavutatakse ergutusmähise šunteerimise teel.

Esimene meetod ei ole ökonoomne ja seda kasutatakse vaid erijuhtudel, teine meetod aga leiab praktikas laialdast rakendamist.

Peavoolumootori omaduste tõttu on teda sobiv kasutada transpordis (veomootoritena) ja tõsteseadmeis (kraanamootoreina), sest neil juhtudel on suurel koormusel vajalik ka suur pöördemoment ja väike pöörlemiskiirus ning väiksel koormusel väike pöördemoment ja suurem kiirus.

7-18. Kompaundmootor

Kompaundmootoritel on samuti nagu kompaundgeneraatoritelgi kaks mähist — haruvoolu- ja peavoolumähis.

Niisuguse mootori ühendusskeem on näidatud joonisel 7-41. Ühel juhul on mõlemad mähised ühendatud nii, et nad

tekitavad ühesuunalise magneetimisergutuse (pärikompaundmootor), teisel juhul aga on magneetimisergutused vastassuunalised (vastukompaundmootor).

Pärikompaundmootori pöörlemiskiirus

$$n = \frac{1}{k} \cdot \frac{U - I(r_a + r_{peav})}{\Phi_{haruv} + \Phi_{peav}} \quad (7\text{-}24)$$

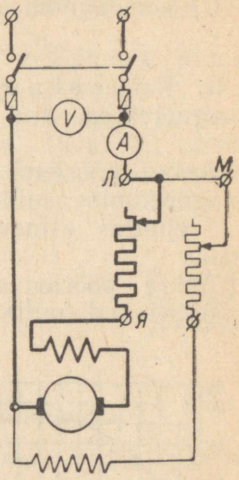
ja pöördemoment

$$M = CI_a(\Phi_{haruv} + \Phi_{peav}). \quad (7\text{-}25)$$

Kuna haruvoolumähise magnetvoog Φ ei sõltu koormusest ning peavoolumähise magnetvoog muutub peaaegu võrdeliselt vooluga, siis olenevalt nende magnetvoogude suhtest on võimalik saada haruvoolu- ja peavoolumootori vahepealsete karakteristikutega mootoreid.

Vastukompaundmootori pöörlemiskiirus

$$n = \frac{1}{k} \cdot \frac{U - I(r_a + r_{peav})}{\Phi_{haruv} - \Phi_{peav}}, \quad (7\text{-}26)$$



Joon. 7-41. Kompaundmootori ühendusskeem.

millest järeldub, et haruvoolumähise tunduva ülekaalu korral hakkab mootori koormamisel magnetvoog teatud määral vähenema, kuna pöörlemiskiirus jääb praktiliselt muutumatuks.

Niisugust ergutusmähiste ühendusviisiga mootorit kasutatakse konstantset kiirust nõudvate mehhanismide käitamiseks.

7-19. Kaod ja kasutegur

Igas elektrimasinas esinevad energiakaod, mida võib jaotada järgmistesse rühmadesse:

1. Vaseskaod ankrumähises ja ergutusmähistes, mis on tingitud mähiste soojendamisest neid läbiva voolu toimel.

Ankrumähises, abipoolustes, peavoolu-ergutusmähistes ja reostaadist ning haruvoolumähisest koosnevas haruvooluahelas esinevad võimsuskaod on avaldatavad järgmiselt:

$$I_a^2 r_a, \quad I_a^2 r_{a.p}, \quad I_a^2 r_{peav} \text{ ja } UI_e.$$

Seega vaseskaod:

1) haruvoolumasinal:

$$P_v = I_a^2(r_a + r_{a.p}) + UI_e; \quad (7\text{-}27)$$

2) peavoolumasinal:

$$P_v = I_a^2(r_a + r_{a.p} + r_{peav}); \qquad (7\text{-}28)$$

3) kompaundmasinal:

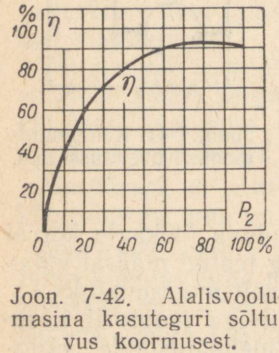
$$P_v = I_a^2(r_a + r_{a.p} + r_{peav}) + UI_e. \qquad (7\text{-}29)$$

2. Rauaskaod, mis tekivad masina ankru pöörlemisel magnetväljas. Nad koosnevad hüstereesi- ja pöörisvoolukadudest.

Ankru pöörlemisel toimub ankru plekkide pidev ümbermagneetimine, mille tagajärjel ankur soojeneb.

Seejuures esinevat võimsuskadu nimetatakse hüstereesikaoks.

Ankru pöörlemisel magnetväljas indutseeritakse ankrus pöörisvoolud, mille toimel ankruplekid soojenevad. Pöörisvoolude vähendamiseks koostatakse ankrud õhukestest (0,5 mm) terasplekkidest.



Joon. 7-42. Alalisvoolumasina kasuteguri sõltuvus koormusest.

Hüstereesist ja pöörisvooludest tingitud võimsuskadu sõltub ümbermagneetimise sagedusest $\left(f = \frac{pn}{60}\right)$ ja maksimaalsest väljatihedusest B_m.

3. Hõõrdekaod koosnevad hõõrdekadudest laagreis, pöörlevate osade ja õhu vahelistest hõõrdekadudest ning harjade ja kommutaatori vahelistest hõõrdekadudest. Mootori hõõrdekadude võimsus konstantsel temperatuuril sõltub mootori pöörlemiskiirusest n ja on sellega võrdeline.

Alalisvoolumasina kasuteguriks nimetatakse kasuliku võimsuse P_2 ja mootori koguvõimsuse P_1 suhet. Seega kasutegur

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%.$$

Kui masin töötab generaatorina, siis on kasulik võimsus $P_2 = UI$ võimsuskadude võrra generaatori koguvõimsusest P_1 väiksem. Sel juhul kasutegur

$$\eta_{gen} = \frac{UI}{UI + P_h + P_r + P_v} \cdot 100\%. \qquad (7\text{-}30)$$

Masina töötamisel mootorina on tema koguvõimsus $P = UI$ võimsuskadude võrra suurem kui võimsus võllil. Sel juhul masina kasutegur

$$\eta_{moot} = \frac{UI - (P_h + P_r + P_v)}{UI} \cdot 100\%. \qquad (7\text{-}31)$$

Masina koormuse muutumisel tema kasutegur muutub (joon. 7-42).

Tühijooksul on kasutegur võrdne nulliga, sest $P_2 = 0$. Koormuse suurenemisel kasutegur algul kasvab kiiresti, kuid siis tema kasv aeglustub, ta saavutab oma maksimaalväärtuse ning hakkab seejärel pikkamööda langema. Tavaliselt omab kasutegur maksimaalväärtuse, kui koormus moodustab 75—100% masina nimivõimsusest.

Kasuteguri väärtus:

väikse	võimsusega masinail	70—87%
keskmise	„ „ (50—100 kW)	87—90%
suure	„ „ (500—1000 kW)	91—93%.

7-20. Laboratoorne töö. Haruvoolumootor

Enne töö tegemisele asumist tutvuda raamatu lõpus toodud lisaga ja § 7-16.

Tööplaan

1. Üles märkida katsetatava mootori tehnilised põhiandmed. Vastavalt andmetele valida mõõte- ja abiaparatuur ning üles märkida nende andmed.
2. Koostada skeem vastavalt joon. 7-35 ning lasta see juhendajal kontrollida.
3. Käivitada mootor. Jälgida tema pöörlemissuunda. Mootor välja lülitada.
4. Muuta mootori pöörlemissuunda:
a) ergutusvoolu suuna muutmise teel;
b) ankruvoolu suuna muutmise teel.
5. Käivitada mootor. Mootori nimipinge ja nimiergutusvoolu juures muuta koormust nullist nimikoormuseni pidurilindi pinguse muutmise teel.

Mitmesugustel koormustel jälgida suuruste U, I, I_e, n ja F muutumist.

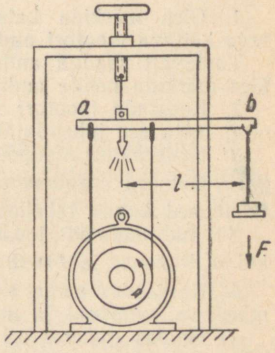
Siin on F kangi õla l otsa rakendatud jõud, mis hoiab kangi ab horisontaalasendis (joon. 7-43).

6. Saadud andmete põhjal leida:
a) mootori pöördemoment

$$M = Fl;$$

b) mootori poolt arendatav võimsus

$$P_2 = F\frac{\pi ln}{0{,}102 \cdot 60} = 1{,}03\ Mn;$$



Joon. 7-43. Mootori pidurdusseadise skeem.

c) mootori kasutegur

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% = \frac{1{,}03\,Mn}{IU} \cdot 100\%.$$

Mõõtmis- ja arvutustulemused kanda tabelisse 7-1.

7. Saadud andmeil joonestada mootori töökarakteristikud: n; I; M; $\eta = f(P_2)$, kui $U = \text{const}$ ja $I_e = \text{const}$.

8. Mootori nimipingel muuta koormust nullist nimiväärtuseni, reguleerides seejuures ergutusvoolu nii, et mootori pöörlemiskiirus jääks muutumatuks.

Saadud andmeil joonestada mootori reguleerimiskarakteristik, s. t.

$$I_e = f(I) \text{ kui } U = \text{const ja } n = \text{const.}$$

Tabel 7-1

Jrk. nr.	Mõõtmistulemused						Arvutustulemused				Märkusi
	U	I	I_e	n	F	l	M	$P_1 = IU$	P_2	η	
	V	A	A	p/min	kg	m	kgm	W	W	%	

7-21. Laboratoorne töö. Haruvooluergutusega generaator

Enne töö tegemisele asumist tutvuda § 7-10 ja 7-11 sisuga.

Tööplaan

1. Üles märkida katsetatava generaatori tehnilised põhiandmed ja teda käitava mootori andmed.

Vastavalt saadud andmeile valida vajalik mõõte- ja abiaparatuur ja üles märkida nende andmed.

2. Koostada mootori (joon. 7-35) ja generaatori (joon. 7-27) skeem ning lasta see juhendajal kontrollida.

3. Generaatori nimipöörlemiskiirusel üles märkida tema elektromotoorse jõu väärtused ergutusvoolu muutumisel $I_e = 0$ kuni $I_e = I_{en}$. Mõõtmistulemused kanda tabelisse 7-2.

Saadud andmeil joonestada tühijooksukarakteristik, s. t. $E = f(I_e)$, kui $n_n = \text{const}$ ja $I = 0$.

4. Kasutades sama skeemi, reguleerida välja generaatori nimipöörlemiskiirus, nimivool ja nimiergutusvool.

a) Hoides generaatori ergutusvoolu ja pöörlemiskiiruse konstantsena, vähendada koormusvoolu $I = I_n$ kuni $I = 0$, ja märkida tabelisse 7-3 I, U, I_e, n mitmesugustel koormustel.

b) Korrata katset, hoides konstantsena ergutusahela takistuse ja generaatori pöörlemiskiiruse.

Saadud andmeil joonestada generaatori väliskarakteristik:

a) $U = f(I)$, kui $n = \text{const}$ ja $I_e = \text{const}$;

b) $U = f(I)$, kui $n = \text{const}$ ja $r_e = \text{const}$.

Määrata protsentuaalne pingemuutus [valem (7-11)].

5. Kasutades sama skeemi, jälgida generaatori nimipöörlemiskiirusel ergutusvoolu väärtust, mida tuleb muuta nii, et mitmesugustel generaatori voolu ($I = 0$ kuni $I = I_n$) väärtustel generaatori klemmipinge püsiks konstantsena.

Suurused U, I, I_e, n kanda tabelisse 7-3.

Saadud andmeil joonestada generaatori reguleerimiskarakteristik, s. t. $I_e = f(I)$, kui $U = \text{const}$ ja $n = \text{const}$.

Tabel 7-2

Jrk. nr.	E	I_e	n	Märkusi
	V	A	p/min	

Tabel 7-3

Jrk. nr.	U	I	I_e	n	Märkusi
	V	A	A	p/min	

KAHEKSAS PEATÜKK

TRANSFORMAATORID

8-1. Üldmõisted

Elektrienergia ülekandmisel elektrijaamast tarbijani, mis asub tavaliselt elektrijaamast kaugel, on vaja elektrienergia ülekandekadude ja juhtmete kaalu vähendamiseks tõsta generaatori pinget (sajad või tuhanded voldid) elektriülekandeliinides kasutatava pingeni, mis ulatub kümnetesse ja sadadesse kilovoltidesse. Teisest küljest ei ületa tarbijate toitepinge tavaliselt 127—380 V, sest üksikute tarbijate võimsus pole tavaliselt kuigi suur ja samuti on sellel pingel seadmete teenindamine ohutum. Vahelduvvoolu korral on pinget hõlpus tõsta ja alandada trafo abil. Transformaatoriks (ehk lühidalt trafoks) nimetatakse elektromagnetilist aparaati, mis on ette

nähtud ühe vahelduvvoolusüsteemi muutmiseks teisesüsteemiliseks, millel on teine pinge ning vool sama sageduse puhul.

Trafo leiutajaiks (1876. a.) on P. N. Jablotškov ja I. F. Ussagin.



Pavel Nikolajevitš Jablotškov (1847—1894).

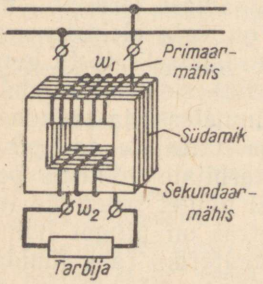
Silmapaistev leidur, konstruktor ja teadlane. Leiutas transformaatori ja kaarleeklambi — Jablotškovi küünla. Jablotškovi küünal oli esimene elektriline valgusallikas, mida kasutati laialdaselt kõigis maades.

8-2. Trafo ehitus

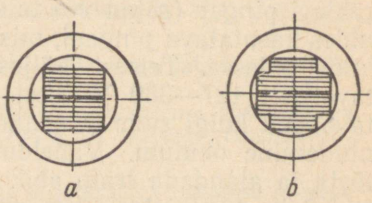
Trafo koosneb magnetjuhist (raudkehast), millele on asetatud kaks või rohkem mähist (joon. 8-1). Mähistega ümbritsetud magnetjuhi osi nimetatakse südamikeks.

Vooluallikaga ühendatud mähist nimetatakse primaarmähiseks ning mähist, mis on ühendatud tarbijaga, sekundaarmähiseks.

Pöörisvoolukadude vähendamiseks on trafo magnetahel koostatud elektrotehnilise terase lehtedest paksusega 0,35 kuni

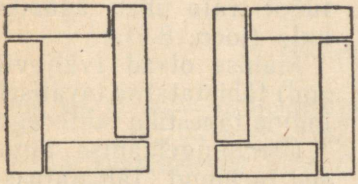


Joon. 8-1. Transformaator.

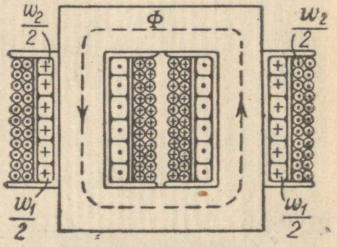


Joon. 8-2. Trafo südamikud.

0,5 mm. Lehed on omavahel isoleeritud õhukese paberi või lakiga. Raudkeha südamik on ruudu- või ristikujulise ristlõikega (joon. 8-2, *a* ja *b*). Võimsamatel trafodel on trafo südamiku ristlõige astmeline, lähenedes kujult ringile. Trafo südamiku koostamine üksikutest plekkidest on näidatud joonisel 8-3.



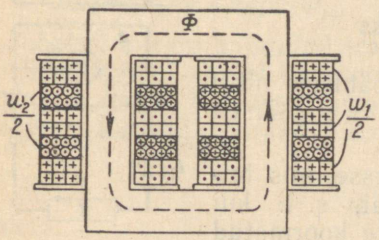
Joon. 8-3. Ühefaasilise trafo südamiku koostamine lehtedest.



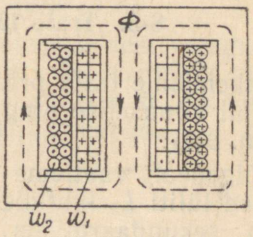
Joon. 8-4. Südamiktrafo.

Sõltuvalt magnetjuhi kujust jagunevad trafod südamiktüüpi ja manteltüüpi trafodeks. Südamiktüüpi trafol magnetvoo teekond ei hargne (joon. 8-4). Trafo mähised on valmistatud silindriliste poolidena. Parema magnetilise sidestuse saavutamiseks asetatakse nad ühisele südamikule kontsentriliselt üksteise peale. Alampingemähis asetatakse südamikule lähemale. Tavaliselt jaotatakse südamiktüüpi trafo kumbki mähis mõlemale südamikule (joon. 8-4): ühele südamikule pool alampinge- ja pool ülempingemähist ja samuti teisele südamikule. Seejuures ühendatakse sama mähise mõlemad pooled nii, et nende magnetvood liituksid.

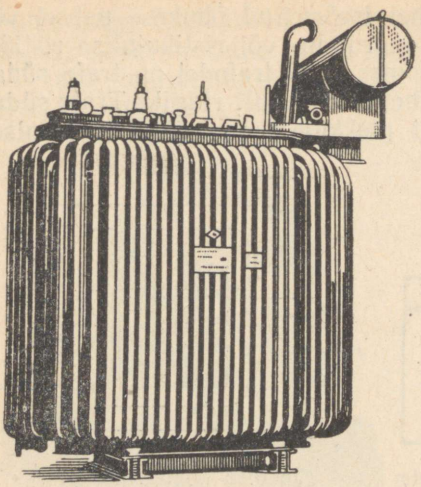
Peale silindriliste mähiste kasutatakse kõrgepingetrafodes



Joon. 8-5. Trafo mähise ketas-pool.



Joon. 8-6. Manteltrafo.



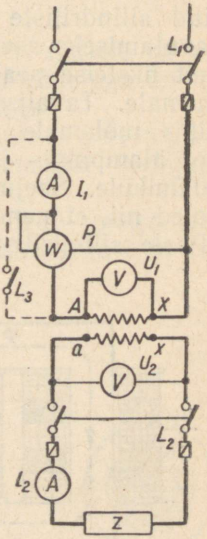
Joon. 8-7. Õlijahutusega trafo.

ketasmähiseid. Ketasmähiste puhul asetatakse alampinge- ja ülempingemähise kettad vaheldumisi (joon. 8-5).

Manteltüüpi trafol hargneb magnetvoog kahte sümmeetrilisse harru. Mähised asetatakse manteltüüpi trafo ühele südamikule (joon. 8-6).

Mähise otsad (väljaviigud) tähistatakse tavaliselt ladina tähestiku tähtedega. Ülempingemähise algused ja lõpud tähistatakse suurte tähtedega: algused — A, B, C ning lõpud — X, Y, Z, alampingemähiste algused ja lõpud aga väikeste tähtedega: algused — a, b, c ning lõpud — x, y, z.

Sõltuvalt jahutussüsteemist jaotatakse trafod õhkjahutusega ja õlijahutusega trafodeks. Suure võimsusega trafod valmistatakse tavaliselt õlijahutusega. Nende trafode raudkeha koos mähistega asetatakse mineraalse trafoõliga täidetud teraspaaki. Niisuguse trafo väliskuju on näidatud joonisel 8-7. Trafo mähiste otsad on välja toodud läbiviiguisolaatorite kaudu, mis on kinnitatud paagi kaanele.



Joon. 8-8. Trafo lülitusskeem.

8-3. Trafo tühijooks

Rakendame trafo primaarmähisele lüliti L_1 abil siinuselise pinge $U_1 = U_{1m} \sin \omega t$ (joon. 8-8).

Kõigepealt vaatleme protsesse, mis toimuvad lüliti L_2 lahtioleku ajal, s. t. kui trafo sekundaarmähis ei ole koormatud (tühijooksu režiim).

Trafo pingestatud primaarmähises tekib

vool, mis analoogiliselt voolule induktiivsusega vooluahelas (§ 4-7) jääb pingest maha ligi 90° nurga võrra. Trafo raudkehas tekib vahelduv magnetvoog, mis on praktiliselt faasis vooluga ja aheldub trafo mõlema mähisega. Vahelduv magnetvoog indutseerib trafo primaar- ja sekundaarmähises elektromotoorsed jõud, mille efektiivväärtused vastavalt valemile (4-20):

$$E_1 = 4{,}44 f w_1 \Phi_m$$

ja

$$E_2 = 4{,}44 f w_2 \Phi_m,$$

kus w_1 ja w_2 — primaar- ja sekundaarmähise keerdude arv;
Φ_m — magnetvoo maksimaalväärtus magnetjuhis.

Elektromotoorsed jõud E_1 ja E_2 on omavahel faasis ning jäävad magnetvoost maha $^1/_4$ perioodi võrra. Jättes arvestamata pingelangu primaarmähises (mis primaarpingega võrreldes on tähtsusetult väike), võime Kirchhoffi II seaduse alusel u_1 ja e_1 hetkväärtuste kohta kirjutada, et

$$u_1 = -e_1.$$

Niisugusel juhul on primaarmähise klemmipinge efektiivväärtus võrdne primaarmähise indutseeritud elektromotoorse jõu efektiivväärtusega, s. t.

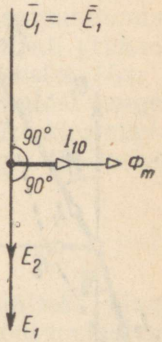
$$U_1 = E_1 = 4{,}44 f w_1 \Phi_m. \qquad (8\text{-}1)$$

Koormamata sekundaarmähise klemmipinge hetkväärtus on võrdne e_2 hetkväärtusega. Seega

$$u_2 = e_2$$

ning

$$U_2 = E_2 = 4{,}44 f w_2 \Phi_m. \qquad (8\text{-}2)$$



Joon. 8-9. Trafo tühijooksu vektordiagramm.

Joonisel 8-9 on kujutatud trafo tühijooksu vektordiagramm.

Ülempingemähise elektromotoorse jõu ja alampingemähise elektromotoorse jõu suhet nimetatakse trafo ülekandeteguriks (tähistatakse tähega k). Tühijooksul

$$k = \frac{U_1}{U_2} \qquad (8\text{-}3)$$

ehk

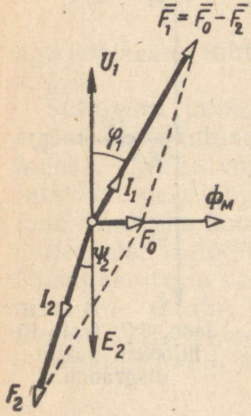
$$k = \frac{4{,}44 f w_1 \Phi_m}{4{,}44 f w_2 \Phi_m} = \frac{w_1}{w_2}. \qquad (8\text{-}4)$$

Kui $\frac{w_1}{w_2} > 1$, siis nimetatakse niisugust trafot pingetmadaldavaks trafoks, kui aga $\frac{w_1}{w_2} < 1$, siis pingettõstvaks trafoks. Nagu juba varem mainitud, jääb primaarmähise vool tühijooksul pingest maha nurga φ_1 võrra, mis on ligi 90°. Nurga φ_1 koosinus on tühijooksul 0,1 piires. Tühijooksuvoolu I_0 väärtus on 3—8% primaarmähise nimivoolust. Korrutist $I_0 w$ tühijooksul nimetatakse trafo magneetimisergutuseks ning tähistatakse F_0. Seega

$$F_0 = I_0 w_1. \tag{8-5}$$

8-4. Trafo koormamine

Lülitame sisse lüliti L_2 (joon. 8-8). Sellega ühendame trafo sekundaarmähisega tarbija. Sekundaarmähise vooluahelas tekib vool I_2. Selle suurus sõltub E_2-st ja sekundaarringi kogutakistusest.



Joon. 8-10. Magneetimisergutuste vektordiagramm.

Induktiivsust sisaldava koormuse korral jääb vool I_2 E_2-st nurga ψ_2 võrra maha. Sekundaarmähise voolu ja keerdude arvu korrutis kujutab endast magneetimisergutust F_2.

Seega

$$F_2 = I_2 w_2. \tag{8-6}$$

Vaatamata uue magneetimisergutuse ilmumisele peab trafo magnetvoog säilitama sama (maksimaalse) väärtuse mis tühijooksulgi. See on seletatav sellega, et igasugusel koormusel, kaasa arvatud ka nimikoormus, on pingelang primaarmähises tähtsusetu (umbes 1% nimipingest) ning järelikult primaarpinge konstantse efektiivväärtuse puhul peavad elektromotoorne jõud E_1 ja teda indutseeriv magnetvoog jääma praktiliselt muutumatuks. Kuid see on võimalik ainult juhul, kui üheaegselt voolu I_2 tekkimisega sekundaarahelas primaarahela vool suureneb väärtuseni I_1, mispuhul primaar- ja sekundaarmähise magneetimisergutuste vektoriaalne summa võrdub tühijooksu-magneetimisergutusega, s. t.

$$\bar{F}_1 + \bar{F}_2 = \bar{F}_0. \tag{8-7}$$

Avaldisest (8-7) saame, et primaarmähise magneetimisergutus

$$\overline{F}_1 = \overline{F}_0 + (-\overline{F}_2).$$

Magneetimisergutuste vektordiagramm on näidatud joonisel 8-10.

Suure koormuse korral on F_0 primaarmähise magneetimisergutusega F_1 võrreldes väga väike. Sel juhul on võimalik küllaldase täpsusega lugeda primaar- ja sekundaarmähise magneetimisergutused võrdseks, s. o.

$$F_1 = F_2 \text{ ehk } I_1 w_1 = I_2 w_2,$$

millest

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{k}. \tag{8-8}$$

Tuleb pöörata tähelepanu sellele, et voolud I_1 ja I_2 on omavahel faasis nihutatud ligi 180° nurga võrra.

Konstantse primaarpinge puhul trafo koormuse muutumisel nullist kuni nimiväärtuseni suurenevad vastavalt nii primaar- ja sekundaarvool kui ka pingelang tema mähistes ($I_1 z_1$ ja $I_2 z_2$). Samal ajal pinge sekundaarmähise klemmidel langeb.

Kui tähistada koormatud trafo sekundaarmähise klemmipinget U_2 ning trafo sekundaarmähise klemmipinget tühijooksul U_{20}, saame:

$$\Delta U\% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100\%.$$

Suurust $\Delta U\%$ nimetatakse trafo protsentuaalseks pingemuutuseks ning tema väärtus sõltub nii koormusvoolust kui ka koormuse iseloomust, s. t. $\cos \varphi_2$-st.

Tänapäeva trafodes on protsentuaalne pingelang väike, tavaliselt 2—3% piires.

8-5. Trafo võimsus ja kasutegur

Trafo primaarvõimsus

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1.$$

Trafo sekundaarvõimsus

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2.$$

Primaar- ja sekundaarvõimsuse vahe $(P_1 - P_2)$ kujutab endast võimsuskadu. Kaod trafos koosnevad kahest osast:

1) vaseskaod P_v mähiste vases ja 2) hüstereesist ning pööris-vooludest tingitud rauaskaod trafo raudkehas $P_r = P_h + P_r$.

Vaseskaovõimsus

$$P_v = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2.$$

Antud trafo puhul sõltuvad vaseskaod ainult trafo koormusest. Trafo rauaskaod konstantsel vahelduvvoolu sagedusel olenevad väljatiheduse maksimaalväärtusest rauas. Kuna antud pingel trafo magnetvoo maksimaalväärtus ja seega ka väljatiheduse maksimaalväärtus jäävad muutumatuks, siis võib ütelda, et rauaskaod trafo koormusest ei sõltu. Rauaskadusid on võimalik mõõta tühijooksukatsel, mispuhul lüliti L_2 (joon. 8-8) on avatud, lüliti L_1 suletud ning trafo primaarmähisele on rakendatud pinge $U_1 = U_{1n}$. Sel juhul näitab vattmeeter $P_0 = P_r + P_{v0}$.

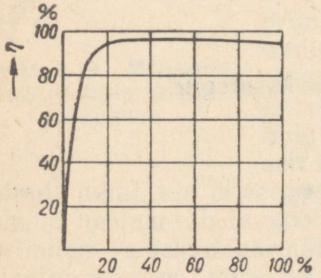
Kuna vaseskaod P_{v0} on tühijooksul tähtsusetult väiksed, siis

$$P_0 = P_r. \qquad (8\text{-}9)$$

Vaseskaod määratakse lühisekatsega, mille juures sekundaarmähise klemmid *ax* (joon. 8-8) on omavahel lühistatud ja primaarmähisele rakendatakse niisugune pinge U_k, mispuhul voolud mõlemas mähises võrduvad nimivooluga. Seda primaarmähisele rakendatud pinget nimetatakse lühispingeks ja ta moodustab 5—12% U_n-st.

Vattmeeter mõõdab võimsust $P_1 = P_v + P_{r.1}$. Kuna $U_k \approx 0{,}05\, U_n$, siis on väljatihedus trafo rauas tähtsusetult väike ning rauaskaod lühise olukorras $P_{r.1}$ võib jätta arvestamata. Siis

$$P_1 = P_v. \qquad (8\text{-}10)$$



Joon. 8-11. Trafo kasuteguri sõltuvus kasulikust võimsusest.

Trafo kasuteguriks nimetatakse trafo sekundaarvõimsuse P_2 ja primaarvõimsuse P_1 suhet, s. t.

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% = \frac{P_2}{P_2 + P_v + P_r} \cdot 100\% = \frac{U_2 I_2 \cos \varphi_2}{U_2 I_2 \cos \varphi_2 + P_v + P_r}. \qquad (8\text{-}11)$$

Et trafol puuduvad pöörlevad osad, siis on tema kaod suhteliselt väiksed ja kasutegur kõrge, ulatudes suure võimsusega trafodel 98—99%. Joonisel 8-11 on näidatud trafo kasuteguri sõltuvus koormusest.

Täpsemal analüüsimisel selgub, et maksimaalne kasutegur esineb sellisel koormusel, mille juures rauaskaod ja vaseskaod on võrdsed.

Peale trafo tavalise kasuteguri (sekundaar- ja primaarvõimsuse suhe) on olemas veel trafo aastakasutegur. Selle all mõistetakse trafo poolt aasta jooksul sekundaarpoolel äraantud ja primaarpoolel võrgust võetud elektrienergia koguste suhet:

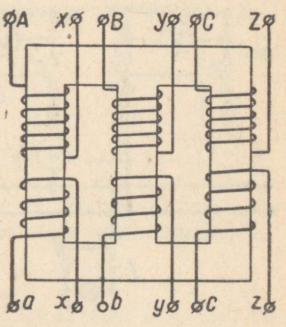
$$\eta_a = \frac{W_2}{W_1} 100\%, \qquad (8\text{-}12)$$

kus W_1 — trafo primaarpoolel aasta jooksul võrgust võetud energia;

W_2 — trafo poolt aasta jooksul äraantud energia.

8-6. Kolmefaasiline trafo

Teatud pingega kolmefaasilist voolu võib transformeerida teisepingeliseks vahelduvvooluks kolme ühefaasilise trafo abil või ühe kolmefaasilise trafo abil. Kolmefaasilisel trafol asuvad kõik kolm südamikku ühes tasapinnas ning igal südamikul asetsevad ühe faasi mähised (joon. 8-12). Üks neist on primaar- ja teine — sekundaarmähis. Säärase trafo iga faas töötab ühefaasilise trafona ja seepärast kehtib kõik ühefaasilise trafo kohta öeldu ka kolmefaasilise trafo iga faasi kohta.



Joon. 8-12. Kolmefaasiline trafo.

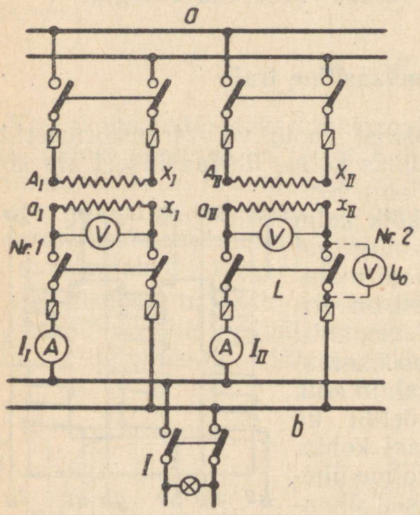
Kolmefaasilise trafo või kolme ühefaasilise trafo primaarmähised ühendatakse tähte või kolmnurka. Samuti on võimalik ühendada ka sekundaarmähised. Seega on kokku võimalik neli erinevat trafomähiste ühendusskeemi: täht-täht (Y/Y); täht-kolmnurk ($Y/\triangle$); kolmnurk-täht ($\triangle/Y$) ja kolmnurk-kolmnurk ($\triangle/\triangle$). Mainitud neljast skeemist on standardiseeritud vaid: a) Y/Y_0; b) $Y/\triangle$; c) $Y_0/\triangle$, millede käsitlemisega me piirdumegi.

Näidatud tähistustes näitab lugeja ülempingemähiste ühendusskeemi, nimetaja aga alampingemähiste ühendusskeemi. Tähistust Y_0 kasutatakse mähiste kohta, mis on ühendatud tähte ja mille nullpunkt on välja toodud.

Peale selle on trafo sildiandmetes näidatud ka trafo ühendusrühm. Rühm näitab, millise nurga võrra (kellaosuti liikumise suunas) on liinipinge alampinge-poolel nihutatud liinipinge suhtes ülempinge-poolel. ГОСТ jätab kaks ühendusrühma: 12, kui nihkenurk on 0° ja 11, kui nihkenurk on 330°. Ühendusrühma on vaja teada juhul, kui trafod lülitatakse paralleeltööle.

8-7. Paralleeltöö

Tihti ühendatakse kaks või enam trafot paralleeltööle. Joonisel 8-13 on antud kahe ühefaasilise trafo paralleeltöö skeem. Trafode primaarmähised A_1X_1 ja A_2X_2 on ühendatud toitevõrguga a, millest võetakse elektrienergiat.



Joon. 8-13. Trafode paralleeltöö.

Paralleelselt ühendatud sekundaarmähised a_1x_1 ja a_2x_2 on ühendatud toidetava võrguga b, milles tarbitakse trafodelt saadavat elektrienergiat.

Trafode paralleeltöö on võimalik vaid juhul, kui trafode primaarmähiste võrdsete pingete korral on nende sekundaarpinged suuruselt võrdsed ja omavahel faasis. Kolmefaasiliste trafode lülitamisel paralleeltööle eeldab selle nõude täitmine trafode kuuluvust samasse ühendusrühma, sest ainult sel juhul on sekundaarpinged omavahel faasis.

Et koormus töötavate trafode vahel jaguneks võrdeliselt nende nimivõimsustega, peavad trafode lühispinged olema võrdsed.

Esialgne trafode lülitamine paralleeltööle toimub analoogiliselt alalisvoolumasinate lülitamisega (§ 7-4). Kui trafod on

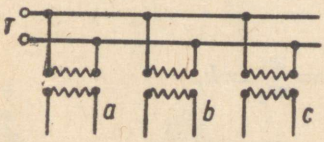
ühendatud primaarvõrguga *a* ning trafo nr. 1 on peale selle oma sekundaarpoolel ühendatud võrguga *b*, siis enne trafo nr. 2 ühendamist võrku *b* tuleb kontrollida pingeid. Selleks tuleb omavahel ühendada lüliti *L* vasakpoolsed kontaktid ning mõõta pinget U_0 parempoolsete kontaktide vahel. Juhul kui $U_0 = 0$, võib lüliti sisse lülitada, sest sel juhul on elektromotoorsed jõud sekundaarpoolel omavahel faasis ja suuruselt võrdsed.

8-8. Trafo pinge reguleerimine. Autotrafod

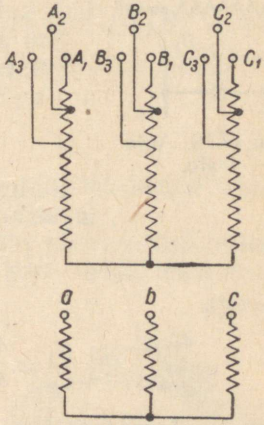
Mõnikord osutub vajalikuks konstantse primaarpinge puhul reguleerida väikestes piirides (± 5%) trafo sekundaarpinget. Niisugust pinge muutmist saavutatakse trafo ühe mähise keerdude arvu muutmisega.

Pinge reguleerimise vajadus (joon. 8-14), on tingitud sellest, et trafod (näiteks *a*, *b* ja *c*) on üles seatud erinevail kaugustel võrgu tsentraalsest toitepunktist *T*.

Sel juhul on liini lõpus töötavate trafode primaarpinge pingekaost tingituna madalam kui



Joon. 8-14. Elektrivõrgu eri punktidesse lülitatud trafod.



Joon. 8-15. Kolmefaasiline trafo väljavõtetega primaarmähiselt.

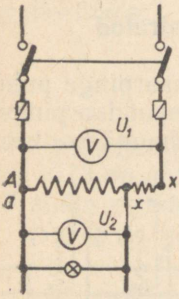
liini alguses töötavatel trafodel. Vastavalt sellele kujunevad ka nende trafode sekundaarpinged (võrdse ülekandeteguri puhul) erinevaiks.

Reguleerimise eesmärgil varustatakse trafo üks mähistest juba valmistamisel väljavõtetega teatud keerdude arvu järel, nagu nähtub jooniselt 8-15.

Kui trafol, mida toidetakse klemmide A_1, B_1, C_1 kaudu, osutub sekundaarpinge madalamaks kui on ette nähtud sildiandmetes, siis tuleb trafo lülitada võrku klemmide A_2, B_2, C_2 või

A_3, B_3, C_3 kaudu. Ümberlülitamise ajal peab trafo olema koormamata, s. t. sekundaarpool peab olema tarbijatest lahutatud. Ümberlülitamise tulemusena trafo ülekandetegur väheneb ning sekundaarpinge tõuseb. Niisugust ümberühendamist on võimalik teostada ka trafo paaki sisseehitatud spetsiaalse lülitusseadise abil.

Tuleb mainida, et väljavõtteid on mõningail juhtudel võimalik ümber lülitada pinge all. Niisuguseid trafosid nimetatakse pinge all reguleeritavateks trafodeks. Nende lülitusseadis on spetsiaalse konstruktsiooniga, mis võimaldab üleminekut ühelt kontaktilt teisele vooluahela katkestamiseta.



Joon. 8-16. Autotrafo.

Neil juhtudel, kui vajatakse trafot, mille ülekandetegur on lähedane ühele, on otstarbekas kasutada autotrafot, mis erineb tavalisest selle poolest, et temal on kahe mähise asemel üks, kahte ossa jaotatud mähis (joon. 8-16).

Kui autotrafo lülitada võrku (pingega U_1), indutseeritakse tema mähises, mille keerdude arv $w_1 = w_{AX}$, elektromotoorne jõud

$$E_1 = 4{,}44 f w_1 \Phi_m \approx U_1.$$

Selles mähise osas, mille keerdude arv $w_2 = w_{AX}$, on pinge

$$U_2 \approx E_2 = 4{,}44 f w_2 \Phi_m.$$

Seega

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{4{,}44 f w_1 \Phi_m}{4{,}44 f w_2 \Phi_m} = \frac{w_1}{w_2} = k,$$

millest sekundaarpinge

$$U_2 = U_1 \frac{w_2}{w_1} = U_1 \frac{1}{k}.$$

Valides mähise osa keerdude arvuga w_2, saame selle klemmidel pinge, mis moodustab vajaliku osa primaarpingest, või vastupidi, pingestades mähise osa keerdude arvuga w_2, saame kogu mähise (keerdude arvuga w_1) klemmidel vastavalt kõrgendatud pinge.

Autotrafosid kasutatakse vahelduvvoolumootorite käivitamiseks, elavhõbealaldajate toiteks, valgustugevuse reguleerimiseks (teatrites) ja laboratoorses praktikas. Laboratoorne autotrafo (ЛАТР) on spetsiaalse konstruktsiooniga, mis võimaldab sujuvalt reguleerida pinget nullist kuni U_1-ni.

8-9. Mõõtetrafod

Mõõtetrafosid kasutatakse vahelduvvoolu-mõõteriistade mõõtepiirkondade laiendamiseks.

Peale selle muudab mõõtetrafode kasutamine kõrgepingeseadmetes mõõteriistade teenindamise ohutuks, sest trafode abil on mõõteriistad kõrgepingejuhtmeist isoleeritud (eraldatud).

Pingetrafo (joon. 8-17) on ette nähtud pinge mõõtepiirkonna laiendamiseks. Ta sarnaneb ehituselt tavalise jõutrafoga. Trafo skeem on näidatud joonisel 8-18.

Suure keerdude arvuga (w_1) primaarmähis ühendatakse mõõdetavasse võrku. Väiksema keerdude arvuga (w_2) sekundaarmähisega, mis on arvestatud nimipingele 100 V, ühendatakse paralleelselt mõõteriistad: voltmeetrid, sagedusmõõtjad, vattmeetrite pingemähised jne.

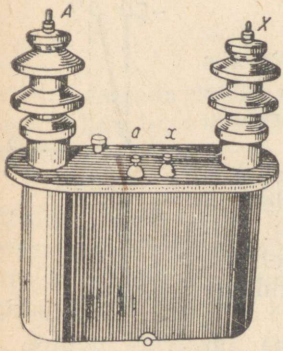
Pingetrafo ülekandetegur $k = \frac{U_1}{U_2}$ jääb praktiliselt muutumatuks, kui trafot ei koormata üle tema nimivõimsuse.

Siit järeldub, et

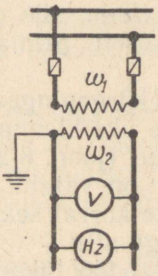
$$U_1 = kU_2, \tag{8-13}$$

s. t. mõõdetava primaarpinge väärtus avaldub mõõdetud sekundaarpinge ja trafo ülekandeteguri korrutisena.

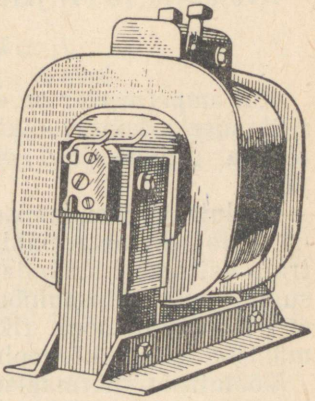
Seadme ohutu teenindamise tagamiseks peavad trafo sekundaarmähise üks ots, trafo südamik ja kest olema maandatud



Joon. 8-17. Pingetrafo.



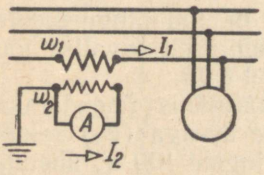
Joon. 8-18. Pingetrafo lülitusskeem.



Joon. 8-19. Voolutrafo.

(joon. 8-18). Vastasel korral omandavad primaarmähise isolatsiooni vigastuse puhul sekundaarmähis ja sellega ühendatud mõõteriistad maa suhtes kõrge potentsiaali, mis loomulikult on teenindavale personalile ohtlik.

Voolutrafot (joon. 8-19) kasutatakse voolu mõõtepiirkonna laiendamiseks. Voolutrafo väikse keerdude arvuga primaarmähis (joon. 8-20) ühendatakse järjestikku energiatarbijatega, mille voolu me tahame mõõta.



Joon. 8-20. Voolutrafo lülitusskeem.

Suurema keerdude arvuga sekundaarmähisega, mis on arvestatud voolule 5 A, ühendatakse omavahel järjestikku ühendatud ampermeetrid ning arvestite ja vattmeetrite voolumähised.

Voolude I_1 ja I_2 suhet, mis on ligikaudu võrdne sekundaarmähise keerdude arvu w_2 ja primaarmähise keerdude arvu w_1 suhtega, nimetatakse voolutrafo ülekandeteguriks:

$$k = \frac{I_1}{I_2} \approx \frac{w_2}{w_1}. \qquad (8\text{-}14)$$

See ülekandetegur on trafodel praktiliselt konstantne suurus, kui trafo sekundaarmähisega ühendatud mõõteriistade ja ühendusjuhtmete takistus ei ületa trafo nimitakistust.

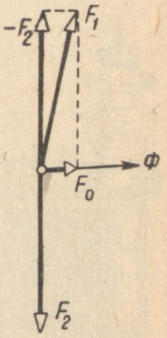
Avaldisest (8-14) järeldub, et

$$I_1 = kI_2.$$

Kui ampermeeter on ette nähtud pidevaks töötamiseks koos voolutrafoga, siis on tema skaala gradueeritud otseselt primaarvoolu järgi.

Voolutrafo ühendamisel kõrgepingeahelasse on trafo sekundaarmähise üks klemmidest ja trafo kaitsekest maandatud (joon. 8-20). Niisugune ettevaatusabinõu on vajalik selleks, et trafo isolatsiooni rikke korral sekundaarmähis ei satuks kõrgepinge alla.

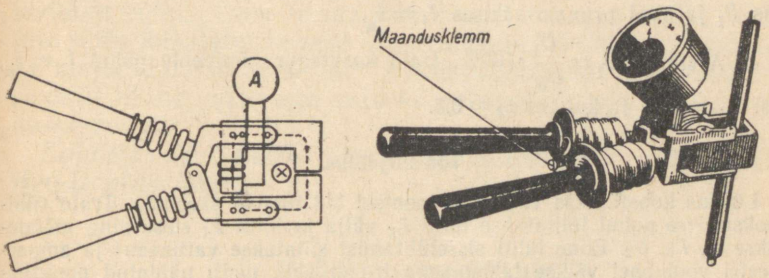
Voolutrafo normaalses tööolukorras on tema sekundaarmähis peaaegu lühistatud olukorras ning magnetvoo tema südamikus tekitab primaar- ja sekundaarmähise magneeti-



Joon. 8-21. Voolutrafo magneetimisergutuste vektordiagramm.

misergutuste vahe (joon. 8-21). Sekundaarahela katkemisel sekundaarvool ja sekundaarne magneetimisergutus kaob, mille tagajärjel magnetvoog ja väljatihedus trafo südamikus tunduvalt suurenevad ja trafo kuumeneb üle.

Suurenenud magnetvoog indutseerib sekundaarmähises ohtlikult suure elektromotoorse jõu. Mainitud põhjustel pole lubatud katkestada voolutrafo sekundaarahelat, kui primaarmähis on voolu all.



Joon. 8-22. Ampertangid.

Joonisel 8-22 on näidatud ampertangide ehitus. Ampertangid kujutavad endast voolutrafo eritüüpi, millel on vaid sekundaarmähis. See mähis on ühendatud ampermeetriga. Lahtikäiv südamik haarab juhet, milles kulgevat voolu tahetakse mõõta. Mõõdetava vooluga juhe etendab trafo primaarmähise osa.

8-10. Mitme mähisega trafod

Kui asetada ühele trafo südamikule mitu mähist, siis indutseeritakse igas mähises mähise keerdude arvuga võrdeline elektromotoorne jõud.

Tehnikas on leidnud laialdast kasutamist kolme mähisega trafod. Need trafod annavad võimaluse saada kahelt sekundaarmähiselt kaks erinevat pinget ja asendavad seega kahte trafot. Tavaliselt on need võimsad trafod (5000—40 000 kVA), pingega 121/38,5/11 kV.

Mitme mähisega trafosid kasutatakse näiteks ka raadiotehnikas, kus ühe primaarmähisega trafo toidab oma sekundaarmähiste kaudu anoodringe, raadiolampide kütteniite, alaldajat ja signaalseadiseid.

8-11. Laboratoorne töö. Ühefaasiline trafo

Tööplaan

1. Tutvuda trafoga ning üles märkida trafo ja mõõteriistade tehnilised põhiandmed.
2. Lülitada trafo tühijooksule ning mõõta primaar- ja sekundaarpinged U_1 ja U_2. Mõõta tühijooksuvõimsus P_0 ning tühijooksuvool I_0. Arvutada ülekandetegur, rauaskaod ja suhe $\frac{I_0}{I_n}$ 100%.
3. Teostada lühisekatse ja mõõta: lühispinge U_1, lühisel tarbitav võimsus P_1 ja vool primaarmähises $I_1 = I_n$.
4. Arvutada $u_1 = \frac{U_1}{U_n} \cdot 100\%$, trafo kasutegur nimivoolu puhul $I_1 = I_n$, kui $\cos \varphi_2 = 1$ ja kui $\cos \varphi_2 = 0{,}8$.

Töö kirjeldus

Lülitus koostatakse vastavalt joonisel 8-8 toodud skeemile. Trafo tühijooksukatse puhul lülitatakse lüliti L_2 välja ja lüliti L_1 sisse ning mõõdetakse I_0, P_0, U_2. Enne lüliti sisselülitamist sillatakse vattmeetri ja ampermeetri vooluahel väikse takistusega traadi abil, nagu näidatud punktiirjoonega joonisel 8-8. Pärast lüliti L_1 sisselülitamist lüliti L_3 avatakse. Katse juures on vajalik, et trafole antav pinge U_0 oleks võrdne trafo sildile märgitud nimipingega U_n.

Võimsuse P_0 mõõtmisel peab voltmeeter sekundaarahelas olema välja lülitatud. Saadud andmeil määratakse:

1) trafo ülekandetegur

$$k = \frac{U_1}{U_2};$$

2) rauaskaod

$$P_r = P_0;$$

3) $\frac{I_0}{I_{1n}} \cdot 100\%$, mis normaalselt on $(10 \div 25)\%$ I_0.

Lühisekatse puhul peavad sekundaarmähise klemmid ax olema lühistatud väikse takistusega traadi abil. Primaarmähisele rakendatakse selline (nimipingest madalam) pinge, et vool primaarmähises võrduks nimivooluga ($I_1 = I_n$). Seejärel mõõdetakse U_1, U_{1n} ja P_1 ning arvutatakse:

1) lühispinge

$$u_1 = \frac{U_1}{U_n} \cdot 100\%,$$

mis on tavaliselt $(3 \div 15\%)$ U_n;

2) vaseskaod nimivoolu puhul $P_v = P_1$;

3) kasutegur

$$\eta = \frac{S_n \cos \varphi_2}{S_n \cos \varphi_2 + P_r + P_v},$$

kui $\cos \varphi = 1$ ja kui $\cos \varphi = 0{,}8$.

Siin $S_n = U_{2n} I_{2n}$, kusjuures U_{2n} ja I_{2n} on toodud trafo sildil.

VAHELDUVVOOLUMASINAD

A. ASÜNKROONMOOTORID

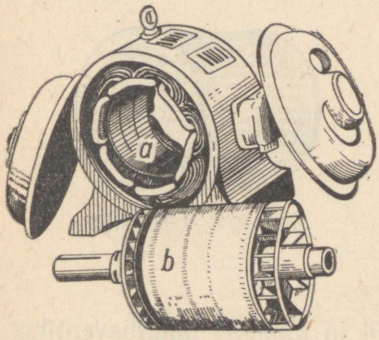
9-1. Üldmõisted

Asünkroonmootor on kaasaegsete elektrimootorite kõige levinum tüüp. Oma heade tehniliste ja majanduslike näitajate tõttu kasutatakse seda elektrimootorit laialdaselt tööstus- ja majapidamisseadmetes. Asünkroonmootor on konstruktsioonilt lihtne, odav ega vaja kõrge kvalifikatsiooniga teeninduspersonali.

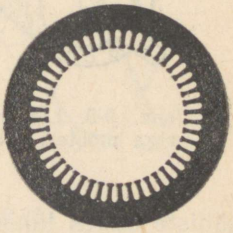
Kolmefaasilise asünkroonmootori leiutas 1889. a. M. O. Dolivo-Dobrovolski.

9-2. Asünkroonmootori ehitus

Asünkroonmootor koosneb kahest põhiosast: paigalseisvast osast — staatorist *a* ja pöörlevast osast — rootorist *b* (joon. 9-1). Elektrimootori rootor koostatakse üksikutest teraslehte-



Joon. 9-1. Lühisrootoriga asünkroonmootor.

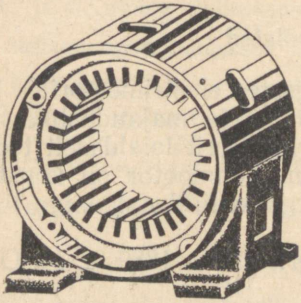


Joon. 9-2. Staatori teraslehт.

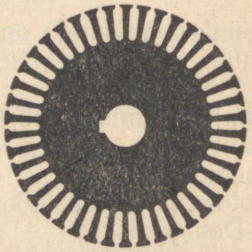
dest (joon. 9-2), mis isoleeritakse üksteisest ja moodustavad kokkupressitult joonisel 9-3 näidatud konstruktsiooni. Staatori sisepinnal on uurded, kuhu paigutatakse staatorimähis.

Mootori rootor koostatakse samuti teraslehtedest (joon. 9-4),

mis pressitakse kokku ja kinnitatakse võllile, nagu on kujutatud joonisel 9-5. Rootori uuretesse paigutatakse vaskvardad, millede otsad on üksteisega ühendatud vaskrõnga abil, nii et moodustub joonisel 9-6 näidatud konstruktsioon.

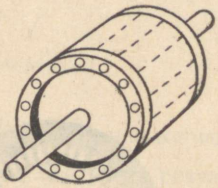


Joon. 9-3. Staator ilma mähiseta.

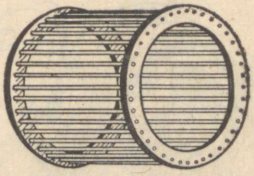


Joon. 9-4. Rootori terasleht.

Viimasel ajal valmistatakse kuni 100 kW võimsusega masinate rootorimähised selliselt, et uurded valatakse täis sula alumiiniumi (joon. 9-7). Üheaegselt valatakse ka rootori-



Joon. 9-5. Lühisrootoriga mootori rootor.



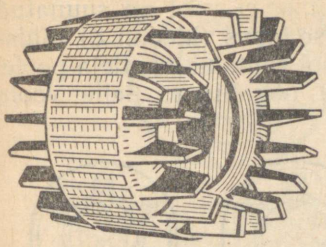
Joon. 9-6. Lühismähis.

mähiste otstes lühistavad rõngad ja mootori jahutusventilaatori labad. Sellise rootorimähisega asünkroonmootorit nimetatakse lühisrootoriga mootoriks.

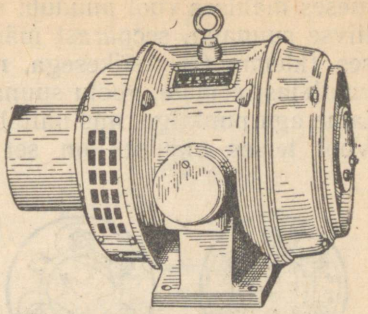
Ühe sellise mootori väliskuju on näidatud joonisel 9-8.

Kolmefaasilist mähist omava rootoriga mootoreid käsitletakse allpool.

Kolmefaasilise asünkroonmootori staatorimähis paikneb staatori uuretes ja lihtsaimal juhul koosneb kolmest poolist, mis on üksteise suhtes ruumis nihutatud 120 elektrilist kraadi.



Joon. 9-7. Alumiiniumist lühismähis.

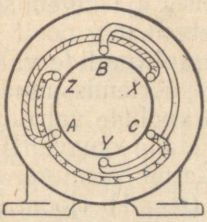


Joon. 9-8. Kolmefaasiline asünkroonmootor.

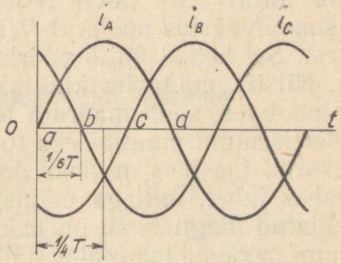
Need poolid ühendatakse tähte või kolmnurka ja lülitatakse kolmefaasilisse võrku. Staatorimähist läbiv kolmefaasiline vool tekitab mootori magnetahelas pöörleva magnetvoo.

9-3. Pöörlev magnetvoog

Käsitleme pöörleva magnetvoo tekkimist. Kolme paigalseisvat pooli, mis paiknevad staatori sisepinnal 120° nurga all üksteise suhtes (joon. 9-9), läbib kolmefaasiline vool.



Joon. 9-9. Kolmefaasiline staatorimähis kahe pooluspaariga.

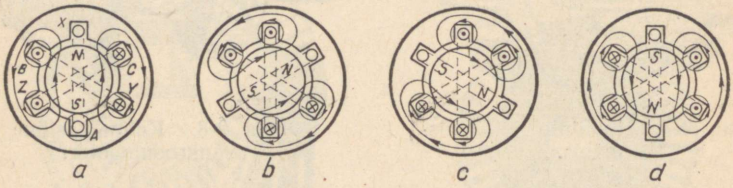


Joon. 9-10. Voolude graafik.

Voolude i_A, i_B ja i_C graafik on näidatud joonisel 9-10.

Loeme voolu positiivseks suunaks suuna pooli algusest lõppu ja kanname mitmesugustel ajahetkedel *a*, *b*, *c* ja *d* igas poolis kulgeva voolu suunad joonisele 9-11. Sellel joonisel on iga pool näidatud skemaatiliselt ühe keeruna. Hetkel *a* esi-

meses mähises vool puudub; vool kolmandas mähises on positiivse suunaga, seepärast märgime voolu suuna mähise alguses (klemm *C*) ristikesega, mis näitab, et vool on suunatud vaatlejast eemale; voolu suuna mähise lõpus (klemm *Z*) tähistame aga punktiga, mis näitab, et vool suundub vaatleja poole. Vool teises mähises on sel hetkel negatiivne. Selle voolu

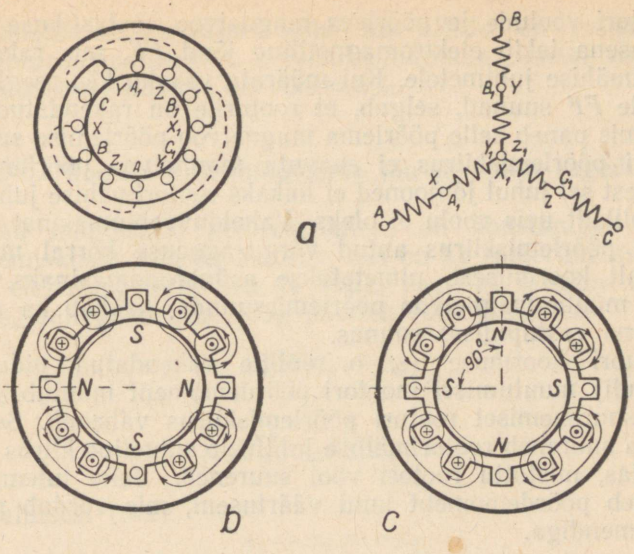


Joon. 9-11. Elektrimootori magnetvoog perioodi mitmesugustel hetkedel.

suuna märgime mähise alguses (klemm *B*) punktiga, lõpus aga (klemm *Y*) ristikesega. Kui joonestada magnetvälja jõujooned, mis haaravad ühesuunalisi voole ja võrrelda magnetvooge mitmesugustel hetkedel, siis näeme, et magnetvoog pöörleb antud juhul kellaosuti liikumise suunas, tehes poolperioodi vältel 180° pöörde ja perioodi vältel täispöörde.

Pöörleva magnetvoo uurimisel selgub, et kui vool mingis poolis saavutab maksimaalväärtuse, siis pöörleva magnetvoo suund ühtib selle pooli teljega. Nii näiteks saabub voolu maksimaalväärtus poolis *A* $^1/_4T$ möödumisel aja lugemise alghetkest. Sel hetkel ühtib pöörleva magnetvoo telg pooli *A* teljega. Niisiis, määrates kindlaks voolu amplituudide vaheldumise poolides, saab määrata magnetvoo pöörlemissuuna. Voo pöörlemissuuna muutmiseks tuleb muuta voolude vaheldumise järjekorda faasides, milleks on vaja vahetada omavahel kaks mistahes juhet, millega mähis on ühendatud võrguga. Ülalkirjeldatud magnetvool on kaks poolust ($p = 1$) (joon. 9-11). Kui aga moodustada mähis näiteks kuuest poolist, s. o. *2* korda rohkem kui varem, ja ühendada need nii, nagu on näidatud 9-12, *a*, siis nendest poolidest kolmefaasilise voolu läbilaskmisel saame kahekordse pooluste arvuga ($p = 2$) pöörleva magnetvoo, nagu on näidatud joonisel 9-12, *b*. Joonisele 9-12, *b* on kantud voolu suunad poolides hetkel *a*, joonisele 9-12, *c* aga hetkel *b*, s. t. $\frac{1}{2}T$ pärast.

Võrreldes jooniseid 9-12, *b* ja 9-12, *c*, selgub, et vahelduvvoolu poolperioodi vältel pöördus magnetvoog 90° võrra, s. t. magnetvoo pöörlemiskiirus väheneb kahekordselt. Järelikult



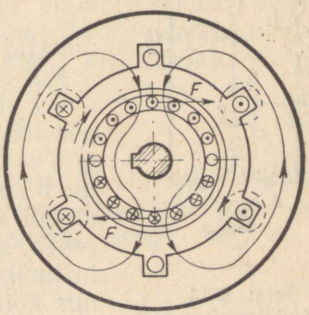
Joon. 9-12. Neljapooluselise mähise pöörlev magnetvoog.

üldjuhul avaldub magnetvoo pöörlemiskiirus (väljendatuna pöörete arvuga minutis — lüh. p/min) järgmiselt:

$$n_1 = \frac{60f}{p} \text{ p/min.} \qquad (9\text{-}1)$$

9-4. Asünkroonmootori tööpõhimõte

Magnetvoo pöörlemisel konstantse nurkkiirusega näiteks kellaosuti liikumise suunas indutseeritakse rootori juhtmetes elektromotoorsed jõud, sest neid lõikavad pöörleva magnetvälja jõujooned. Nende elektromotoorsete jõudude suunda saab määrata parema käe reegli abil. Elektromotoorse jõu mõjul tekib rootoris vool. Joonisel 9-13 on rootori ülemise poole juhtmetes voolud suunatud vaatleja poole, alumisel poolel vaatlejast eemale.



Joon. 9-13. Asünkroonmootori tööpõhimõte.

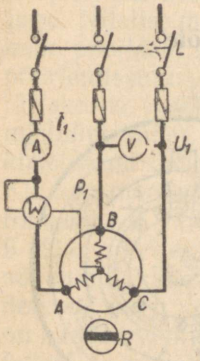
Rootori voolude ja pöörleva magnetvoo vastastikuse mõju tulemusena tekib elektromagnetiline jõud *FF*, mis rakendub rootorimähise juhtmetele. Kui määrata vasaku käe reegli abil jõudude *FF* suunad, selgub, et rootorile on rakendatud jõupaar, mis paneb selle pöörlema magnetvoo pöörlemise suunas. Rootori pöörlemiskiirus ei saavuta magnetvoo pöörlemiskiirust, sest sel juhul jõujooned ei lõikaks rootorimähise juhtmeid ja järelikult neis voolu ei oleks. Vahelduvvoolumasinat, mille rootori pöörlemiskiirus antud võrgusageduse korral muutub sõltuvalt koormusest, nimetatakse asünkroonmasinaks.

Kui muuta magnetvoo pöörlemissuunda, hakkab ka rootor pöörlema vastupidises suunas.

Mootori koormuse (s. o. võllile rakendatud pidurdusmomendi) muutumisel mootori pöördemoment muutub. Koormuse suurenemisel rootori pöörlemiskiirus väheneb. Seejuures aga suureneb rootorimähise juhtmete suhteline kiirus magnetväljas, mistõttu rootori vool suureneb. Selle tulemusena suureneb pöördemoment kuni väärtuseni, mis võrdub pidurdusmomendiga.

9-5. Rootori libistus

Joonisel 9-14 on kujutatud lühisrootoriga asünkroonmootori lülitusskeem. Lüliti *L* sulgemisel läbib staatorimähist vool I_1 ja tekitab pöörleva magnetvoo, mis pöörleb kiirusega n_1. Magnetvälja järel hakkab pöörlema rootor kiirusega n_2.



Joon. 9-14. Asünkroonmootori lülitusskeem.

Suhet

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad \text{ehk} \quad s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\% \tag{9-2}$$

nimetatakse libistuseks.

Kui rootor seisab paigal, siis $n_2 = 0$ ja $s = 1$ ehk 100%. Kui oletada, et rootor pöörleb magnetvälja kiirusega, siis $n_2 = n_1$ ja $s = 0$. Seega teoreetiliselt muutub libistus 0 kuni 1 ehk 0 kuni 100%. Pidurdusmomendi suurenemisel rootori libistus suureneb, sest ainult sel juhul suureneb rootorimähises elektromotoorne jõud ja vool, mis koos magnetväljaga tekitab pöördemomendi.

Mootorit iseloomustavaks suuruseks on

nimilibistus s_n, mis esineb juhul, kui võllile on rakendatud nimipidurdusmoment (s. t. mootori nimikoormusel). Normaalsete mootorite libistus on 1 kuni 6%.

9-6. Rootori elektromotoorse jõu ja voolu sagedus

Kuna magnetvoo pöörlemiskiirus on konstantne, rootori pöörlemiskiirus aga on muutuv, siis on ka rootorimähises esineva elektromotoorse jõu ja voolu sagedus muutuv suurus. Kiirus, millega magnetvoog pöörleb rootori suhtes,

$$n_v = n_1 - n_2.$$

Siis

$$f_2 = \frac{pn_v}{60} = \frac{p(n_1 - n_2)}{60}.$$

Avaldisest (9-2)

$$n_1 - n_2 = n_1 s,$$

järelikult

$$f_2 = \frac{pn_1}{60} s = f_1 s. \qquad (9\text{-}3)$$

Niisiis, mida aeglasemalt rootor pöörleb, seda suurem on sagedus f_2. Teoreetiliselt muutub sagedus piirides $f_2 = f_1$ (kui $s = 1$) kuni $f_2 = 0$ (kui $s = 0$).

9-7. Staatori- ja rootorimähistes indutseeritavad elektromotoorsed jõud

Pöörlev magnetvoog indutseerib staatorimähises elektromotoorse jõu, samuti nagu transformaatori pulseeriv magnetvoog indutseerib tema primaarmähises elektromotoorse jõu. Järelikult

$$E_1 = 4{,}44 f_1 w_1 \Phi_m k_1. \qquad (9\text{-}4)$$

Kui rootor seisab mingil põhjusel paigal, siis indutseeritakse sama magnetvoo poolt rootorimähises elektromotoorne jõud nagu transformaatori sekundaarmähises. Seega

$$E_2 = 4{,}44 f_1 w_2 \Phi_m k_2, \qquad (9\text{-}5)$$

kus k_1 ja k_2 on tegurid, mis sõltuvad mähiste konstruktsioonist ja mis transformaatori puhul võrdusid ühega.

Rootori pöörlemisel indutseeritakse tema mähises elektromotoorne jõud

$$E_{2s} = 4{,}44 f_2 w_2 \Phi_m k_2. \tag{9-6}$$

Suhe

$$\frac{E_{2s}}{E_2} = \frac{f_2}{f_1} = \frac{f_1 s}{f_1} = s,$$

millest

$$E_{2s} = E_2 s. \tag{9-7}$$

Järelikult võrdub pöörleva rootori elektromotoorne jõud seisva rootori elektromotoorse jõu ja libistuse korrutisega. Mida kiiremini rootor pöörleb, seda väiksem elektromotoorne jõud tema mähises indutseeritakse. Kui $s = 1$, siis $E_{2s} = E_2$, kui $s = 0$, siis $E_{2s} = 0$.

9-8. Rootoriahela takistus

Rootorimähise aktiivtakistus r_2 jääb sageduse f_2 muutumisel praktiliselt muutumatuks, kuid reaktiivtakistus muutub tundu-valt. Olgu x_2 paigalseisva rootori reaktiivtakistus ja x_{2s} pöörleva rootori reaktiivtakistus.

Siis

$$x_2 = 2\pi f_1 L_2$$

ja

$$x_{2s} = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi f_1 s L_2.$$

Siit

$$\frac{x_{2s}}{x_2} = \frac{f_1 s}{f_1} = s$$

ehk

$$x_{2s} = x_2 s. \tag{9-8}$$

Kui $s = 1$, siis reaktiivtakistus $x_{2s} = x_2$, s. t. on maksimaalne; kui $s = 0$, siis ka x_{2s} võrdub nulliga. Järelikult, mida lähedasemad on rootori ja magnetvoo pöörlemiskiirused, seda väiksem on rootorimähise reaktiivtakistus.

9-9. Rootori vool

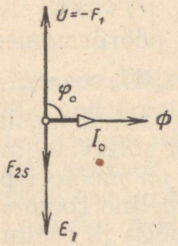
Rootorimähist läbiv vool arvutatakse valemiga:

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + r_{2s}^2}}. \tag{9-9}$$

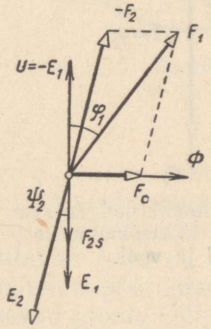
Mootori käivitamise alghetkel on vool (käivitusvool) I_{2k} maksimaalne, sest $E_{2s} = E_2$. See vool jääb elektromotoorsest jõust E_2 maha nurga ψ_2 võrra, mille väärtus on ligi 90°, sest käivitamise alghetkel on $x_{2s} = x_2$ 8—10 korda r_2-st suurem. Kui rootor hakkab pöörlema, siis pöörlemiskiiruse suurenemisel E_{2s} ja I_2 vähenevad. x_{2s} vähenemise tõttu väheneb ka voolu ja elektromotoorse jõu vaheline nurk.

9-10. Asünkroonmootori tööprotsess

Kui rootor pöörleb koormuseta, siis võib rootorimähise magneetimisergutuse jätta arvestamata ja mootori vektordiagramm (joon. 9-15) on analoogiline transformaatori vektor-



Joon. 9-15. Asünkroonmootori tühijooksu vektordiagramm.



Joon. 9-16. Koormatud asünkroonmootori magnetomotoorsete jõudude vektordiagramm.

diagrammiga tühijooksu režiimis. Sel juhul nurk $\varphi_0 \approx 90°$ ($\cos \varphi_0 \approx 0{,}1$). Siiski on mootori tühijooksuvool I_0 magnetahela suure magnetilise takistuse tõttu võrdlemisi suur ja moodustab $(0{,}2 \div 0{,}5) I_{1n}$. Sel põhjusel ei tohi lasta mootorit ekspluatatsioonis töötada väikse koormusega või tühijooksus.

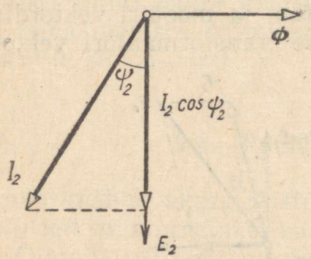
Mootori koormamisel rootori vool I_2 ja magneetimisergutus F_2 suurenevad. Kuid mõlema mähise magneetimisergutuse poolt tekitatav magnetvoog mootori magnetjuhis on võrdeline mootori klemmidele rakendatud pingega ja praktiliselt ei muutu. Seepärast peab mootori koormamisel suurenema staatorivool I_1 ja magneetimisergutus F_1, et summa

$$\overline{F}_1 + \overline{F}_2 = \overline{F}_0,$$

s. t. resulteeriv magneetimisergutus peab nagu transformaatori puhulgi jääma konstantseks ja võrdseks magneetimisergutusega tühijooksul. Magneetimisergutuste vektordiagramm on kujutatud joonisel 9-16.

9-11. Pöördemoment

Nagu igasuguse elektrimasina puhul, nii tekib ka asünkroonmasina pöördemoment rootori voolu I_2 ja masina magnetvoo Φ vastastikuse toime tõttu.



Joon. 9-17. Asünkroongeneraatori rootori elektromotoorne jõud ja vool.

Rootori vool jääb elektromotoorsest jõust E_2 maha nurga ψ võrra (joon. 9-17), mootori pöördemoment aga, olles võrdeline aktiivvõimsusega, sõltub voolu aktiivkomponendist

$$I_2 \cos \psi_2.$$

Järelikult pöördemoment

$$M = c_m \Phi I_2 \cos \psi_2, \qquad (9\text{-}10)$$

kus c_m — antud masina parameetritest sõltuv tegur.

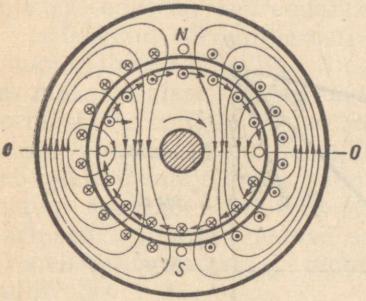
Niisiis on mootori pöördemoment võrdeline rootori vooluga, magnetvooga ja rootori elektromotoorse jõu ning voolu vahelise nihkenurga koosinusega. Kuna mootori libistuse muutumisel mähise induktiivtakistus ja $\cos \psi_2$ muutuvad, siis muutub ka pöördemoment.

Joonised 9-18 ja 9-19 selgitavad $\cos \psi_2$ mõju pöördemomendile. Nendel joonistel on kujutatud ühe pooluspaariga asünkroonmootori staatori ja rootori lõige.

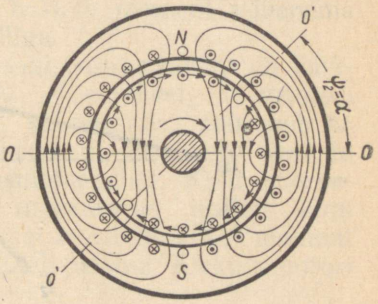
Kellaosuti liikumise suunas pöörlev magnetvoog on kujutatud jõujoontega. Parema käe reegli põhjal on kerge kindlaks määrata, et kõigis rootori juhtmetes, mis asetsevad ülalpool neutraaljoont OO, on indutseeritud elektromotoorne jõud E_2 ja rootori väikse induktiivtakistuse tõttu ka vool I_2 suunatud vaatleja poole. Kõigis juhtmetes, mis paiknevad allpool neutraaljoont, on elektromotoorne jõud ja vool suunatud vaatlejast eemale. Vasaku käe reegli põhjal saab määrata juhtmetele rakendatud elektromagnetiliste jõudude suuna ja veenduda, et faasinihke puudumisel I_2 ja E_2 vahel kõigile juhtmetele mõjuvad jõud tekitavad ühesuunalise pöördemomendi (joon. 9-18).

Joonis 9-19 illustreerib teist juhtu, mispuhul asünkroon-

mootori rootorimähis omab aktiivtakistust ja induktiivsust, mille tõttu vool I_2 jääb faasis elektromotoorsest jõust E_2 maha. Faasinihke tõttu I_1 ja I_2 vahel asetsevad vaatleja poole suunatud vooluga juhtmed ülalpool joont $O'O'$, mis on nihutatud



Joon. 9-18. Pöördemoment, kui $\cos\psi_2 = 1$.



Joon. 9-19. Pöördemoment, kui $\cos\psi_2 < 1$.

neutraaljoonest $O'O'$ nurga $\alpha = \psi_2$ võrra, kuna aga allpool joont $O'O'$ paiknevates juhtmetes on voolu suund vastupidine. Samal joonisel on näidatud juhtmetele mõjuvate jõudude suunad. Nagu jooniselt nähtub, tekitavad I_2 ja E_2 vahelise faasinihke korral osa juhtmeid ühesuunalise pöördemomendi, samal ajal kui osa juhtmeid, mis paiknevad joonte OO ja $O'O'$ vahel, tekitavad vastassuunalise pöördemomendi, mistõttu summaarne pöördemoment väheneb, võrreldes momendiga $\psi_2 = 0$ puhul.

Järelikult, mida suurem on nurk ψ_2 ja mida väiksem on $\cos\psi_2$, seda väiksem on pöördemoment.

Kuna konstantse võrgupinge korral on üldine magnetvoog konstantne, siis, lähtudes avaldisest (9-10), võib kirjutada, et

$$M \equiv I_2 \cos\psi_2 = I_{2a}, \qquad (9\text{-}11)$$

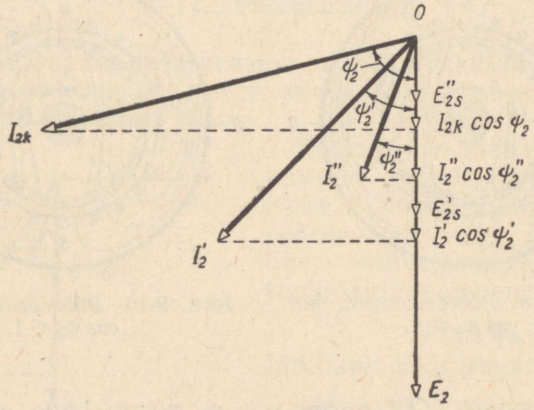
s. t. pöördemoment on võrdeline rootori voolu aktiivkomponendiga.

9-12. Pöördemomendi sõltuvus libistusest

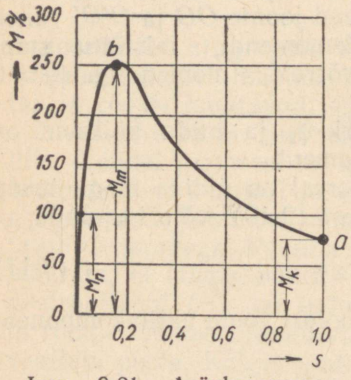
Pöördemomendi sõltuvus libistusest, s. t. $M = f(s)$, on analoogiline sõltuvusega $I_2 \cos\psi_2 = f(s)$.

Andes ette libistused $s = 1$; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2; 0,1; 0,005, arvutatakse valemiga (9-9) vool I_2 (E_2, r_2 ja x_2 on valitud

suurused) ja seejärel nurk ψ_2 ning konstrueeritakse joonisel 9-20 näidatud diagramm. Kui libistus $s = 1$ (mootori käivitamine), siis on elektromotoorne jõud ja reaktiivtakistus x_2 väiksed. Rootori vool I_{2k} on maksimaalne ja selle voolu ning elektromotoorse jõu vaheline nurk on samuti maksimaalne. Moo-



Joon. 9-20. Vektordiagramm asünkroonmootori rootoriahela kohta.



Joon. 9-21. Asünkroonmootori pöördemomendi sõltuvus libistusest.

tori pöörlemiskiiruse suurenemisel E_{2s} ja vool I_2 vähenevad, väheneb ka nurk ψ_2, sest x_{2s} väheneb, r_2 aga jääb konstantseks. Joonisel 9-20 on konstruktsioon teostatud libistuse s kolme väärtuse kohta.

Kui projekteerida vool I_2 elektromotoorse jõu suunale, siis selgub, et $I_2 \cos \psi_2 = I_{2a}$ algul suureneb, seejärel aga hakkab vähenema. Kõver $I_{2a} = f(s)$, mis teises mastaabis väljendab ka sõltuvust $M = f(s)$ on näidatud joonisel 9-21. Libistuse $s = 1$ korral määrab momendi punkti a ordinaat. Seda momenti nimetatakse käivitusmomendiks M_k. Selle momendi ja nimimomendi M_n suhe (M_k/M_n) on kaasaegsetel mootoritel 0,8—1,5.

Libistuse vähenemisel moment suureneb, sest suureneb voolu I_{2a} aktiivkomponent. Nagu arvutused näitavad, esineb momendi maksimaalväärtus M_m sellise libistuse s_m korral, mil reaktiivtakistus x_{2s} võrdub aktiivtakistusega. Suhe M_m/M_n, mida nimetatakse ülekoormatavuseks, on tavaliselt 1,6—2,5. Libistuse edasisel suurendamisel hakkab moment vähenema ja $s = 0$ puhul võrdub samuti nulliga.

Mootor töötab stabiilselt ainult seni, kuni moment on väiksem maksimaalsest momendist M_n. Tõepoolest, kui mootori koormust (s. o. pidurdusmomenti) suurendada, suureneb ka rootori libistus; seejuures pöördemoment suureneb, sest ta peab alati olema võrdne pidurdusmomendiga. Kuid pöördemoment suureneb ainult libistuse muutumisel nullist kuni väärtuseni s_m, sest libistuse edasisel suurendamisel moment väheneb (piirkond *ab*) ja mootor jääb seisma. Elektrimootori nimilibistus

$$s_n = 1 \div 6\%.$$

Üksikasjalisema analüüsi abil saab tõestada, et asünkroonmootori pöördemoment on võrdeline staatori klemmidele rakendatud pinge ruuduga:

$$M \equiv U_1^2. \qquad (9\text{-}12)$$

Seda asjaolu tuleb alati arvestada ja silmas pidada, et võrgupinge väikseimgi kõikumine muudab järsult pöördemomenti.

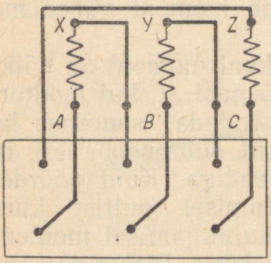
9-13. Lühisrootoriga mootorite käivitamine

Mootori lülitusskeem oli näidatud joonisel 9-14. Kolmefaasilise mootori staatorimähised ühendatakse tähte või kolmnurka. Mähiste klemmidega varustatud otsad on välja toodud mootori staatorile kinnitatud klemmilauale. Joonisel 9-22 on näidatud mähiste klemmide paigutus, joonistel 9-23 ja 9-24 aga klemmide ühendamine täht- ja kolmnurkühenduse saamiseks.

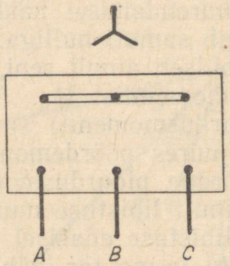
Asünkroonmootori iga faasi mähised on arvutatud teatud kindlale nimi-faasipingele.

Kui mootori toitevõrgu liinipinge võrdub mootori nimi-faasipingega, siis ühendatakse selle mähised kolmnurka. Kui aga võrgu liinipinge on $\sqrt{3}$ korda mootori nimifaasipingest kõrgem, siis ühendatakse mähised tähte. Kui näiteks võrgupinge $U = 380$ V ja mootori nimi-faasipinge on 220 V, siis tuleb mootori mähised ühendada tingimata tähte. Niisiis on igal mootoril kaks nimipinget, mis erinevad teineteisest $\sqrt{3}$ korda.

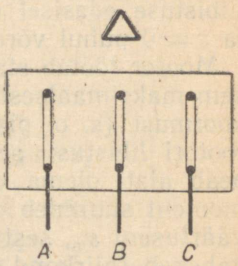
Väikse võimsusega mootorid (kuni 10—20 kW) käivitatakse lihtsalt võrgulüliti sisselülitamisega (joon. 9-14). Sellisel viisil võrku lülitamise võimalikkuse määrab võrgu installeeritud võimsus ja seda tuleb eelnevalt kontrollida.



Joon. 9-22. Staatorimähise klemmide paigutus.



Joon. 9-23. Staatorimähise klemmide ühendamine tähtühenduse saamiseks.



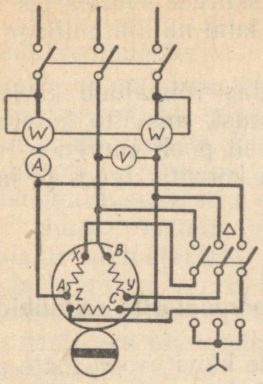
Joon. 9-24. Staatorimähise klemmide ühendamine kolmnurkühenduse saamiseks.

Käivitamise alghetkel indutseeritakse rootoris võrdlemisi suur elektromotoorne jõud, sest magnetvoo pöörlemiskiirus paigalseisva rootori suhtes on suur. Seepärast on ka rootori vool sel hetkel 5—8 korda suurem nimiväärtusest. Staatori vool suureneb samuti väärtuseni $I_k = (4—7) I_n$.

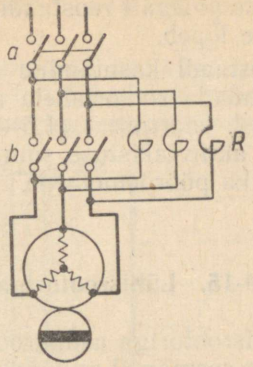
Kuigi mootori kaunis suur käivitusvool ei kujuta otsest ohtu mootorile, sest ta väheneb kiiresti ega jõua soojendada masinat lubamatu temperatuurini, osutub ta siiski ebasoovitavaks, sest põhjustab käivitamise hetkel võrgupinge langemist, mis häirib teiste võrku lülitatud tarbijate normaalset töötamist.

Lühisrootoriga mootori käivitusvoolu vähendamiseks alandatakse käivitamise perioodil mootori mähistele rakendatavat pinget. Seejuures väheneb mootori käivitusmoment võrdeliselt pinge ruuduga. Kui võrgupinge on selline, et mootor peab normaalselt töötama kolmnurkühenduses, siis võib pinget käivitamise ajal alandada sel teel, et staatorimähised lülitatakse kolmnurga asemel tähte (joon. 9-25). Käivitamisel ühendatakse mootori mähised algul tähte, seejärel aga, kui mootor saavutab teatava kiiruse, lülitatakse mähised ümber kolmnurga. Sellise käivitusmeetodi puhul väheneb staatori faasimähistele rakendatud pinge $\sqrt{3}$ korda, millega saavutatakse käivitusvoolu kolmekordne vähenemine.

Kui mootor on ette nähtud töötamiseks tähtühenduses, siis saab mootori klemmidele rakendatud pinget käivitamisel alan-



Joon. 9-25. Asünkroonmootori käivitamine staatorimähiste ühendamisega tähest kolmnurka.

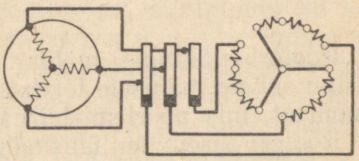


Joon. 9-26. Mootori käivitamine reaktori abil.

dada reaktori abil, nagu on näidatud joonisel 9-26. Reaktor kujutab endast suure induktiivsusega pooli. Käivitamisel suletakse algul lüliti *a* ja pärast teatud kiiruse saavutamist lüliti *b*. Seejuures väheneb käivitusmoment võrdeliselt mootori klemmidel esineva pinge ruuduga. Selle käivitusviisi puuduseks on seadme suur maksumus.

9-14. Faasirootoriga asünkroonmootori käivitamine

Sellise mootori rootorimähis on sarnane staatorimähisega. Rootori faasimähiste lõpud ühendatakse kokku, nii et moodustub nullpunkt, mähiste algused aga ühendatakse kolme vaskrõngaga, mis on kinnitatud mootori võllile (joon. 9-27) ja on üksteisest ning võllist isoleeritud. Rõngastel libisevad harjad, millede kaudu järjestikku rootorimähisega ühendatakse käivitusreostaadi takistid.



Joon. 9-27. Käivitusreostaadiga asünkroonmootori ühendusskeem.

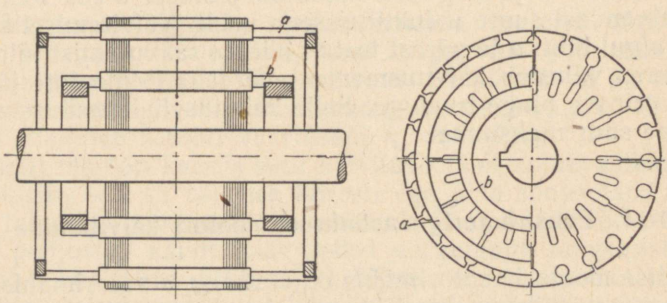
Mootori käivitamine toimub järgmiselt. Avatud rootoriahela puhul lülitatakse kolmepooluselise lülitiga staatorimähis võrku. Seejärel lülitatakse rootoriahelasse reostaat ja rootor

hakkab pöörlema. Mootori pöörlemiskiiruse suurenedes vähendatakse pidevalt reostaadi takistust kuni nullini, millega käivitamine lõpeb.

Reostaadi kasutamine rootoriahelas võimaldab ühelt poolt suurendada rootoriahela aktiivtakistust, mistõttu käivitusvool väheneb väärtuseni $(1{,}5—2)I_n$. Teiselt poolt suureneb rootoriahela aktiivtakistuse suurendamisel korrutis $I_2 \cos \psi_2$ ja järelikult ka pöördemoment.

9-15. Lühisrootoriga asünkroonmootorite eritüübid

Lühisrootoriga asünkroonmootorite käivitusomaduste parandamise eesmärgil on loodud rida asünkroonmootorite eritüüpe, mis arendavad suurt käivitusmomenti väikse käivitusvoolu juures. Sellistest masinatest tuleb eelkõige nimetada Dolivo-Dobrovolski mootorit, mille rootoril on kaks lühismähist (joon. 9-28). Selle mootori staator ei erine milleski hariliku asünkroonmootori staatorist.



Joon. 9-28. Dolivo-Dobrovolski kahe lühismähisega mootori rootor.

Rootori välimine mähis (a) on suure aktiivtakistusega. Tänu sellele mähisele tekitatakse käivituse algul suur pöördemoment, mis pöörlemiskiiruse suurenedes väheneb.

Rootori sisemine lühismähis (*b*) omab tähtsusetut aktiivtakistust ja suurt reaktiivtakistust. Seepärast on selle mähise poolt tekitatav pöördemoment käivitamise algul väike, kuid suureneb mootori pöörlemiskiiruse suurenemisel maksimaalväärtuseni ja seejärel väheneb nagu tavalise asünkroonmootori puhulgi (joon. 9-21).

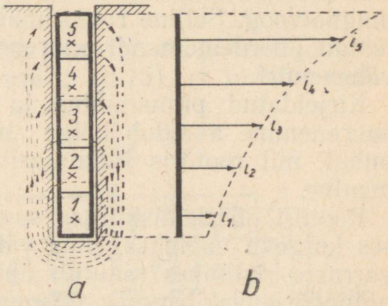
Kahe lühismähisega asünkroonmootori resulteeriv moment

(mõlema rootorimähise poolt tekitatavate momentide summa) on püsivam (ühtlasem) ning suurema väärtusega kui tavalistel asünkroonmootoritel.

Laialdase leviku osaliseks on saanud ka nn. sügavuuretega asünkroonmootorid, mis on omadustelt lähedased kahe lühismähisega mootoritele. Kuid sügavuuretega mootorite tootmine on lihtsam ja odavam ning mähiste valmistamiseks ei ole vaja suure eritakistusega spetsiaalseid materjale.

Seda tüüpi mootorites rakendatakse käivitusomaduste parandamiseks pinnanähtust, mis seisab järgmises.

Oletame, et rootorimähise varrasteks on kitsad ja kõrged latid, mis paiknevad vastavakujulistes uuretes (joon. 9-29). Kui sellist elektrijuhti läbib vool, siis tekib tema ümber magnetväli, mille jõujooned on näidatud joonisel 9-29. Välja jõujoonte selline jagunemine on tingitud sellest, et elektrijuht on kolmest küljest piiratud terasega, ülalt aga õhuga.



Joon. 9-29. Sügav uure ja voolu jagunemise kõver uurdes asuvates juhtmetes.

Rootorimähise latti võib kujutleda koosnevana reast üksteise kohal asuvaist paralleeljuhtmeist. Joonisel 9-29 on latt jaotatud viieks juhtmeks. Juhtmega *1*, mis paikneb uurde põhjas, aheldub kõige suurem magnetvoog (joonisel 9-29, *a* aheldub ta viie jõujoonega).

Kõige alumise juhtme kohal asetsev juhe aheldub juba väiksema magnetvooga ja kõige peal paiknev juhe aheldub kõige väiksema magnetvooga — ühe jõujoonega.

Kui rootorimähises kulgeb vahelduvvool, siis muutuvad ka üksikute juhtmetega ahelduvad magnetvood ja neis indutseeritakse erineva suurusega endainduktsiooni elektromotoorne jõud e_e — välimistes juhtmetes väiksem ja sisemistes suurem.

Kuna pöörlev magnetväli indutseerib igas rootorimähise juhtmes elektromotoorse jõu e, siis vool üksikus juhtmes

$$i = \frac{e - e_e}{r}$$

on erinev, olles kõige suurem välimistes ja kõige väiksem sisemistes juhtmetes (joon. 9-29, *b*).

Niisiis, endainduktsiooni elektromotoorse jõu erinevate väärtuste tõttu surutakse vool elektrijuhi välimisse ossa, milles seisabki pinnanähtuse olemus. Selle tulemusena kulgeb peaaegu kogu vool lati välimises osas, mis kutsub esile ühelt poolt mähise aktiivtakistuse suurenemise, teiselt poolt aga tema reaktiivtakistuse vähenemise, sest magnetahela takistuse suurenemise tõttu väheneb rootorimähise juhtmetega ahelduv magnetvoog. Selline rootorimähise takistuste muutumine põhjustab pöördemomendi suurenemist ja mootori käivitusvoolu vähenemist.

Kirjeldatud pinnanähtus ja järelikult ka pöördemomendi suurenemine avaldub kõige tugevamini paigalseisva rootori puhul, mil rootoris indutseeritava voolu sagedus on maksimaalne.

Rootori pöörlemiskiiruse suurenemisel hakkab rootorimähises kulgeva voolu sagedus vähenema, mistõttu voolutihedus varraste ristlõikes muutub ühtlasemaks. Kui mootor töötab nimipöörlemiskiirusega, mispuhul libistus on 3—5%, siis rootori voolu sagedus on väike ($f_2 = f_1 s = 50 \cdot 0{,}05 = 2{,}5$ Hz) ja voolu surumist pinnale ei esine — vool jaotub ühtlaselt kogu varda ristlõike ulatuses, s. t. rootorimähise aktiivtakistus on minimaalne.

Järelikult toimub sügavuuretega mootori käivitamine analoogiliselt faasirootoriga asünkroonmootori käivitamisele käivitusreostaadi abil.

9-16. Asünkroonmootori pöörlemiskiiruse reguleerimine

Faasirootoriga mootori pöörlemiskiirust on võimalik reguleerida reostaadiga (joon. 9-27). Seda saab seletada järgmiselt. Pöörleva magnetvälja elektromagnetiline võimsus

$$P_{em} = M\omega_1$$

ja võimsus võllil

$$P_2 = M\omega_2,$$

kus ω_1 — magnetvälja pöörlemise nurkkiirus;
ω_2 — rootori pöörlemise nurkkiirus.

Võimsuste vahe

$$P_{em} - P_2 = 3I_2^2 r_2$$

läheb soojuskadudeks kolmefaasilises rootoris.

Suhe

$$\frac{P_{em} - P_2}{P_{em}} = \frac{M\omega_1 - M\omega_2}{M\omega_1} = s, \qquad (9\text{-}13)$$

millest

$$P_{em}\, s = P_{em} - P_2 = 3I_2^2 r_2, \qquad (9\text{-}14)$$

järelikult

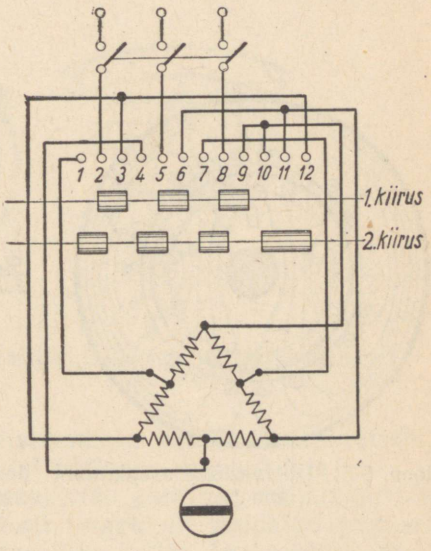
$$s = \frac{3I_2^2 r_2}{P_{em}} = \frac{3I_2^2 r_2}{M\omega_1}. \qquad (9\text{-}15)$$

Kui eeldada, et pidurdusmoment ja seega ka pöördemoment on muutumatu, siis selgub võrrandist (9-15), et libistus suureneb ja kiirus n_2 väheneb võrdeliselt rootoriahelasse lülitatud takistusega. Kuid samast selgub ka, et see kiiruse reguleerimise meetod ei ole ökonoomne, sest pöörlemiskiiruse vähendamiseks näiteks 10% võrra tuleb suurendada energiakadusid 10% võrra.

Asünkroonmootori pöörlemiskiirust saab muuta pooluspaaride arvu muutmisega. Tõepoolest, staatori magnetvälja pöörlemiskiirus

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}.$$

Kui suurendada mootori pooluste arvu kaks korda, siis magnetvälja ja seega ka rootori pöörlemiskiirus väheneb samuti kaks korda.



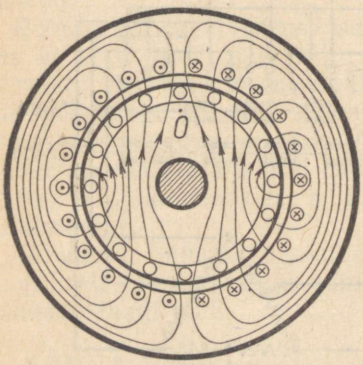
Joon. 9-30. Mootori pöörlemiskiiruse reguleerimine pooluspaaride arvu muutmise teel (staatorimähise ümberlülitamise teel).

Selle reguleerimisviisi puhul peab staatori iga faasimähis koosnema kahest ühesugusest osast, et neid saaks ühendada järjestikku ja paralleelselt (joon. 9-30). Mähiste järjestikku-ühenduse korral on staatorimähise pooluspaaride arv kaks korda suurem, rootori pöörlemiskiirus aga kaks korda väiksem kui paralleelühenduse korral. Selliste mootorite rootoril on alati lühismähis.

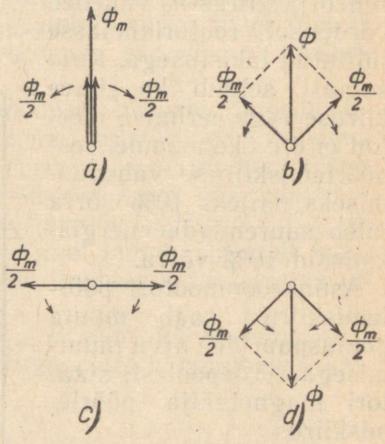
9-17. Ühefaasiline asünkroonmootor

Joonisel 9-31 on toodud ühefaasilise asünkroonmootori ehituse skeem. Selline mootor koosneb lehtterasest koostatud staatorist, mille uuretes asetseb staatorimähis, ja lühisrootorist.

Staatorimähist läbiv ühefaasiline vool tekitab pulseeriva magnetvoo, mille jõujooned on kantud joonisele 9-31. Selle voo telg on ruumis liikumatu.



Joon. 9-31. Ühefaasiline asünkroonmootor.

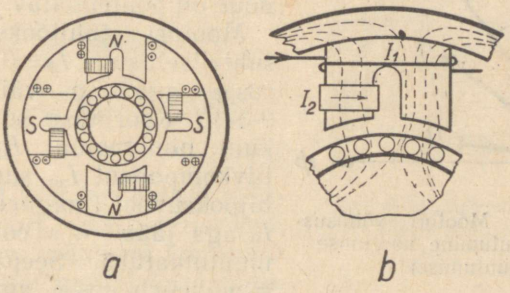


Joon. 9-32. Vektordiagrammid, mis näitavad pulseeriva voo jagunemist kaheks pöörlevaks vooks.

Pulseeriva magnetvoo võib saada kahe voo liitmisel, mis pöörlevad erinevates suundades ühesuguse nurkkiirusega ja suuruselt võrduvad pulseeriva voo poole amplituudiga. See selgub jooniselt 9-32, *a*, kus ajahetkel t_0 kaks ühesuunalist voogu $\Phi_m/2$ liitmisel annavad voo Φ_m. $^1/_8$ perioodi pärast (joon. 9-32, *b*) moodustavad mõlemad vood, olles pöördunud vastassuundades nurga $\alpha = 45°$ võrra, jälle voo Φ, mille suund on sama mis hetkel t_0, kuid amplituud on juba väiksem. Jooniste 9-32, *a*, *b*, *c* ja *d* võrdlemisel ilmneb, et igal ajahetkel moodustavad kaks pöörlevat voogu ruumis liikumatu pulseeriva magnetvoo.

Paigalseisva rootori puhul tekitavad erinevates suundades pöörlevad magnetväljad pöördemomendid, mis on samuti vastassuunalised ja seetõttu mootori käivitusmoment on null.

Kui aga rootor mingil viisil pöörlema panna, siis üks neist kahest voost, mis pöörleb rootoriga ühes suunas, tekitab pöördemomendi, mis mõjub rootorile selle pöörlemissuunas nagu see toimub kolmefaasilises mootoriski. Samal ajal teine voog, mis pöörleb vastassuunas kahekordse kiirusega rootori suhtes, ei tekita peaaegu mingit pöördemomenti, sest selle voo poolt rootoris indutseeritav elektromotoorne jõud ja vool omavad peaaegu kahekordset võrgusagedust. Sellise sageduse puhul on rootori reaktiivtakistus suur ja pöördemomendi suurust määrav voolu aktiivkomponent $I_{2vastu} \cos \psi_2$ on väga väike.



Joon. 9-33. Ühefaasiline lõhestatud poolustega asünkroonmootor.

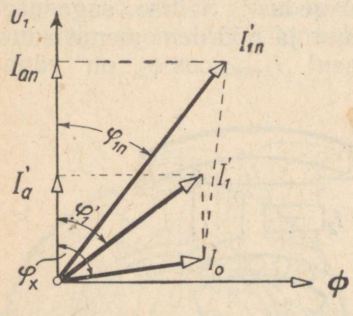
Ühefaasiliste mootorite käivitamiseks kasutatakse seadiseid, mis tekitavad käivitamise ajal pöörleva magnetvälja.

Väga väikse võimsuse korral võib kasutada väljaulatuvate lõhestatud poolustega staatorit, nagu on näidatud joonisel 9-33. Poolustel paikneb ühefaasiline mähis. Iga pooluse ühele poolele on asetatud vaskrõngas, mis etendab transformaatori sekundaarmähise osa. Rõngas tekkiv vool tekitab pooluse magneetimisergutusele vastassuunalise magneetimisergutuse F_2, mille tulemusena magnetvood pooluse kummaski pooles ei ole enam faasis. Moodustub pöörlev magnetväli, mis paneb lühisrootori pöörlema.

Ühefaasilisi asünkroonmootoreid valmistatakse väiksevõimsuselistena ja kasutatakse suhteliselt harva, sest kasutegur ja $\cos \varphi$ on väiksed, maksumus aga on suurem kui samasuguse võimsusega kolmefaasilistel mootoritel.

9-18. Asünkroonmootoreid toitva võrgu võimsusteguri parandamise viise

Igas elektriseadmes tuleb alati püüda selle poole, et $\cos\varphi$ oleks võimalikult lähedane ühele. Asünkroonmootorite kasutamisel võib parandada võimsustegurit mitmesugusel viisil.



Joon. 9-34. Mootori võimsusteguri muutumine koormuse muutumisel.

1. Mootorite võimsuse õige valik. Mootor tuleb valida sellise arvestusega, et ta suurema osa ajast töötaks nimivõimsusele lähedase koormusega. See nõue on põhjendatav järgmiselt.

Mootori tühijooksuvool on suhteliselt suur, $I_0 = (0{,}2 \div 0{,}5) I_n$, $\cos\varphi$ aga on väike (joon. 9-34). Koormuse suurenemisel kuni nimivooluni I_{1n} voolu aktiivkomponent I_{an} suureneb, tühijooksuvool (magneetimisvool) I_0 aga jääb $U = \text{const}$ puhul muutumatuks. Seepärast nurk φ_1 väheneb, $\cos\varphi_1$ aga suureneb kuni 0,8—0,9.

Alakoormuse korral aktiivvool I_a väheneb, järelikult $\cos\varphi$ halveneb (joon. 9-34).

2. Kui mootori koormus ei ole üle 40% nimivõimsusest ja staatorimähis on ühendatud kolmnurka, siis on otstarbekas ühendada see tähte. Pinge faasimähisel väheneb sel juhul $\sqrt{3}$ korda; magneetimisvool väheneb peaaegu 3 korda, $\cos\varphi$ aga paraneb.

3. Võimsustegurit saab parandada staatiliste kondensaatoritega (vt. § 4-14).

4. Suure võimsusega mootorite võimsustegurit saab parandada pöörlevate faasikompensaatorite abil, millest on juttu allpool.

9-19. Asünkroonmootori kaod ja kasutegur

Asünkroonmootoris esinevad järgmised kaod.

1. Vaseskaod staatori ja rootori mähistes

$$P_v = P_{v1} + P_{v2} = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2.$$

2. Rauaskaod P_r, mis tekivad peamiselt mootori staatoris pöörleva magnetvoo tõttu.

3. Hõõrdekaod P_h.

Mootori poolt võrgust tarbitav võimsus

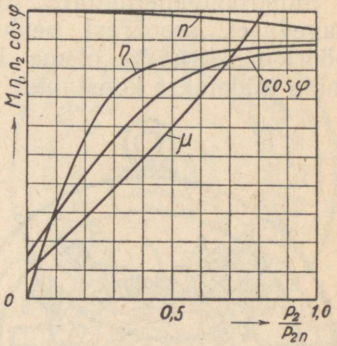
$$P_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi_1. \qquad (9\text{-}16)$$

Mehaaniline võimsus võllil

$$P_2 = P_1 - (P_v + P_r + P_h). \qquad (9\text{-}17)$$

Mootori kasutegur on kasuliku võimsuse P_2 ja tarbitud võimsuse P_1 suhe:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% = \frac{P - (P_v + P_r + P_h)}{P_1} \cdot 100\%. \qquad (9\text{-}18)$$



Joon. 9-35. Asünkroonmootori töökarakteristikud.

Joonisel 9-35 on antud asünkroonmootori karakteristikud, millest on näha, et koormuse suurenemisel nullist kuni nimiväärtuseni kasutegur kasvab algul kiiresti, seejärel aeglasemalt ja saavutab oma maksimaalväärtuse umbes 75%-lisel koormusel. Koormuse suurenemisel üle nimiväärtuse kasutegur vaseskadude suurenemise tõttu veidi väheneb.

B. SÜNKROONMASINAD

9-20. Üldmõisted

Sünkroonmasinaid kasutatakse kõige sagedamini generaatoritena. Peaaegu kõik vahelduvvoolugeneraatorid on sünkroonmasinad. Sünkroonmootoreid kasutatakse tunduvalt harvem kui asünkroonmootoreid ja harilikult ainult siis, kui nad antud võimsuse ja tööreŽiimi puhul osutuvad ökonoomsemateks. Võimsaid sünkroonmootoreid kasutatakse õhupuhurite käitamiseks ja samuti faasikompensaatoritena.

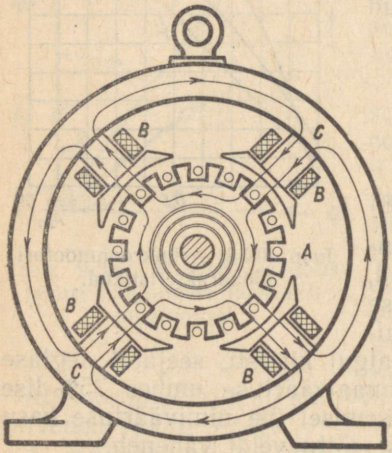
9-21. Sünkroonmasina tööpõhimõte ja põhiosad

Masinat nimetatakse sünkroonseks seepärast, et tema rootor pöörleb ankrumähise voolu poolt tekitatava pöörleva magnetvooga ühesuguse kiirusega, s. t. sünkroonselt. Sünkroon-

masinas on pöörlemiskiirus n ja sagedus omavahel seotud tuntud valemiga:

$$f = \frac{pn}{60}.$$

Sünkroongeneraatorid töötavad tavaliselt teatud kindlal sagedusel, seepärast peab neid käitava primaarjõumasina pöörlemiskiirus n olema konstantne; sünkroonmootor aga, mida toidetakse konstantse sagedusega võrgust, pöörleb konstantse kiirusega n. Vahelduvvoolu saamise põhimõtet käsitleti juba § 4-2.



Joon. 9-36. Pöörleva ankruga sünkroongeneraatori ehitus.

Elektrijaamades kasutatavaid generaatoreid kirjeldatakse allpool.

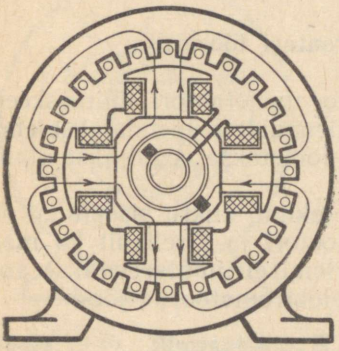
Joonisel 9-36 on skemaatiliselt näidatud ühe kolmefaasilise sünkroongeneraatori ehitus. Generaator koosneb ikkest C nelja poolussüdamikuga, millel asetseb ergutusmähis B. Pooluste vahel paikneb generaatori ankur A, mis koosneb teraslehtedest koostatud silindrist ja on kinnitatud generaatori võllile. Ankru uuretesse on paigutatud mähis, mis sarnaneb faasirootoriga asünkroonmootori rootorimähisega. Ankru üksikute faaside mähised on üksteise suhtes nihutatud $^2/_3$ poolusejaotuse võrra. Ankrumähis ühendatakse tähte või kolmnurka. Mähiste algused ühendatakse generaatori võllile kinnitatud isoleeritud rõngaste külge. Rõngastel libisevate harjade abil ühendatakse generaatori ankrumähis välisahelaga.

Ergutusmähist läbiv alalisvool tekitab magnetvälja. Pooluskingade erilise kuju tõttu jaguneb väljatihedus ankru pinnal enam-vähem siinuseliselt.

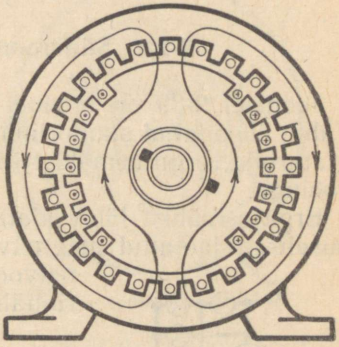
Ankru pöörlemisel indutseeritakse tema mähistes siinuseliselt muutuvad elektromotoorsed jõud, mis on üksteisest faasis nihutatud $^1/_3$ perioodi (120°) võrra.

Kirjeldatud generaatoritüüpi paigalseisva induktori (pooluste) ja pöörleva ankruga kasutatakse väikse võimsuse ja madala pingega rändelektrijaamades. Põhiline osa kolmefaasi-

listest sünkroongeneraatoritest aga ehitatakse paigalseisva ankru ja pöörleva induktoriga (joon. 9-37), sest paigalseisvat ankrumähist on kergem isoleerida ja samuti on lihtsam juhtida välisvõrku suurt võimsust, mis ulatub kuni 150 000 kW-ni (pingel kuni 15 kV).



Joon. 9-37. Üksikpoolustega sünkroongeneraatori ehitus.



Joon. 9-38. Jaotatud poolustega sünkroongeneraatori ehitus.

Paigalseisva ankruga sünkroongeneraatorid jaotatakse kahte rühma: 1) üksikpoolustega generaatorid, tavaliselt aeglasekäigulised; neid käitatakse hüdroturbiinide või sisepõlemismootoritega; 2) jaotatud poolustega generaatorid, tavaliselt kiirekäigulised (1500—3000 p/min); käitatakse auruturbiinidega, mistõttu neid nimetatakse turbogeneraatoriteks.

Joonisel 9-37 on skemaatiliselt kujutatud üksikpoolustega kolmefaasilise generaatori ehitus. Staatori sisepinnas olevates uuretes asetseb ankrumähis. Ergutusmähis paikneb neljal rootorile kinnitatud poolussüdamikul. Selle mähise otsad on kinnitatud kahe isoleeritud rõnga külge.

Joonisel 9-38 on näidatud kahe jaotatud poolusega kolmefaasilise sünkroongeneraatori ehituse skeem. See generaator erineb üksikpoolustega generaatorist ainult rootori ehituse poolest.

Rootor koosneb terassilindrist ja selle uuretes asetsevast poolikujulisest ergutusmähisest (joon. 9-38). Selle mähise otsad on nagu eelmisel juhulgi ühendatud rõngastega. Kahe viimase konstruktsiooni puhul juhitakse vool ergutusmähisesse rõngastel libisevate harjade kaudu. Kõigis normaalse konstruktsiooniga generaatorites toidetakse ergutusmähist erguta-

jast — alalisvoolugeneraatorist, mille ankur on kinnitatud sünkroongeneraatori võllile.

Viimasel ajal on hakatud väikse võimsuse ja madalama pingega sünkroongeneraatorite ergutusmähist toitma generaatori enda ankrust saadava vooluga, mis alaldatakse pooljuhtalaldajatega.

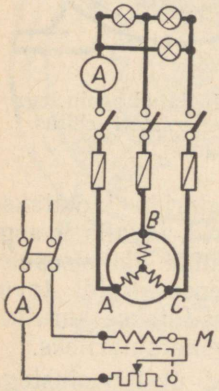
9-22. Sünkroongeneraatori tööreŽiim

Joonisel 9-39 on toodud sünkroongeneraatori lülitusskeem. Tähte ühendatud staatorimähise klemmidele ühendatakse energiatarbija, ergutusmähist M aga toidetakse ergutajast alalisvooluga.

Ergutusmähist läbiv alalisvool tekitab ankru sisepinnal siinuseliselt jaotatud magnetvoo. Rootori ja järelikult ka magnetvoo pöörlemisel indutseeritakse ankrumähises elektromotoorne jõud

$$E = 4{,}44kfw\Phi, \qquad (9\text{-}19)$$

kus k — mähisetegur.



Joon. 9-39. Sünkroongeneraatori ühendusskeem.

Masina koormamisel tekitab ankrus kulgev vool oma magnetvoo — ankru voo (joon. 9-40). See voog vähendab või suurendab ergutusmähise poolt tekitatud magnetvoogu. Seda nähtust nimetatakse ankrureaktsiooniks.

Käsitleme ankrureaktsiooni mõju kolmel juhul: generaatori aktiivse, induktiivse ja mahtuvusliku koormuse korral.

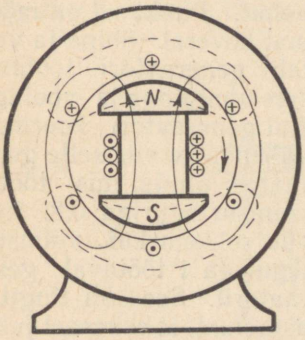
Joonisel 9-40, mis illustreerib esimest juhtu, on näidatud lõikes kahe poolusega generaatori staator ja rootor.

Vaadeldaval ajahetkel on ankrumähise elektromotoorse jõu suund selline, nagu on näidatud joonisel 9-40. Samasuunaline on ka ankru vool. Sel juhul sulguvad ankru magnetvoo jõujooned põiki läbi pooluste, mistõttu seda voogu nimetatakse põikvooks.

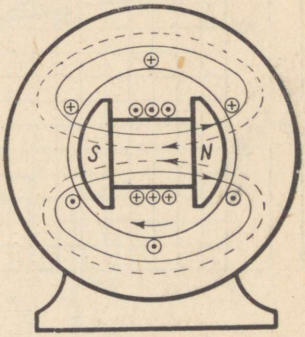
Magnetvoog generaatori õhupilus jääb peaaegu muutumatuks, kuid muudab veidi oma suunda selle tõttu, et ankru voog vähendab pooluste voogu pooluskinga pealejooksva serva all ja suurendab mahajooksva serva all (vt. § 7-7).

Induktiivse koormuse korral jääb ankru vool elektromotoorsest jõust maha $\frac{1}{4}$ perioodi ehk 90° võrra. Järelikult saavutab

vool ankru juhtmetes oma maksimaalväärtuse ¼ perioodi võrra hiljem kui elektromotoorne jõud. Kuid selle aja jooksul, kui vool saavutab maksimaalväärtuse, pöördub rootor ¼ pöörde võrra ja saavutab joonisel 9-41 näidatud asendi. Toodud joo-



Joon. 9-40. Sünkroongeneraatori ankrureaktsioon aktiivvoolu korral.



Joon. 9-41. Sünkroongeneraatori ankrureaktsioon, kui vool on pingest veerand perioodi taga.

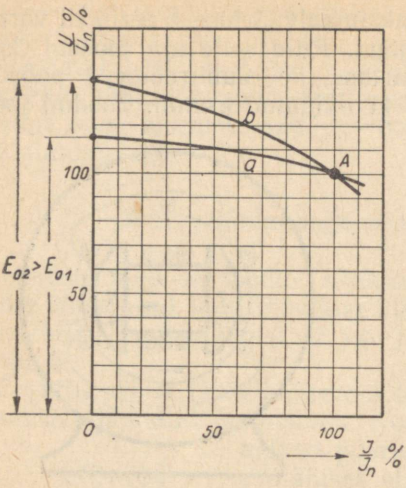
niselt on näha, et ankru voo jõujooned (joonisel on ankru voo jõujooned näidatud punktiirjoonega) sulguvad pikuti läbi ankru ja on pooluste magnetvoole vastassuunalised (pooluste voo jõujooned on joonisel kujutatud täisjoonega).

Niisiis toimib ankru magneetimisergutus sel juhul lahtimagneetivalt, mille tulemusena resulteeriv voog õhupilus väheneb. Järelikult väheneb ka selle voo poolt generaatori ankrus indutseeritav elektromotoorne jõud.

Mahtuvuslikul koormusel tekitab ankru magneetimisergutus voo, mis on ergutusvooga samasuunaline ja generaatori elektromotoorne jõud suureneb.

Sünkroongeneraatorite tühijooksu- ja väliskarakteristik võetakse üles samuti kui võõrergutusega alalisvoolugeneraatori puhul ja need on ka samasuguse kujuga. Erinevus seisab ainult selles, et sünkroongeneraatoril on suhteline pingemuutus suurem kui alalisvoolugeneraatoril. See on tingitud ankru induktiivtakistuses esinevast pingelangust ja ankrureaktsiooni suuremast lahtimagneetivast mõjust. Sünkroongeneraatori suhteline pingemuutus

$$\Delta U\% = \frac{E_0 - U_n}{U_n} \cdot 100\% \approx (25 \div 40)\%.$$



Joon. 9-42. Sünkroongeneraatori väliskarakteristikud.

Joonisel 9-42 on kujutatud kaks generaatori väliskarakteristikut: kõver *a* on saadud $\cos\varphi = 1$ puhul ja kõver *b* — $\cos\varphi = 0{,}8$ puhul. Punkt *A* on mõlemal kõveral ühine ja vastab generaatori töötamisele nimipinge ja -vooluga. Kui generaatori koormust vähendada, siis selle generaatori pinge, mis töötab võimsusteguriga 0,8, kasvab rohkem kui võimsusteguriga 1 töötaval generaatoril. See on tingitud asjaolust, et esimesel juhul on generaatori ergutusvool ankru nimivoolu puhul suurem.

9-23. Sünkroongeneraatorite lülitamine paralleeltööle

Elektrijaamades on alati kaks või rohkem generaatorit. Väikse koormuse ajal töötab üks generaator; koormuse tõusmisel suurendatakse koos töötavate ehk, nagu öeldakse, paralleelselt töötavate generaatorite arvu vastavalt koormusele.

Käsitleme kolmefaasilise sünkroongeneraatori paralleeltööle lülitamise protsessi. Joonisel 9-43 on näidatud skeem kahe generaatoriga, milledest esimene (nr. 1) töötab, teine aga (nr. 2) ei ole veel lülitatud esimesega paralleeltööle.

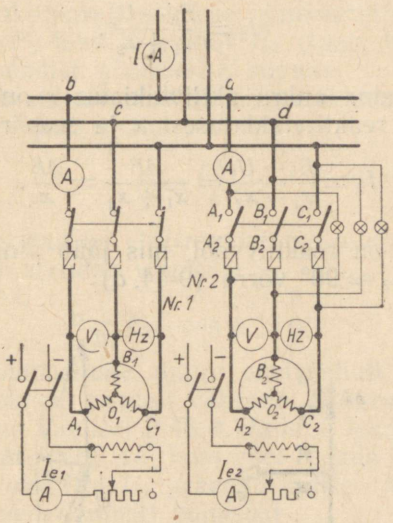
Kolmefaasilise generaatori lülitamiseks paralleeltööle peavad olema täidetud järgmised tingimused: generaatorite pinged U_1 ja U_2 peavad olema võrdsed ja paralleeltööle lülitamise hetkel faasis; sagedused f_1 ja f_2 peavad olema võrdsed; generaatorite faasijärjestus peab olema ühesugune.

Nendest tingimustest kas või ühegi täitmata jätmine paralleeltööle lülitamisel toob endaga kaasa tugeva voolu tekkimise generaatorite vahel, mis on ohtlik nii generaatoritele kui ka nende vahele lülitatud aparatuurile.

Masinate viimist loetletud tingimustele vastavasse seisundisse nimetatakse masina sünkroniseerimiseks.

Generaatori sünkroniseerimine ja sellele järgnev lülitamine paralleeltööle toimub järgmiselt. Juurdelülitatav generaator

nr. 2 pannakse primaarjõumasina poolt pöörlema nimikiirusega. Reguleeritakse generaatori ergutusvoolu I_{e2} selliselt, et generaatori klemmipinge U_2 muutuks võrdseks elektrijaama lattide pingega U_1. Primaarjõumasina kiiruseregulaatori abil muudetakse tema pöörlemiskiirust selliselt, et generaatorite sagedused oleksid ühesuurused ($f_1 = f_2$).



Joon. 9-43. Sünkroongeneraatori paralleeltöö skeem.

Jälgitakse paralleelselt lülitiga ühendatud lampide põlemist. Nendele lampidele rakendub generaatorite vastavate faaside pingete vahe, sest esimene lamp on ühendatud esimese generaatori mähise A_1 algusega ja teise generaatori mähise A_2 algusega. Samuti on teine lamp ühendatud generaatorite mähiste B_1 ja B_2 algustega ja kolmas lamp — mähiste C_1 ja C_2 algustega.

Niikaua kui sagedused f_1 ja f_2 teineteisest erinevad, lambid kord süttivad, kord kustuvad, sest pingevektorite pöörlemiskiirused ei ole ühesugused. Generaatori nr. 2 lüliti võib sulgeda sel hetkel, kui kõik kolm lampi kustuvad, sest siis on pinged U_1 ja U_2 võrdsed ja faasis.

9-24. Sünkroongeneraatorite paralleeltöö

Pärast generaatori nr. 2 sisselülitamist (joon. 9-43), mispuhul $E_2 = U_1$, on generaatori nr. 2 vool võrdne nulliga.

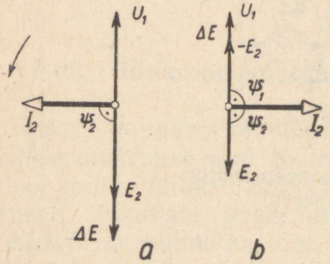
Kui suurendada generaatori nr. 2 ergutusvoolu I_{e2}, siis E_2 suureneb ΔE võrra ja masina ankrut läbib tasandusvool I_2:

$$I_2 = \frac{E_2 - U_1}{z_1 + z_2}. \qquad (9\text{-}20)$$

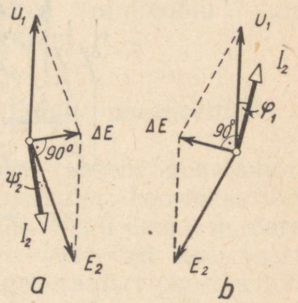
Sünkroonmasina ankru aktiivtakistus r on tavaliselt palju kordi väiksem reaktiivtakistusest x ja seepärast

$$I_2 = \frac{E_2 - U_1}{x_1 + x_2} = \frac{\Delta E}{x_1 + x_2} = \frac{\Delta E}{x}. \qquad (9\text{-}21)$$

Järelikult I_2 on reaktiivvool, mis jääb pingetest ΔE ja E_2 maha nurga $\psi_2 \approx 90°$ võrra (9-44, *a*).



Joon. 9-44. Sünkroongeneraatori reaktiivvoolu vektordiagrammid.



Joon. 9-45. Sünkroongeneraatorite aktiivvoolu vektordiagrammid.

Kui aga ergutusvoolu I_{e2} vähendada, siis E_2 väheneb ja pinge U_1 muutub pingest E_2 suuruse ΔE võrra suuremaks (joon. 9-44, *b*). Sel juhul tekib jälle vool I_2, mis jääb pingest ΔE nurga ψ_1 võrra maha ja ruttab pingest E_2 nurga $\psi_2 \approx 90°$ võrra ette. Teise generaatori poolt arendatav võimsus

$$P_2 = E_2 I_2 \cos \psi_2 \qquad (9\text{-}22)$$

on mõlemal juhul null.

Järelikult ergutusvoolu muutmisega ei saa paralleelselt töötavat generaatorit koormata.

Generaatori nr. 2 sisselülitamise hetkel oli primaarjõumasin nii välja reguleeritud, et tema pöördemoment M_p oli küllaldane rootori käitamiseks tühijooksu olukorras. Kui pärast generaatori sisselülitamist suurendada primaarjõumasinale antavat energiat, reguleerides vee, auru jne. etteandmist, siis pöördemoment M_p suureneb ja rootor omandab teatud nihke pöörlemise suunas esimese generaatori rootori suhtes ja seejärel pöörleb jälle sünkroonselt esimese generaatoriga. Selle tulemusena muutub E_2 faas ja vektor E_2 (joon. 9-45, *a*) osutub nihutatuks algasendist pöörlemise suunas.

Sel juhul tekib ankrute vooluahelas elektromotoorsete jõudude vahe, mis tekitab voolu

$$I_2 = \frac{\Delta E}{x}.$$

Kuid nüüd see vool on elektromotoorse jõuga peaaegu faasis ja generaator arendab võimsust

$$P = E_2 I_2 \cos \psi > 0. \qquad (9\text{-}23)$$

Kui primaarjõumasinale antav energiahulk väheneb, siis rootori pöörlemiskiirus samuti väheneb. Diagramm selle juhu kohta on näidatud joonisel 9-45, *b*. Ankrus tekib jälle elektromotoorsete jõudude vahe ΔE, kuid vool I_2, mis jääb sellest 90° võrra maha, on pingega U_1 peaaegu faasis. Masin saab sel juhul esimeselt generaatorilt võimsust

$$P = U_1 I_2 \cos \varphi_1 \qquad (9\text{-}24)$$

ja töötab mootorina.

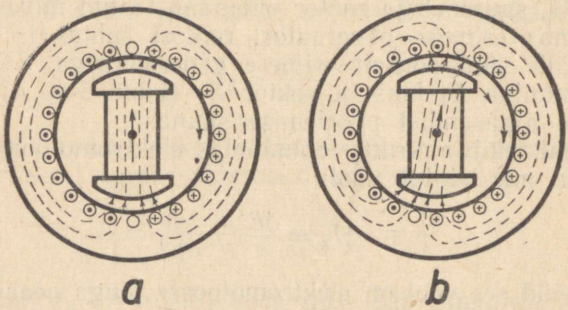
Niisiis primaarjõumasina pöördemomendi suurendamisel töötab masin generaatorirežiimis, pöördemomendi vähendamisel aga võib ta üle minna mootorirežiimi.

Praegusaegset sünkroonmootorit ei käivitata mitte kirjeldatud viisil, vaid asünkroonmootorina.

Sünkroonmasinate võimet töötada sõltuvalt ergutusest kas mahajääva või etteruttava vooluga (joon. 9-44) kasutatakse võimsusteguri parandamiseks. Selleks kasutatakse peamiselt sünkroonmootorit, mille üleergutamine sunnib teda töötama etteruttava vooluga, alaergutamine aga mahajääva vooluga. Selline mootor töötab tavaliselt tühijooksus ja nimetatakse sünkroonkompensaatoriks.

Väikse võimsuse korral ei ole ergutaja ja ergutusmähisega sünkroonmootori kasutamine otstarbekas. Sel juhul kasutatakse reaktiiv-sünkroonmootoreid, millel ei ole ergutusmähist ega ergutajat. Selliste mootorite võimsus on mõnikümmend

või -sada vatti. Mootori käivitamine võib toimuda käsitsi. Niisuguseid mootoreid kasutatakse ulatuslikult helikinos, telemehaanikas ja mujal, kus vajatakse täiesti konstantset pöörlemiskiirust.



Joon. 9-46. Reaktiiv-sünkroonmootori tööpõhimõte.

Mootori tööpõhimõte on järgmine. Joonisel 9-46 on näidatud sünkroonmootori staator *S*, mille mähis tekitab pöörleva magnetvoo. Selle voo jõujooned ahelduvad mähiseta rootoriga *R*. Voo pöördumisel teatava nurga võrra, nagu on näidatud joonisel 9-46, hakkab rootorile mõjuma pöörlemapanev jõud magnetvoo pöörlemissuunas. Voo pöörlemisel pöörleb rootor sellega sünkroonse kiirusega.

9-25. Elektrimasinate hooldamine

Normaalsetes tingimustes töötava elektrimasina hooldamine seisab selles, et masin tuleb hoida puhas ja kontaktosad korras.

Masina töötamisel tuleb jälgida selle üksikute osade soojenemist ja mitte lasta neid soojeneda üle ettenähtud normide.

Masin puhastatakse mustusest puhta kuiva lapiga, tolmust aga käsilõõtsa abil; viimane peab olema ilma metallotsikuta.

Kõige rohkem vajab hooldamist elektrimasina kommutaator. Õigesti töötav kommutaator ei tohi sädeleda. Ta peab olema rangelt silindriline (ei tohi «visata»). Lamellidevaheline isolatsioon ei tohi olla kõrgemal kommutaatori pinnast, mis peab olema täiesti sile, poleeritud ja ilma igasuguste kriimustuste ja põlemisjälgedeta.

Kommutaatorit puhastatakse enne masina käivitamist kuiva

või bensiiniga niisutatud puhta linase lapiga. Kui kommutaatori pinnal on näha kriimustusi, konarusi, mustunud või põlenud kohti ja kui vilgukivi ulatub veidi kommutaatori pinnast kõrgemale, tuleb kommutaatorit lihvida. Lihvida tuleb peene liivapaberiga, mitte mingil juhul aga smirgelpaberiga, sest smirglitolm juhib elektrit. Liivapaber kinnitatakse puitliistule, mille nõgus osa peab täpselt ühtima kommutaatori kõverusega. Liivapaberiga liist surutakse vastu kommutaatorit ja ankrut hakatakse pöörama. Kommutaatorit tuleb lihvida seni, kuni tema pind muutub täiesti puhtaks ja siledaks.

Kommutaatori pinna ühtlane tumenemine ja pruunikaks muutumine ei halvenda mootori töötamist ja sel juhul ei ole vaja kommutaatorit lihvida. Kommutaator töötab normaalselt tema pinna pruunika ja isegi pruunikassinise varjundi puhul.

Kommutaatori ületreimist tuleb teostada ainult tegeliku vajaduse korral. Kommutaatori lamelle üksteisest eraldav mikaniitisolatsioon kulub aeglasemalt kui lamellide vask, mille tagajärjel mikaniit hakkab aja jooksul kommutaatori pinnast välja ulatuma, põhjustades sädelemist. Sel juhul saetakse või freesitakse isolatsioon lamellide vahelt 0,5 kuni 1 mm sügavuselt välja. Seda tehakse kas käsitsi spetsiaalse käsisaega või elektrimootoriga käitatava spetsiaalse väikse freesi abil. Pärast seda lihvitakse kommutaator ülalkirjeldatud viisil.

Vahelduvvoolumasina rõngad vajavad vähem hooldamist kui kommutaator. Normaalsel töötamisel kontaktrõngad ei tohi «visata», nende pinnal ei tohi olla kriimustusi, mõlke ega pragusid. Harjad peavad libisema rõngastel kogu oma pinnaga ega tohi nendel hüpelda.

Harjasild peab paiknema täpselt tehase poolt ettenähtud asendis, mis tagab harjade õige asendi kommutaatoril.

Harjadena tuleb kasutada valmistajatehase poolt antud masinatüübi jaoks ettenähtud margiga harju. Ebaõige harjasordi kasutamisel võib tekkida lubamatult suur sädelemine, mis muudab masina töövõimetuks. Õigesti töötavate harjade kogu pind, mis puutub kokku kommutaatori või kontaktrõngastega, peab olema peegelsile.

Harjadel peab olema võimalus harjahoidja pidemetes radiaalsuunas vabalt liikuda, kuid seejuures ei tohi nad loksuma anda. Harjade surve vastu kommutaatorit või kontaktrõngaid peab vastama ettenähtud survele. Kasutusel on süsigrafiit-, grafiit-, elektrongrafiit-, vask-grafiit- ja pronks-grafiitharjad. Kolme esimest harjatüüpi kasutatakse alalisvoolumasinates, kahte viimast — asünkroon- ja sünkroonmasinates.

Harjade asendamisel uutega tuleb viimased kommutaatorile

ligi lihvida. Selleks asetatakse harjahoidjasse kinnitatud harja alla liivapaber kareda poolega vastu harja ja tõmmatakse seda mööda kommutaatori või kontaktrõnga pinda edasi-tagasi.

Elektrimasinates kasutatakse nii liugelaagreid kui ka veerelaagreid. Kaasaegsetel väikse ja keskmise võimsusega masinatel on tavaliselt veerelaagrid (rull- ja kuullaagrid), suurtel masinatel aga rõngasmäärimisega liugelaagrid.

Rull- ja kuullaagrid vajavad väga vähe hooldamist. Nende määrimiseks kasutatakse harilikult paksu määret (tavotti), mida tuleb vahetada iga 3—4 kuu tagant. Enne uue määrde sissepanekut tuleb vana määre laagrist eemaldada, kõik laagri detailid (kuulid, kuulipidemed) hoolikalt bensiiniga üle pesta ja alles siis uue määrdega täita. Laagrikere tuleb määrdega täita ⅔ mahuni, mispuhul laager töötab kõige soodsamates tingimustes. Kui tekib kahtlus laagri korrasoleku suhtes, tuleb laagrikilp ära võtta ja kõrvaldada isegi kõige väiksemad defektid, sest need võivad edaspidi põhjustada tõsiseid rikkeid ja suurt materiaalset kahju.

Liugelaagrid nõuavad hoopis suuremat tähelepanu ja hooldamist. Kõik laagrikilbid peavad olema tihedalt suletud.

Tuleb regulaarselt jälgida õli taset ja õli õigeaegselt (tavaliselt kord nädalas) juurde valada. Isegi väga tihedalt suletud kilpidega laagrites mustub õli aja jooksul. Seepärast tuleb õli vähemalt iga 1—2 kuu tagant vahetada. Selleks lastakse väljalaskeava kaudu vana õli välja ja pestakse laagrikere petrooleumiga puhtaks, lastes seda voolata läbi laagri. Kui väljavoolav petrooleum jääb täiesti puhtaks, hakatakse laagrit puhta määrdeõliga üle valama (väljalaskeava jääb veel avatuks), et eemaldada laagrikarbist sinna jäänud petrooleum. Seejärel väljalaskeava suletakse ja laagrikere täidetakse lõplikult määrdeõliga.

Laagrite määrimiseks kasutatav õli ei tohi anda sadet ega sisaldada vaike ning happeid.

Regulaarse määrimise kõrval tuleb jälgida ka laagriliudade kulumist. See on eriti tähtis asünkroonmootorite puhul, sest õhupilu on neil väga väike (0,3—0,5 mm) ja laagriliua kulumisel võib rootor hakata vastu staatorit käima. Selle vältimiseks tuleb staatori ja rootori vahelist õhupilu perioodiliselt kontrollida pilukaliibriga, mis koosneb erineva paksusega kalibreeritud plaatidest. Kui kontrollimisel selgub, et õhupilu ebaühtlus rootori ümbermõõdul on liiga suur, tuleb laagriliuad üle valada. Laagrite maksimaalne lubatud soojenemistemperatuur on 80° C. Laagrite soojenemist kontrollitakse kõige sagedamini käega (mitu korda päevas), vastutavamatel juhtudel

aga elavhõbetermomeetriga, mis lastakse laagris olevasse määrdeõlisse.

Masina isolatsioonitakistust mõõdetakse perioodiliselt masina töötamisel pärast pikemaid seisakuid ja samuti pärast masina kokkupanekut või ülesseadmist. Suur isolatsioonitakistus on isolatsiooni küllaldase elektrilise tugevuse tunnuseks.

Kuuma masina isolatsioonitakistus (megaoomides) peab olema võrdne või suurem kui jagatis:

$$\frac{\text{nimipinge voltides}}{1000 + \text{nimivõimsus kilovoltamprites}}.$$

Kui masina isolatsioonitakistus ei ole küllaldane ja kui isolatsioonitakistuse vähenemine on tingitud masina niiskumisest, siis tuleb ta kuivatada.

Kuivatusahju olemasolu korral võib seda kasutada väiksemate elektrimasinate kuivatamiseks. Ahju temperatuur kuivatamisel peab olema 90—100° C. Kuivatamine kestab 8—10 tundi. Rootor ja staator kuivatatakse kumbki omaette.

Ahjude või teiste kuivatusseadmete puudumisel kuivatatakse masinat elektrivooluga kuumutamise teel.

Alalisvoolumasin pannakse tööle võõrergutusega generaatorina. Ergutusmähisele rakendatakse madal pinge (2—4 V) ja ankur lühistatakse ampermeetriga. Võib juhtuda ka seda, et ergutusmähist ei ole üldse vaja vooluga toita, sest ankrus vajaliku voolu tekitamiseks piisab jääkväljatihedusest.

Reguleerides voolu ergutusmähises ja ankru pöörlemiskiirust, valitakse ankrumähises selline vool, et mähiste temperatuur, mida mõõdetakse termomeetriga, ei ületaks 70—75° C.

Ergutusmähised kuivavad ankrust eralduva soojuse mõjul.

Asünkroonmootoreid võib kuivatada järgmisel viisil. Mootori rootor lühistatakse (faasirootori puhul) ja pidurdatakse, staatorimähisele aga rakendatakse selline pinge, et tekkiv vool soojendaks masina mähiseid temperatuurini 70—75° C. Staatorimähise toitepinge peab olema 5—7 korda madalam masina nimipingest.

Tuleb juhtida tähelepanu sellele, et nimetatud kuivatamistemperatuurid kujutavad endast lõpptemperatuure, kuna alustada tuleb kuivatamist madalamalt temperatuurilt. Masina kuivatamine kestab sõltuvalt masina võimsusest mõnest tunnist kuni 5—6 ööpäevani. Kuivatamine lõpetatakse siis, kui isolatsioontakistus saavutab normaalse suuruse.

Metallreostaadid puhastatakse tolmust ja mustusest kaltsuga hõõrumise või lõõtsaga läbipuhumise teel. Tuleb järele

vaadata, et kontaktid oleksid korras, liugkontakti surve normaalne ja spiraalid ei puutuks kokku omavahel ega kerega.

Õlireostaatides tuleb jälgida õli taset ja seda vajaduse korral juurde valada. Õlina kasutatakse mineraalset trafoõli. Soovitav on vahetada õli 2—3 kuu tagant, pestes seejuures paagi ja takistid petrooleumiga üle.

9-26. Laboratoorne töö. Kolmefaasiline asünkroonmootor

Tööplaan

1. Tutvuda mootoriga ja käivitusseadistega, üles märkida mootori sildiandmed ja mõõteriistade andmed.
2. Koostada skeem (joon. 9-25) ja lasta see juhendajal kontrollida.
3. Üles võtta ja välja joonestada mootori karakteristikud I_1; P_1; M; s; $\cos\varphi$; $\eta = f(P_2)$.
4. Käivitada faasirootoriga asünkroonmootor. Muuta rootori pöörlemissuunda.

Töö kirjeldus

Lühisrootoriga asünkroonmootori lülitusskeem on näidatud joonisel 9-25. Seadnud ümberlüliti asendisse, mispuhul staator on ühendatud tähte, lülitatakse võrgulüliti sisse. Kui mootor on hakanud pöörlema, lülitatakse staator ümber kolmnurka. Mootor käivitatakse tühijooksus; seejuures peab staatori klemmipinge võrduma nimipingega ($U_1 = U_n$). Kui mõõteriistade näidud tühijooksul on üles märgitud, hakatakse mootorit koormama, kuni staatori vool saavutab nimiväärtuse I_n. Mootorit koormatakse mehaanilise piduriga. 5 kuni 6 erineva koormuse puhul märgitakse üles vool I_1, võimsus P_1, pinge U_1, rootori pöörlemiskiirus n_2 ja pidurdav jõud F. Saadud andmeil arvutada:

1. $\cos\varphi_1 = \dfrac{P_1}{\sqrt{3}\,U_1 I_1}$;
2. $M = Fl$ [kgm]; kus F — kg-des ja l — piduri õla pikkus m-tes;
3. $P_2 = 9{,}81\,M\omega_2 = 9{,}81M\dfrac{2\pi n_2}{60} = 1{,}027Mn_2$;
4. $\eta = \dfrac{P_2}{P_1}$;
5. $s = \dfrac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%$.

Mootorite karakteristikute kuju on näidatud joonisel 9-35.

Faasirootoriga mootori käivitamiseks ühendatakse reostaat joonisel 9-27 esitatud skeemi järgi, staator aga ühendatakse sõltuvalt võrgupingest kas tähte või kolmnurka.

TÖÖSTUSLIK ELEKTROONIKA

10-1. Elektronseadiste klassifikatsioon ja nende otstarve

Elektroonika uurib selliste seadiste tööpõhimõtet, ehitust ja kasutamisvõimalusi, milledes rakendatakse vaakuumis ja hõrendatud gaasides esinevaid elektrilisi nähtusi.

Elektroonikaseadised jaotatakse kahte suurde rühma: elektronseadised ja ioonseadised.

Elektronseadistes on voolukandjateks ainult elektronid; see on võimalik ainult kõrgvaakuumis, mispuhul elektronide liikumisel ei teki praktiliselt nende kokkupõrkeid gaasi aatomitega.

Sellesse seadisterühma kuuluvad kahe ja mitme elektroodiga elektronlambid, mõned fotoelemendid, elektronkiiretoru jne.

Ioonseadistes on voolukandjateks mitte ainult elektronid, vaid ka ioonid, mis tekivad elektronide kokkupõrkel gaasi aatomitega.

Sellesse seadisterühma kuuluvad gasotronid, tiratronid, elavhõbealaldajad jne.

Üheks ioonseadiste erinevuseks elektronseadistega võrreldes on nende suur inertsus, mis on seletatav sellega, et ioonide mass on tunduvalt suurem elektroni omast.

Seetõttu kasutatakse ioonseadiseid madalama sageduse puhul (mõni kiloherts). Elektronseadiseid kasutatakse aga seadmetes, kus sagedus ulatub sadadesse megahertsidesse.

Elektronseadiseid kasutatakse väiksema võimsusega alaldajates, võimendajates, kõrgsagedusgeneraatorites ning vastuvõtuseadmetes.

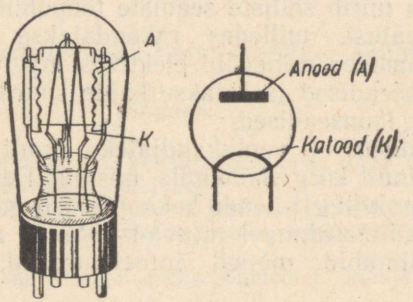
Ioonseadised on leidnud rakendamist keskmise ja suure võimsusega alaldajates ning mehhanismide automaatjuhtimise lülitustes.

10-2. Väikse võimsusega alaldajad. Filtrid

Metalli soojendamisel tõuseb mõnede metalli sees olevate elektronide kineetiline energia niivõrd suureks, et nad lendavad metallist välja. Seda nähtust nimetatakse *termoelektroonseks emissiooniks*. Termoelektroonse emissiooni nähtust rakendatakse laialdaselt elektronlampides.

Elektronlamp (joon. 10-1) kujutab endast klaas- või metallballooni, milles asub kaks elektroodi — anood *A* ja niidikuju-

line katood *K*. Balloonis tekitatakse vaakuum. Vaakuum ei juhi elektrit. Selleks et lamp hakkaks elektrit juhtima, kuumutatakse katoodi, millest eralduvad elektronid. Katoodi kuumutatakse kas alalisvooluga küttepatareist või vahelduvvooluga trafost.



Joon. 10-1. Kahe elektroodiga elektronlambi ehitus ja tingmärk.

Kui ühendada lambi anood vooluallika plussiga ning katood miinusega, siis tekib elektroodide vahele elektriväli. Selle välja mõjul hakkavad elektronid liikuma katoodilt anoodile, tekitades anoodvoolu.

Katoodilt lahkunud elektronid täidavad elektroodidevahelise ruumi. Katoodi lähedal asuvaile elektronidele mõjub peale anoodi poolt tekitatud elektrivälja jõujoonte ka teisesuunaline jõud, mis on tekitatud anoodi ümbrusse kogunenud elektronide poolt. Seetõttu katoodi läheduses asuvaid elektrone pidurdatakse ning nad moodustavad katoodi ümber negatiivse ruumilaengu, mis takistab elektronide väljumist katoodilt ja nende liikumist anoodile.

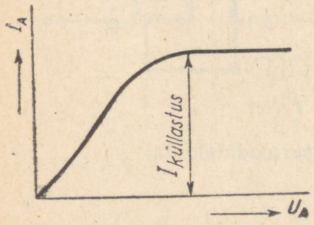
Tõstes elektroodide pinget suureneb ka vool, kuid ainult teatud piirini (joon. 10-2), mida nimetatakse k ü l l a s t u s v o o l u k s. Edaspidine pinge tõstmine ei põhjusta enam voolu suurenemist. Küllastusvoolu puhul on 1 sekundi jooksul katoodilt väljunud elektronide arv võrdne sama ajavahemiku kestel anoodile jõudnud elektronide arvuga.

Elektronlamp juhib voolu ainult ühes suunas, sest kui ühendada katood vooluallika plussiga ja anood miinusega, saame lambi elektroodide vahel vastassuunalise välja, mis sunnib katoodilt väljunud elektrone katoodile tagasi pöörduma.

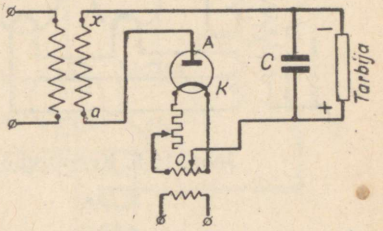
Seda kahe elektroodiga lambi omadust kasutatakse laialda-

selt vahelduvvoolu alaldamiseks. Selleks otstarbeks kasutatavat lampi nimetatakse k e n o t r o n i k s.

Joonisel 10-3 on näidatud ühe lihtsama poolperioodalaldaja skeem. Lambi anood on ühendatud trafo sekundaarmähise klemmiga *a*. Sama mähise klemm *x* on ühendatud takistuse kaudu (mis on tarbijaks) küttetrafo sekundaarmähise keskpunktiga *O*.

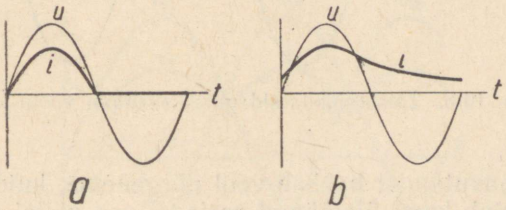


Joon. 10-2. Elektronlambi volt-amper-karakteristik.



Joon. 10-3. Vahelduvvoolu alaldamine elektronlambiga.

Pinge selle poolperioodi vältel, mil lambi anood omab katoodi suhtes positiivse potentsiaali, läbib anoodringi (*A*, *K*, *O* +, —, *x*, *a*, *A*) vool *i* (joon. 10-4, *a*). Teise poolperioodi jooksul voolu anoodringis ei ole, sest lamp juhib voolu vaid ühes suunas. Seega kulgeb vooluringis ainult ühesuunaline vool.

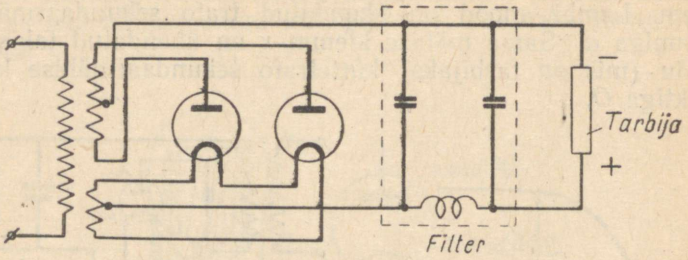


Joon. 10-4. Poolperioodalaldamine.

Selleks et saada tarbijas väiksema lainelisusega (pulsatsiooniga) voolu, lülitatakse paralleelselt tarbijaga kondensaator *C*.

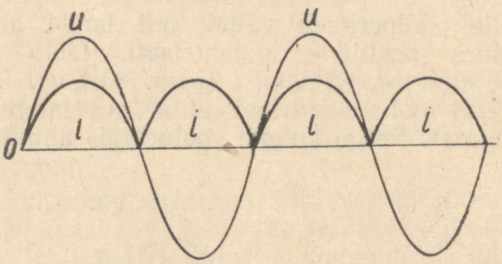
Esimese veerandperioodi jooksul, kui pinge trafo sekundaarmähises suureneb nullist maksimaalväärtuseni, toimub kondensaatori laadimine. Perioodi ülejäänud osa vältel toimub kondensaatori tühjenemine läbi tarbija, mille tulemusena vool läbib tarbijat kogu perioodi vältel (joon. 10-4, *b*) ning lainelisus väheneb.

Voolu lainelisuse vähendamiseks võib kondensaatori asemel kasutada paispooli, mis lülitatakse järjestikku tarbijaga.



Joon. 10-5. Kenotronidega täisperioodalaldaja.

Sel juhul esimese veerandperioodi jooksul, mil vool tugevneb, salvestub energia pooli magnetväljas ning indutseerub endainduktsiooni elektromotoorne jõud. Pärast maksimaal-



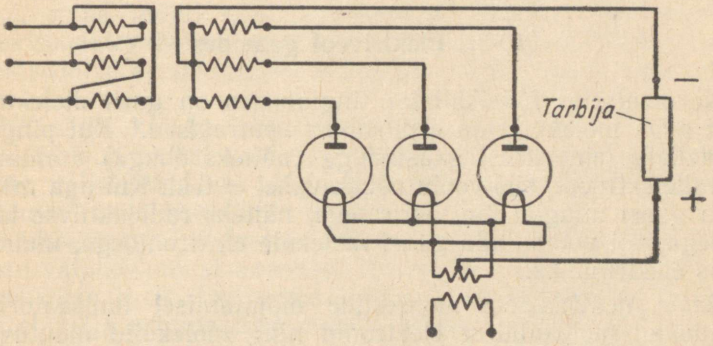
Joon. 10-6. Täisperioodalaldamisel saadava voolu kõver.

väärtuse saavutamist hakkab vool nõrgenema, kuid voolu kulgemine kestab kogu ülejäänud perioodi osa vältel endainduktsiooni elektromotoorse jõu tõttu, mille suund sel ajal ühtib voolu suunaga. Seega aitab ka paispool kaasa voolu lainelisuse vähenemisele tarbijaahelas.

Kui on vaja saavutada praktiliselt lainelisuseta alaldatud voolu, kasutatakse paispoolist ja kahest kondensaatorist koosnevat silumisfiltrit.

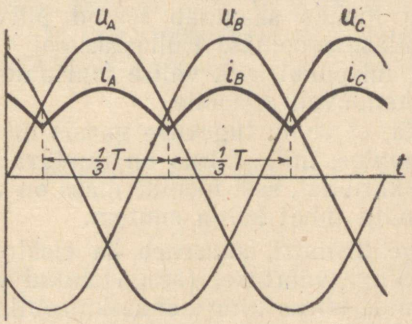
Täisperioodalaldamise saavutamiseks kasutatakse kaht kenotroni (joon. 10-5) või üht kahe anoodiga kenotroni. Joonisel 10-5 antud skeemis on kenotronide anoodid ühendatud trafo sekundaarmähisega, mille keskpunkt on kogu anoodahela miinuseks.

Kenotronide katoode toidetakse trafo kolmandast mähisest, mille keskpunkt on anoodahela plussiks. Ühe poolperioodi vältel suundub vool tarbijasse ühe kenotroni kaudu, teise poolperioodi vältel aga teise kenotroni kaudu (joon. 10-6).



Joon. 10-7. Kolmefaasiline alaldaja.

Joonisel 10-7 on näidatud kolmefaasilise alaldaja skeem. Siin läbib vool iga kenotroni vaid $^1/_3$ perioodi vältel. See on seletatav sellega, et kenotronide katoodid, mis on omavahel ühendatud, omavad võrdset potentsiaali ning vool läbib vaid



Joon. 10-8. Joonisel 10-7 kujutatud lülitusega saadava pingete ja voolude kõverad.

seda kenotroni, mille anoodil on antud hetkel kõige kõrgem potentsiaal. Ülejäänud kahel kenotronil on samal ajal anood katoodist negatiivsem ja nad voolu ei juhi (joon. 10-8).

Kolmefaasilisest alaldajast saadav alalisvool on tunduvalt väiksema lainelisusega kui ühefaasilisest alaldajast saadav alalisvool. Viimane asjaolu on kolmefaasilise alaldaja suureks eeliseks.

10-3. Elektrivool gaasides

Normaalsetes füüsikalistes tingimustes on gaas dielektrik, sest tema molekulid on elektriliselt neutraalsed. Kui pingestada kaks teineteisest gaasikihiga (näiteks õhuga) eraldatud metallelektroodi, siis voolu nende vahel ei teki. Kui aga mõjutada gaasi mingite ionisaatoritega, näiteks radioaktiivse kiirgusega, või pommitada gaasi molekule elektronidega, muutub gaas elektrijuhiks.

Gaasi neutraalsete molekulide mõjutamisel ionisaatoriga eralduvad molekulidest elektronid ning molekulid muutuvad positiivseiks ioonideks (gaasi ioniseerimine). Elektrivälja mõjul positiivsed ioonid suunduvad katoodile, elektronid aga anoodile.

Üheaegselt gaasi ioniseerimisega toimub ioonide ja elektronide taasühinemine ning neutraalsete molekulide tekkimine, mille tõttu vaid osa elektrone jõuab anoodini.

Pinge tõstmisel vool gaasis tugevneb esialgu peaaegu võrdeliselt pingega. Edasisel pinge tõstmisel voolu tugevnemine aeglustub ning lõpuks saavutab teatud piirväärtuse, mida nimetatakse küllastusvooluks. Küllastusvool vastab niisugusele olukorrale, mispuhul kõik välise ionisaatori poolt tekitatud elektronid kanduvad anoodile.

Tuleb märkida, et voolu tugevuse gaasis määrab peamiselt elektronide liikumine, mille kiirus on tunduvalt suurem positiivsete ioonide kiirusest, sest ioonide mass on võrreldes elektronide omaga mitu tuhat korda suurem.

Jätkates pinge tõstmist, suureneb ka elektronide liikumiskiirus. Teatud pinge väärtusel (seega teatud väljatugevusel) muutub elektronide kiirus ning nende kineetiline energia küllaldaselt suureks selleks, et kokkupõrkel neutraalsete molekulidega ioniseerida neid (tõukeionisatsioon). Seejuures suureneb järsult vabade elektronide arv ja seega ka vool ning tekib huumlahendus, millega kaasub gaasi helendamine anoodi ümbruses ning heliefekt.

Pinge tõstmisel muutub huumlahendus sädelahenduseks ning küllalt võimsa energiaallika korral — leeklahenduseks (kaarleek), mispuhul katoodi pommitavate positiivsete ioonide

suurte energiavarude tõttu toimub katoodi kuumenemine kõrge temperatuurini.

Leeklahendust on võimalik saavutada ka ilma lahenduse vahestaadiumideta (huum- ja sädelahendus). Selleks lähendame näiteks söest elektroodid teineteisele, kuni ahelas tekib vool, mille mõjul söed kuumenevad kõrge temperatuurini. Elektroodidevaheline gaas ioniseerub, muutub juhtivaks ning elektroodide eemaldamisel teineteisest tekib nende vahel leeklahendus.

Nii säde- kui ka leeklahendus on väga levinud nähtused. Nad tekivad sageli vooluahelate katkestamisel ja elektrimootorite väljalülitamisel ning lüliti vale konstruktsiooni korral kutsuvad esile kontaktide vigastusi.

Sädelahendus põhjustab elektroerosiooni, s. t. mateeriaosakeste väljakiskumist anoodist. Nõukogude teadlased N. I. Lasarenko ja B. R. Lasarenko töötasid elektroerosiooni nähtuse alusel välja originaalsed metalli töötlemise meetodid.

Leeklahendust kasutatakse ulatuslikult metallide sulatamiseks, lõikamiseks ja keevitamiseks ning elektrivalgustuseks. Leeklahenduse (kaarleegi) alalhoidmiseks vajalik pinge on 30—40 V.

Kaarleek kiirgab pimestavat valgust. Kiirgab peamiselt 4000° C-ni kuumendatud anood, kusjuures kiirgus toimub tema lakkamatu pommitamise arvel elektronidega, mis väljuvad ligi 3000° C-ni kuumendatud katoodist.

Kaarleegi avastas 1802. a. akad. V. V. Petrov (1761—1834). Ta uuris kaarleeki ja tegi kindlaks, et seda on võimalik rakendada nii valgustamiseks kui ka metallide sulatamiseks ja keevitamiseks.

10-4. Keskmise võimsusega alaldajad

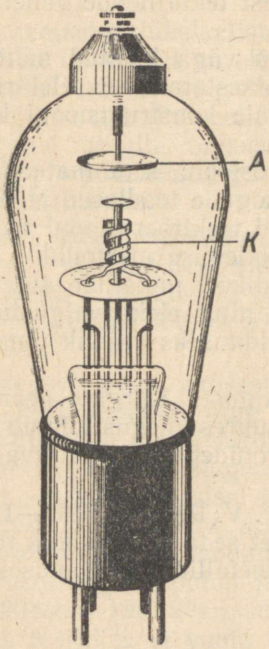
a) Gasotron

Gasotroniks nimetatakse kahe elektroodiga lampi metall- või süsianoodiga *A* (joon. 10-9) ja metallkatoodiga *K*; lambi klaaskolb on täidetud elavhõbedaauruga või inertse gaasiga.

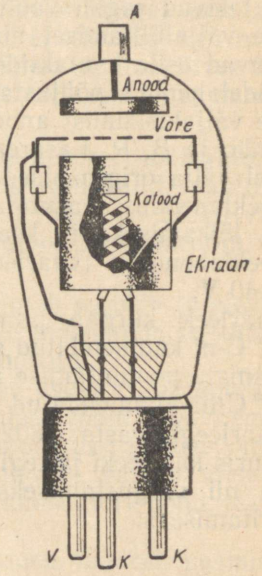
Katoodi köetakse eraldi vooluallikast. Kuumendatud katoodist väljalendavad elektronid ioniseerivad elavhõbedaauru (gaasi). Positiivsed ioonid kompenseerivad negatiivse ruumilaengu, vähendades pingelangu gasotronis ning soodustades emissiooni suurenemist. See on gasotroni suureks eeliseks, võrreldes kahe elektroodiga vaakuumlambiga. Kuna gasotroni katoodi mass on võrdlemisi suur, vajab ta küllaltki pikka

(2—20 min.) aega kuumenemiseks töötemperatuurini, mida on vaja anda katoodile enne gasotroni pingestamist. Vastasel korral võib katood kaotada emissiooni.

Gasotrone valmistatakse kuni mõnekümneamprise voolu alaldamiseks. Küttevool kõigub mitmesuguse võimsusega gasotronidel 4 kuni 50 A piirides.



Joon. 10-9. Gasotron.



Joon. 10-10. Tiratron.

Voolu alaldamisel gasotronide abil kasutatakse samu lülitusi mis elektronlampide puhulgi.

Gasotroni puuduseks peale katoodi pika eelkuumendamise aja on ka tema tundlikkus ülekoormuste suhtes.

b) Tiratron

Tiratron erineb gasotronist selle poolest, et temal on veel kolmas elektrood — võre (joon. 10-10), mis etendab klapi osa, avades või sulgedes anoodvooluringi.

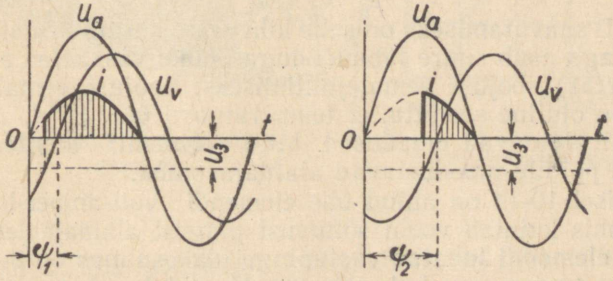
Kui tiratroni võrele rakendada katoodi suhtes negatiivne potentsiaal, siis võre elektriväli võre ja katoodi vahel on tiratroni põhiväljale vastupidise suunaga ning aeglustab elektronide liikumist katoodilt anoodile. Seega võre teatava negatiivse potentsiaali korral liiguvad katoodist väljuvad elektronid liiga aeglaselt selleks, et ioniseerida gaasi (elavhõbedaauru). Võre negatiivse potentsiaali vähenemisel teatud väärtuseni, mida nimetatakse süütepingeks, muutub elektronide liikumise kiirus küllaldaseks gaasi ioniseerimiseks. Sel juhul tekib võimas elektronide vool, anoodvool kasvab järsult — tiratron süttib. Seejärel võre enam ei mõjuta anoodvoolu, sest ta kattub positiivsete ioonide kihiga, mis neutraliseerivad võre negatiivse laengu.

Seega on võrepinge abil võimalik reguleerida tiratroni süttimise hetke. Kui lülitada tiratron alaldajana vahelduvvooluahelasse, hakkab ta iga perioodi jooksul 1 kord süttima ja 1 kord kustuma. Kui rakendada võrele pinge, mille sagedus võrdub anoodpinge sagedusega, kuid mis on nihutatud viimase suhtes nurga ψ võrra, saame tiratroni süttimise neil hetkedel, kui võre negatiivne pinge on muutunud võrdseks süütepingega (U_3) (joon. 10-11).

Muutes võrepinge faasi (näiteks faasiregulaatori abil), on võimalik muuta tiratroni süütemomenti ja seega ka anoodvoolu kestust perioodi jooksul. Sel teel reguleeritakse alaldatud pinge ja voolu keskväärtust (joon. 10-11).

c) Pooljuhtalaldajad

Pooljuhtalaldaja koostatakse mitmest elemendist. Iga element koosneb kahest elektroodist, millede vahel on õhuke (10^{-6} cm) tõkkekiht (joon. 10-12). Üheks elektroodiks on



Joon. 10-11. Tiratroni pinge ja voolu kõverad erinevate anood- ja võrepinge vaheliste nihkenurkade korral.

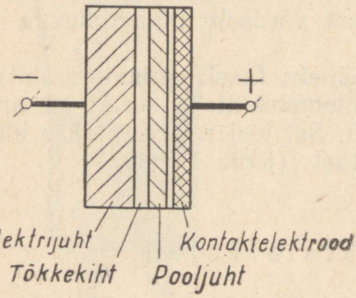
elektrijuht, teiseks — pooljuht. Vabade elektronide kontsentratsioon elektrijuhis on tunduvalt suurem kui pooljuhis, kuid elektronid ei saa liikuda, sest elektroodide vahel asub tõkkekiht. Ühendades juhtiva elektroodi vooluallika negatiivse klemmiga ning pooljuhtelektroodi positiivse klemmiga, läbib vooluahelat vool (avasuunas), sest elektrivälja jõudude mõjul liiguvad elektronid juhist läbi tõkkekihi ja pooljuhi.

Kui ühendada alaldav element vastassuunaliselt, siis tekib tõkkesuunaline vool, mis on väga väike, võrreldes avasuunalise vooluga.

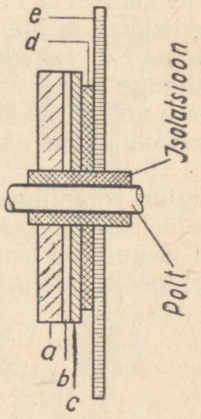
Seega juhivad pooljuhtventiilid voolu praktiliselt vaid ühes suunas.

Kõige ulatuslikumalt on tänapäeval levinud kuproks- ja seleenalaldajad.

Kuproksalaldaja element (joon. 10-13) koosneb vaskkettast *a*, mis on tõkkekihi *b* abil eraldatud vask(1)oksüüdi kihist *c*. Parema



Joon. 10-12. Poojuhtalaldaja skeem.

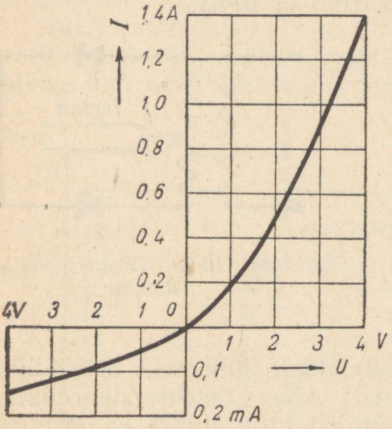


Joon. 10-13. Kuproksalaldaja ehitus.

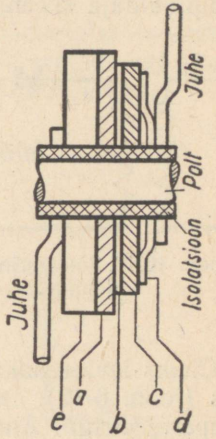
kontakti saavutamiseks on selle kihi vastu surutud tinaketas *d*, mille taga asub suure läbimõõduga õhuke vaskketas *e* (radiaatorketas) soojuse eemalejuhtimiseks. Soojuse eemalejuhtimine on oluline seetõttu, et temperatuuril üle 50° C kaotab element alaldavad omadused. Mitu elementi monteerituna ühisele poldile moodustavad alaldajasamba.

Joonisel 10-14 on antud ühe elemendi volt-amper-karakteristik, mis kujutab voolu sõltuvust pingest alaldajaelemendil. Ühe elemendi lubatav vastupinge tõkkesuunas on 8—10 V, sest vastupinge puhul 20—30 V tekib elemendi läbilöök.

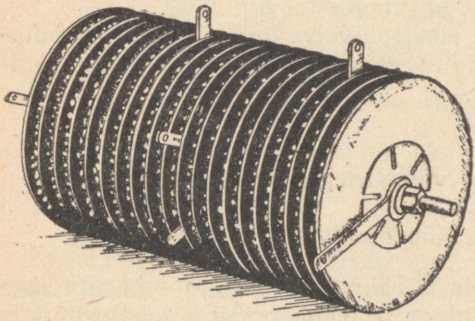
Seleenalaldaja element (joon. 10-15) koosneb terasketttast *e*, mis on ühelt poolt kaetud pooljuhtiva seleenikihiga *a* ning on üheks elektroodiks. Teiseks elektroodiks *c* on seleenile



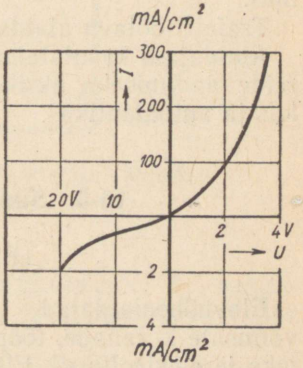
Joon. 10-14. Kuproksalaldaja volt-amper-karakteristik.



Joon. 10-15. Seleenalaldaja ehitus.



Joon. 10-16. Seleenalaldaja sammas.

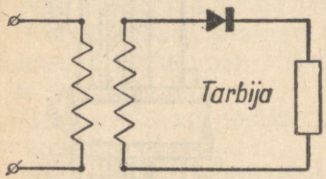


Joon. 10-17. Seleenalaldaja volt-amper-karakteristik.

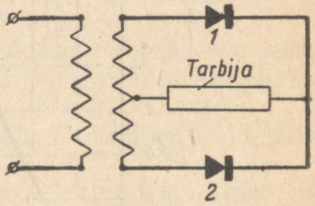
pealekantud tina, kadmiumi ja vismuti sulami kiht, millel asub valgevasest vedruseib *d*. Joonisel 10-16 on näidatud seleenalaldaja sammas.

Seleenelemendi lubatav vastupinge on 20—25 V. Pingel 50—80 V tekib läbilöök.

Joonisel 10-18 ja 10-19 on antud vahelduvvoolu pool- ja täisperioodalaldajate põhimõttelised skeemid, mis sarnanevad lampalaldaja skeemidele (joon. 10-3 ja 10-5).



Joon. 10-18. Poolperioodalaldamine.



Joon. 10-19. Täisperioodalaldamine.

Üheks levinumaks täisperioodalaldaja lülituseks on sildlülitus (joon. 6-12), mida käsitleti koos detektorsüsteemilise ampermeetriga. Analoogilist lülitust kasutatakse ka tarbijate toiteks. Sel juhul on klemmidele *ac* ühendatud trafo sekundaarmähis, kuna klemmidele *bd* — energiatarbija.

Skeemi kummaski harus võib olla mitu alaldajaelementi, mis on omavahel ühendatud kas järjestikku, paralleelselt või rühmiti.

Trafolt töötava alaldaja kasutegur on ligi 50%.

Alaldajaid kasutatakse elektrolüüsivannide toiteks, akupatareide laadimiseks, üksikute aparaatide toiteks ning mõõtetehnikas ja automaatikas.

10-5. Suure võimsusega alaldajad

(Elavhõbealaldajad)

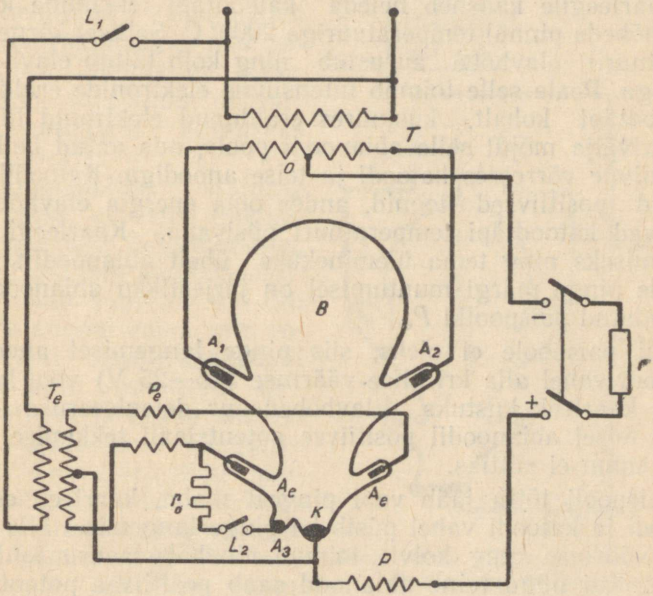
Elavhõbealaldajad (elavhõbekatood-ventiile) kasutatakse võimsate kraanade, tööpinkide ja mehhanismide mootorite toiteks ja elektrolüüsil. Elektrifitseeritud raudteed saavad enamikel juhtudel voolu elavhõbealaldajatega varustatud alajaamadest.

Konstruktsioonilt jagunevad elavhõbealaldajad klaaskolviga ja metallkestaga alaldajateks. Esimesi valmistatakse voolule kuni 500 A pingel kuni 600 V ja voolule kuni 20 A pingel kuni 15 kV, teisi voolule kuni 5000 A pingel kuni 800 V ja voolule kuni 200 A pingel kuni 50 kV.

Faaside arvu poolest jagunevad ventiilid ühe- ja kolmefaasilisteks, anoodide arvu poolest — ühe-, kahe-, kolme- ja kuueanoodilisteks.

Ühefaasiline elavhõbealaldaja (joon. 10-20) koosneb õhutühjast sarvedega klaaskolvist *B*.

Ventiili peaanoodid A_1 ja A_2, mis on valmistatud rauast ja grafiidist, on ühendatud jõutrafo *T* sekundaarmähisega. Selle mähise nullpunkt on tarbija vooluahela miinusklemmiks.



Joon. 10-20. Ühefaasilise elavhõbealaldaja ühendusskeem.

Ergutusanoodid A_e on ühendatud ergutustrafo T_e sekundaarmähisega. Klaaskolvi alumises osas asetsev elavhõbe moodustab ventiili katoodi *K*.

Lühikeses torukeses katoodi ligidal asetseb elavhõbeelektrood A_3, mida kasutatakse ventiili süütamiseks.

Ventiili käivitamiseks ta pingestatakse, suletakse lüliti L_1, vajutatakse nupp L_2 alla ning kallutatakse ettevaatlikult klaaskolvi kuni süüteanoodi A_3 elavhõbe ühineb katoodi elavhõbedaga. Seejuures ergutustrafo sekundaarmähise alumise osa elektromotoorse jõu mõjul tekib vool läbi takistuse r_0 ning süüteanoodi ja katoodi ühendava elavhõbedast sillakese.

Kolvi normaalasendi taastamisel elavhõbedast ühendussillake katkeb ning katkestuse kohal tekib säde. Termoelektroonse emissiooni tagajärjel tekib kolvis teatud hulk vabu elektrone. Kui üks ergutusanoodidest, näiteks vasakpoolne, on antud hetkel kõrgema potentsiaaliga kui katood, siis liiguvad vabad elektronid tema poole, ioniseerides liikumisel elavhõbedaauru. Seega tekib katoodi ja abianoodi vahel leeklahendus. Sel ajal vabastatakse nupp L_2 ja vooluahel katkeb.

Kaarleegile kaasneb heleda katoodtäpi tekkimine katoodi elavhõbeda pinnal temperatuuriga 2000° C. Sellisel kõrgel temperatuuril elavhõbe aurustub ning kolb täitub elavhõbedaauruga. Peale selle toimub intensiivne elektronide eraldumine katoodtäpi kohalt, kusjuures eraldunud elektronid liiguvad elektrivälja mõjul selle abianoodi poole, mis antud hetkel on positiivne võrreldes katoodi ja teise anoodiga. Katoodile langevad positiivsed ioonid, andes oma energia elavhõbedale, hoiavad katoodtäpi temperatuuri püsivana. Kaarleegi alalhoidmiseks ning tema üleminekuks ühelt abianoodilt teisele nende pinge märgi muutumisel on järjestikku abianoodidega ühendatud paispoolid P_e.

Kui paispoole ei oleks, siis pinge langemisel anoodi ja katoodi vahel alla kriitilise väärtuse (15—25 V) vool katkeks ning kaarleek kustuks. Elavhõbedaaur deioniseeruks kiiresti ning teisel abianoodil positiivse potentsiaali tekkimisel kaarleek enam ei süttiks.

Paispooli tõttu jääb vool pingest maha, kaarleek esimese anoodi ja katoodi vahel püsib ka pinge langemisel alla kriitilise väärtuse ning kolvis toimub elavhõbedaauru ioniseerumine. Kui nüüd teine abianood saab positiivse potentsiaali, kandub kaarleek esimeselt anoodilt teisele ning alaldamisprotsess kulgeb katkematult.

Kui lülitada sisse koormus r (tarbija), tekib kaarleek peaanoodi ja katoodi vahel. Kaarleek püsib katoodi ja selle anoodi vahel, mis on antud hetkel katoodi suhtes positiivne. Seega toimub täisperioodalaldamine.

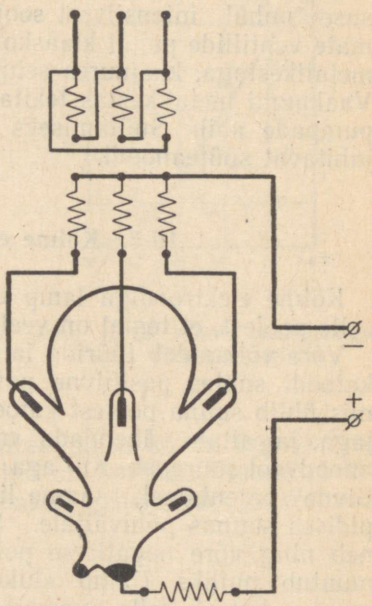
Poolil P peavpoluahelas on sama otstarve kui poolil P_e ergutusanoodide ahelas. Kaarleek püsib, kui vool on vähemalt 4—5 A. Kui tarbija tarbib suuremat voolu kui 4—5 A, siis võib abianoodide ahela välja lülitada. Vahelduva koormuse korral, kui on karta, et vool tarbijas võib vahetevahel langeda alla 4—5 A, peab abianoodide ahel olema kogu aeg sisse lülitatud. Pinge märgi muutumisel anoodi ja katoodi vahel (vastupinge), kui anood saab negatiivse potentsiaali, tekib elektroodide vahel väga nõrk vastassuunaline vool (mõni milliamper).

Pingelang elektroodidel ja kaarleegis ei ületa tavaliselt 20—25 V.

Kolmefaasiline elavhõbedaalaldaja erineb ühefaasilisest selle poolest, et tal on kahe peaanoodi asemel kolm peaanoodi.

Kolmefaasilise alaldaja skeem erineb ühefaasilise alaldaja skeemist vaid selle poolest, et ventiili peaanoodid on ühendatud trafo kolme sekundaarmähisega, mis on omavahel ühendatud tähte, ning tähe nullpunkt on tarbija vooluahela miinuseks (joon. 10-21).

Kolmefaasilise alaldaja tööprotsess ei erine ühefaasilise alaldaja tööprotsessist. Kolmefaasilises elavhõbealaldajas tekib kaarleek katoodi ja selle anoodi vahel, mis antud hetkel omab kõrgeimat potentsiaali. Anoodvool kulgeb katoodi ja antud anoodi vahel seni, kuni järgmise anoodi (faasijärjestuse suunas) pinge muutub võrdseks eelmise anoodi pingega. Sel hetkel toimub voolu üleminek järgmisele anoodile (joon. 10-8).



Joon. 10-21. Kolmefaasilise elavhõbealaldaja ühendusskeem.

Alaldatud voolu ja alaldajasse antud vahelduvvoolu suhe on konstantne (a).

Kui jätta pingelang alaldajas arvesse võtmata võib ühefaasilise elavhõbealaldaja kohta öelda, et alaldatud pinge väärtus võrdub vahelduvvoolu pinge keskväärtusega ühe poolperioodi vältel. Seega siinuselise vahelduvvoolu korral:

$$U_{al} = U_k = 0{,}637\ U_{max}.$$

Vahelduvvoolu efektiivväärtus on teatavasti määratav järgmise seosega:

$$U = 0{,}707\ U_{max}.$$

Seega ühefaasilise alaldaja korral:

$$a_1 = \frac{U_{al}}{U} = \frac{U_k}{U} = \frac{0{,}637\ U_{max}}{0{,}707\ U_{max}} = \frac{1}{1{,}11} = 0{,}9.$$

Kolmefaasilise alaldaja korral:

$$a_1 = \frac{U_{al}}{U} = \frac{1}{0{,}85} = 1{,}17.$$

Kuna klaaskolb on suhteliselt õrn ning vajab suure võimsuse puhul intensiivset soojuse eemalejuhtimist, on võimsamate ventiilide puhul klaaskolb asendatud kahekordse seinaga metallkestaga, kusjuures seinte vahel tsirkuleerib jahutusvesi. Vaakuumi metallkestas tekitatakse ja hoitakse alal vaakuumpumpade abil. Süütamiseks kasutatakse elektromagnetiliselt juhitavat süüteanoodi.

10-6. Kolme elektroodiga lamp

Kolme elektroodiga lamp erineb kahe elektroodiga lambist selle poolest, et temal on veel kolmas elektrood — võre.

Võre võimaldab tüürida lambi anoodvoolu. Kui anda võrele katoodi suhtes positiivne potentsiaal, luuakse lisaelektriväli, mis ühtib suuna poolest katoodi ja anoodi vahelise elektrivälja ga ja aitab vähendada negatiivset ruumilaengut. Lambi anoodvool suureneb. Kui aga anda võrele katoodi suhtes negatiivne potentsiaal, saame lisaelektrivälja, mis mõjub vastupidises suunas põhiväljale. Selle tagajärjel anoodvool väheneb ning võre negatiivse potentsiaali teatud väärtuse puhul muutub nulliks (lamp «lukustub»). Väike võrepotentsiaali muutus kutsub esile anoodvoolu järsu muutumise.

Kõverat, mis kujutab anoodvoolu sõltuvust võrepingest $I_a = f(U_v)$, nimetatakse staatiliseks tunnusjooneks (joon. 10-23).

Anoodvoolu juurdekasvu ja võrepinge juurdekasvu suhet konstantsel anoodpingel nimetatakse tõusuks:

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_v}.$$

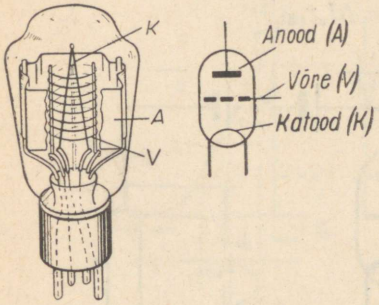
Anoodpinge juurdekasvu ja anoodvoolu juurdekasvu suhet konstantsel võrepingel nimetatakse lambi sisetakistuseks:

$$R_s = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}.$$

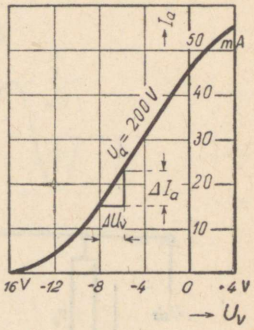
Lambi tõusu ja sisetakistuse korrutist

$$r_s S = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \cdot \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a} = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_v} = \mu_{st}$$

nimetatakse staatiliseks võimendusteguriks. Ta võrdub anoodpinge juurdekasvu suhtega võrepinge sellesse juurdekasvu, mis on vajalik selleks, et anoodvool jääks muutumatuks.



Joon. 10-22. Kolme elektroodiga lambi ehitus ja tingmärk.



Joon. 10-23. Kolme elektroodiga lambi võrekarakteristik.

Staatiline võimendustegur näitab, mitu korda tugevamini võrepinge mõjutab lambi voolu kui anoodpinge. Kolme elektroodiga lampe kasutatakse laialdaselt generaator- ja võimenduslampidena.

10-7. Elektronlampvõimendajad

Kolme elektroodiga lampe kasutatakse nii pinge- kui ka võimsusvõimendajates. Tuleb mainida, et mitte lamp ise ei võimenda, vaid võimendus toimub lambi abil anoodringi toitva energiaallika arvel.

Joonisel 10-24 on näidatud lihtsaima võimendaja skeem.

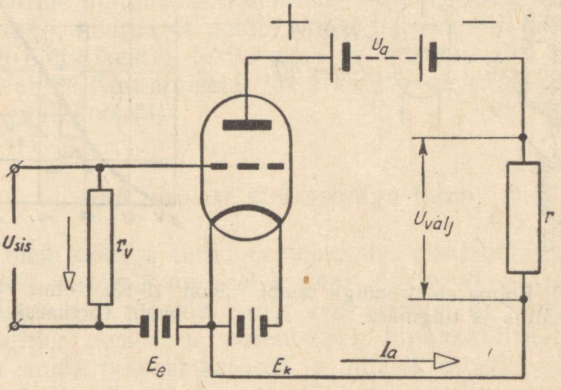
Võimendusprotsessi olemus seisab selles, et suhteliselt väike pinge muutus sisendklemmidel (klemmidel r_v) kutsub esile analoogilise, kuid tunduvalt suurema pinge muutuse väljandklemmidel (lambi anoodringi lülitatud takistusel $r_{välj}$ joon. 10-24) ehk, teiste sõnadega, lambi võrele antud nõrk elektriline signaal taastatakse tunduvalt võimsamana takistusel $r_{välj}$.

Kui lamp pole «lukustatud», siis pingestamata sisendklemmide puhul läbib lambi anoodringi vool ning pinge väljandklemmidel (takistusel $r_{välj}$)

$$U_{välj} = I_a r_{välj}.$$

Kui sisendklemmidele rakendatakse pinge (signaal) ΔU_{sis}, siis võre potentsiaal vastavalt tõuseb või langeb, mis kutsub esile anoodvoolu muutuse ΔI_a võrra ning väljandpinge muutuse

$$\Delta U_{välj} = \Delta I_a r_{välj}.$$



Joon. 10-24. Elektronlampvõimendaja skeem.

Väljandpinge juurdekasvu ja sisendpinge juurdekasvu suhet nimetatakse dünaamiliseks võimendusteguriks.

$$\mu_{dün} = \frac{\Delta U_{välj}}{\Delta U_{sis}} = \mu_{st} \frac{r_{välj}}{r_0 + r_{välj}}.$$

Niisiis põhjustab iga sisendpinge muutus $\mu_{dün}$ korda suurema väljandpinge muutuse. Mida suurem on takistus $r_{välj}$, võrreldes lambi sisetakistusega r_s, seda enam läheneb dünaamiline võimendustegur staatilisele.

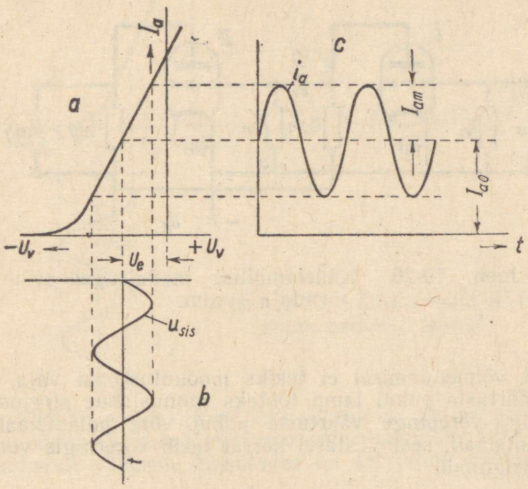
Joonisel 10-25 on kujutatud lambi staatiline anoodvooluvõrepinge tunnusjoon (võrekarakteristik) *a* ja sisendpinge (signaali) kõver *b*. Nende kahe kõvera alusel on ehitatud lambi anoodvoolu kõver *c*.

Võimendatav siinuseline sisendpinge on rakendatud võre ja katoodi vahele (joon. 10-24). Seejuures saadakse anoodringis pulseeriv vool (kõver *c*), mis on kogu aeg ühesuunaline ja suuruselt muutuv.

See vool koosneb kahest komponendist: alaliskomponent I_{a0} ja vahelduvkomponent $I_{am} \sin \omega t$:

$$i_a = I_{a0} + I_{am} \sin \omega t.$$

Võimendusefekti määrab selle voolu vahelduvkomponendi väärtus ning vahelduvkomponendi poolt väljandtakistusel tekitatud pingelangu vahelduvkomponent $r_{välj}\, I_{am} \sin \omega t$, mis kujutab endast $\mu_{dün}$ korda võimendatud sisendpinget.



Joon. 10-25. Anoodvoolu kõver ja selle saamine.

Kui ühe lambi võimendusest ei jätku, siis kasutatakse kahe- või kolmelambilist võimendajat.

Sel juhul on esimese lambi väljandpinge teise lambi sisendpingeks jne. Viimane lamp on tavaliselt ette nähtud vajaliku võimsuse saavutamiseks väljandis.

Üldine võimendustegur võrdub üksikute võimendusastmete võimendustegurite korrutisega:

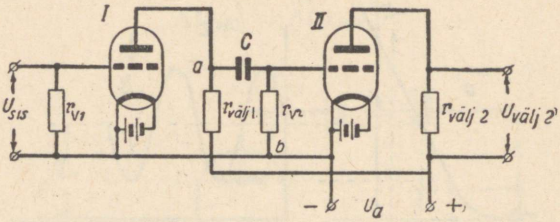
$$\mu_{dün} = \mu_{dün1}\, \mu_{dün2}.$$

Sõltuvalt sellest, kuidas esimese astme anoodring teise astme võreringiga sidestatakse, liigitatakse võimendajaid järgmiselt: takistussidestuses, paispoolsidestuses ja transformaatorsidestuses võimendajad.

Joonisel 10-26 on antud kaheastmelise takistussidestuses võimendaja skeem.

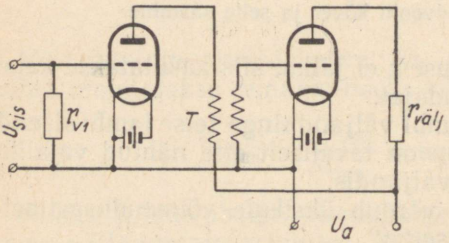
Siin, samuti nagu skeemil 10-24, põhjustab takistusele r_{v1} rakendatud sisendpinge lambi anoodahelas pulseeriva voolu. Selle voolu alaliskomponent läbib väljandtakistuse $r_{välj1}$. Teise lambi võreahelasse (takistusele r_{v2}) see vool ei pääse, sest astmete vahel asub eralduskondensaator C. Esimese lambi anoodvoolu vahelduvkomponent läbib kondensaatori C ning takistuse r_{v2}. Selle voolukomponendi poolt takistusel r_{v2} tekitatud pinge, mis kujutab endast esimese lambi poolt võimendatud pinget, antakse teise lambi võrele ning võimendatakse väärtuseni $U_{välj2}$.

Trafosidestuses võimendajal (joon. 10-27) on rida eeliseid võrreldes teiste skeemidega. Siin on esimese lambi väljandtakistus asendatud astmetevahelise trafo primaarmähisega. Trafo sekundaarmähis on ühendatud teise lambi võre ja katoodi vahele. Trafo kasutamise tõttu (ülekandeteguriga 3—5) üldine võimendustegur suureneb.

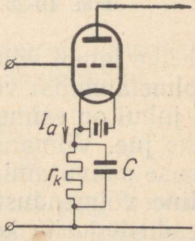


Joon. 10-26. Kahelambilise madalsagedusvõimendaja skeem.

Selleks et võimendamisel ei tekiks moonutusi, on vaja, et 1) kõigi võrepinge väärtuste puhul lamp töötaks tunnusjoone sirgjoonelises osas ning 2) kõigi võrepinge väärtuste puhul võre potentsiaal ei ületaks katoodi potentsiaali, sest vastasel korral tekib võreringis vool, mis moonutab sisendsignaali.



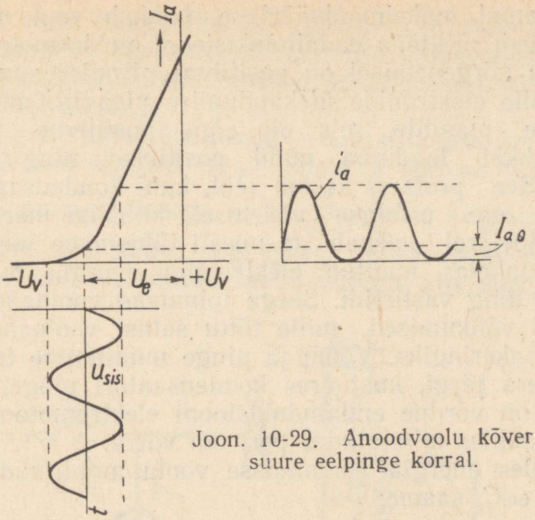
Joon. 10-27. Transformaatorsidestuses võimendaja skeem.



Joon. 10-28. Eelpinge saamine anoodvoolu abil.

Nende tingimuste täitmiseks vähendatakse võre potentsiaali teatud kindla väärtuse võrra, mida nimetatakse võre-eelpingeks. Võre-eelpinget saadakse eelpingepatareist (joon. 10-24) või kasutatakse selleks pingelangu, mis tekib takistuses r_k anoodvoolu mõjul (joon. 10-28). Rööbiti selle takistusega ühendatud kondensaatori ülesandeks on siluda pinge pulsatsiooni, mis on tingitud anoodvoolu pulseerimisest.

Joonisel 10-25 on eelpinge valitud nii, et kõikidel võrepinge väärtustel lamp töötaks tunnusjoone «negatiivses» sirgjoonelises osas. Sel juhul jälgib anoodvoolu vahelduvkomponent täpselt sisendpinge kõverat ning võimendus on moonutusteta. Puuduseks on siin asjaolu, et anoodvoolu suure alaliskomponendi tõttu kujuneb skeemi kasutegur väikseks (umbes 25%).

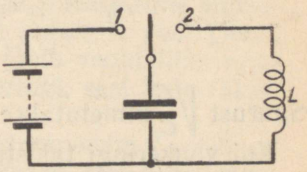


Joon. 10-29. Anoodvoolu kõver suure eelpinge korral.

Joonisel 10-29 on võre-eelpinge valitud suurem kui eelmisel juhul. Selle tagajärjel anoodvoolu vahelduvkomponent moonutub, kuid alaliskomponent on tunduvalt väiksem. Kasutegur on sel juhul suurem.

10-8. Lampgeneraator

Kõrgsagedusvoolu (üle 1 kHz) saamiseks kasutatakse lampgeneraatoreid. Lampgeneraator koosneb elektronlambist ja võnkeringist. Vaatleme võnkeringis (joon. 10-30) esinevaid nähtusi laetud kondensaatori tühjendamisel läbi tähtsusetult väikese aktiivtakistusega pooli.



Joon. 10-30. Võnkering.

Aja alghetkel, kui kondensaatori pinge on U_{Cm}, on tema elektrivälja energia $W_{Cm} = \frac{CU_{Cm}^2}{2}$. Kui lüliti lülitatakse asendisse *2*, hakkab kondensaator tühjenema ning võnkeringis tekib vool. Seejuures kondensaatori pinge langeb ning elektrivälja energia muutub magnetvälja energiaks. Vool tugevneb ning saavutab kondensaatori tühjenemise ($u_C = 0$) hetkeks oma maksimaalväärtuse. Sellele vastab ka maksimaalne energia võnkeringi magnetväljas:

$$W_{Lm} = \frac{LI_m^2}{2} = \frac{CU_{Cm}^2}{2}.$$

Saavutanud maksimaalväärtuse, hakkab vool nõrgenema. Voolu püüab säilitada endainduktsiooni elektromotoorne jõud, mis voolu nõrgenemisel on positiivne. Endise suunaga vool kutsub esile elektronide ülekandumise plaadilt, mis oli enne negatiivne, plaadile, mis oli enne positiivne. Seega esimene hakkab laaduma nüüd positiivselt ning teine negatiivselt. See protsess kestab seni, kuni kondensaatori pinge saavutab oma esialgse väärtuse, kuid on märgilt vastupidine. Seejärel hakkab ta uuesti tühjenema jne. Vaadeldud vooluahelas muutub elektrivälja energia magnetvälja energiaks ning vastupidi. Seega toimuvad vooluahelas mittesumbuvad võnkumised, mille tõttu sellist vooluahelat nimetatakse võnkeringiks. Voolu ja pinge muutumine toimub siin siinuskõvera järgi, kusjuures kondensaatori pinge, mis igal ajahetkel on võrdne endainduktsiooni elektromotoorse jõuga, on voolu suhtes nihutatud $\frac{1}{4}$ perioodi võrra.

Asendades energia võrrandisse voolu amplituudi avaldise $I_m = U_{Cm}\,\omega_0 C$, saame:

$$\frac{LU_{Cm}^2\omega_0^2C^2}{2} = \frac{CU_{Cm}^2}{2},$$

millest võnkeringi omavõnke-nurksagedus

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Voolu amplituud võnkeringis

$$I_m = U_{Cm}\,\omega_0 C = U_{Cm}\frac{1}{\sqrt{LC}}\,C = \frac{U_{Cm}}{\sqrt{\frac{L}{C}}}.$$

Suurust $\sqrt{\frac{L}{C}}$ nimetatakse võnkeringi l a i n e t a k i s t u s e k s.

Kui võnkeringi takistus $r > 0$, siis võnkumised aja jooksul sumbuvad. Mittesumbuvate võnkumiste saavutamiseks tuleb võnkeringi väljastpoolt juurde anda niipalju energiat, kuipalju kulutatakse aktiivtakistuses. Seejuures peab igal ajahetkel võimsuskadu takistuses olema võrdne väljast juurdeantava võimsuse hetkväärtusega. Kui seejuures võetakse võnkeringist osa energiat tarbijate toiteks, siis peab vastavalt samapalju energiat väljast juurde andma.

Lampgeneraator muundab alalisvooluenergia kõrgsageduslikuks energiaks.

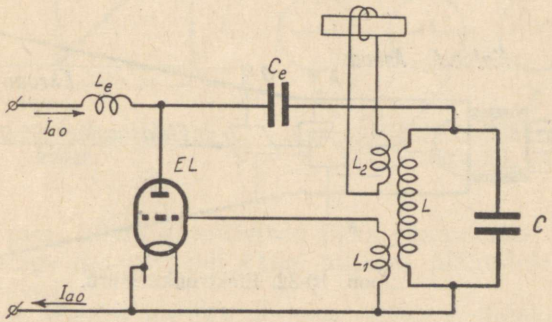
Joonisel 10-31 on antud lampgeneraatori skeem.

Generaator koosneb kolme elektroodiga lambist *EL*, võnke-

ringist LC, tagasisidepoolist L_1, poolist L_2, millest toidetakse tarbijat, eralduskondensaatorist C_e ning eralduspoolist L_e.

Lampgeneraatori toiteallikaks on anoodpatarei, alalisvoolugeneraator või alaldaja.

Kui lampgeneraator ühendada vooluallikaga, laadub kondensaator teatud pingeni U_{Cm}. Seejärel tekivad võnkeringis võnkumised omasagedusega $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ ning tagasisidepoolis L_1 indutseeritakse sama sagedusega elektromotoorne jõud. Kuna pool L_1 on ühendatud lambi võrega, siis võrepinge on



Joon. 10-3i. Lampgeneraatori skeem.

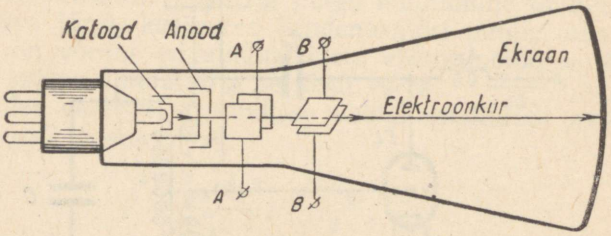
määratud poolis L_1 indutseeritud elektromotoorse jõuga. Kui lambi küte on sisse lülitatud (küte lülitatakse sisse enne anoodpinge sisselülitamist), läbib anoodahelat pulseeriv vool (joon. 10-25). Selle voolu alaliskomponent I_{a0} läbib vooluallika ning eralduspooli, kuid ei suuda läbida võnkeringi, sest seda takistab eralduskondensaator C_e.

Samal ajal läbib anoodvoolu vahelduvkomponent $I_{am} \sin \omega_0 t$ võnkeringi, kuid ei pääse toitevoolu allikasse, sest pooli reaktiivtakistus ($L_e W_0$) on kõrgel sagedusel suur. Anoodvoolu vahelduvkomponent, olles faasis pingega võnkeringis, on pooli L voolu aktiivkomponendiks ning kompenseerib energiakaod võnkeringis, võimaldades seega mittesumbuvate võnkumiste tekkimist.

Tarbija saab energiat võnkeringist LC viimasega induktiivselt sidestatud pooli L_2 kaudu.

10-9. Elektronkiiretoru

Viimasel ajal on mitmetes tehnikaharudes (raadiolokatsioon, televisioon, kiireltmuutuvate suuruste mõõtmine jne.) järjest ulatuslikumat rakendamist leidnud elektronkiiretoru. Elektronkiiretoru kest kujutab endast ühest otsast laienevat kolbi (joon. 10-32). Kolvi lai põhi on kaetud fluorestseeriva seguga ning moodustab toru ekraani. Joonisel 10-32 vasakul asub «elektronkahur» (elektronide allikas), mis koosneb metallsilindris asetsevast katoodist ning 1—3 mm avaga diafragmakujulisest metallanoodist.



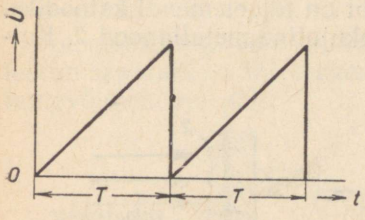
Joon. 10-32. Elektronkiiretoru.

Anoodi ja katoodi vahelise elektrivälja ülesandeks on kiirendada katoodist väljuvate elektronide liikumist. Tänu katoodi ümbritsevale metallsilindrile väljuvad elektronid kitsa kimbuna — elektronkiirena.

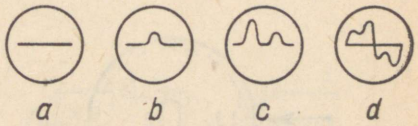
Läbinud anoodi ava, satub kiir ekraanile. Ekraani selles kohas, kuhu kiir langeb, tekib helendus (helendav tähn). Elektronkiire tee kulgeb läbi kahe paari hälvitusplaatide vahelt. Kui pingestada plaadid *AA*, hälbib (kaldub) kiir elektrivälja jõudude mõjul horisontaalsihis. Plaatidele *BB* rakendatud pinge hälvitab kiirt vertikaalsihis.

Plaadid *AA* pingestatakse tavaliselt võrdeliselt ajaga muutuva hälvituspingega (erigeneraatorist). Selle nn. «hammaspinge» graafik on näidatud joonisel 10-33. Perioodi algul hälvituspinge tõuseb ühtlaselt ning elektronkiir liigub ekraanil sujuvalt vasakult paremale. Perioodi lõpus pinge langeb järsult nullini ning kiir liigub peaaegu hetkeliselt algasendisse. Seejärel kordub kogu protsess uuesti. Kuna kiir liigub ekraanil mitmekordselt sama trajektoori mööda, jääb ekraanil püsima hele horisontaaljoon (joon. 10-34, *a*). Kui kiire sujuva liikumise ajal ekraanil ilmub plaatidele *BB* lühiajaline pingeimpulss, siis plaatidevahelise elektrivälja toimel hälbib kiir

lühiajaliselt vertikaalsuunas. Pingeimpulsside perioodilisel kordumisel sagedusega, mis võrdub hammaspinge sagedusega, tekib kiire hälbimine ekraanil vertikaalsuunas, mis pidevalt kordub samas ekraani kohas. Ekraani valgusinertsi tõttu jääb ekraanile püsima «hambaga» valgusjoon (joon. 30-34, *b*), mis on tingitud pingeimpulsist.



Joon. 10-33. Hammaspinge kõver.



Joon. 10-34. Elektronkiire jälg toru ekraanil.

Kõver joon. 10-34, *c*, millel on kaks «hammast», näitab, et hammaspinge iga perioodi vältel antakse plaatidele *BB* kaks pingeimpulssi.

Elektronkiiretoru on tähtsaimaks osaks radiolokaatoris — seadeldises, mis võimaldab elektromagnetiliste lainete abil kindlaks teha väljaspool nähtavuse piire asetseva eseme asukohta. Selleks suunatakse elektromagnetilised lained eseme oletatava asukoha suunas. Jõudnud esemeni, peegeldub osa kiiri tagasi. Lainete väljasaatmise ja peegeldunud lainete tagasisaabumise hetkedel tekivad plaatidel *BB* pingeimpulsid. Seega sõltub heleda joone hammaste tippude vahekaugus eseme ja radiolokaatori vahelisest kaugusest, sest elektromagnetiliste lainete levimiskiirus on teatavasti 300 000 km/sec.

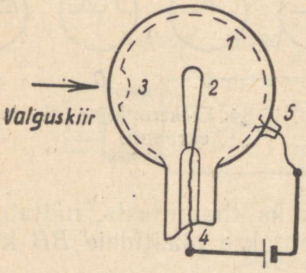
Elektronkiiretoru on tähtsaimaks osaks ka elektronostsillograafis, mis võimaldab jälgida ja registreerida kiiresti muutuvaid elektrilisi suurusi.

Andes plaatidele *AA* (joon. 10-32) hammaspinge, liigub elektronkiir ekraanil konstantse kiirusega vasakult paremale hammaspinge iga perioodi jooksul ning ekraanil püsib horisontaalne joon.

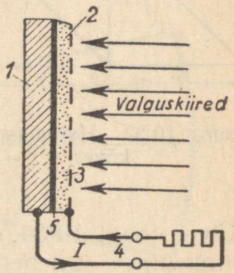
Kui hälvitusplaadid *BB* pingestada vahelduvpingega, mille sagedus võrdub hammaspinge sagedusega, siis kaldub kiir selle pinge mõjul perioodi igal hetkel vertikaalsihis selle pinge hetkväärtusega võrdelise suuruse võrra. Seega kahe pinge mõjul joonistab kiir ekraanile vahelduvvoolu kõvera kuju (joon. 10-34, *d*).

10-10. Fotoelemendid ja fotoreleed

Fotoelemendi töö põhineb fotoelektrilisel efektil. Fotoelektrilise efekti nähtust uuris möödunud sajandi lõpus A. G. Stoletov. Fotoelement koosneb klaaskolvist (joon. 10-35), mille sisepind, välja arvatud «aken» *3*, on kaetud hõbedaga *1*. Hõbedale on peale kantud leelismetalli (kaaliumi, naatriumi või tseesiumi) õhuke kiht. Hõbedakiht on fotoelemendi katoodiks. Kolvi keskel asub rõnga- või kettakujuline metallanood *2*. Kolvis on tekitatud vaakuum.



Joon. 10-35. Välisfotoefektiga fotoelement.



Joon. 10-36. Ventiilfotoefektiga fotoelement.

Kui pingestada fotoelemendi klemmid, tekib anoodi ja katoodi vahele elektriväli. Kui fotoelemendi sisepinnale langeb valgus, siis valguskiirte energia mõjul väljuvad leelismetalli aatomitest elektronid. Elektrivälja toimel liiguvad need elektronid katoodilt anoodile ning fotoelemendi vooluahelas kulgeb vool niikaua, kuni fotoelementi valgustatakse.

Fotoelektriline efekt esineb kõigil metallidel. Vask, raud ja plaatina on tundlikud ainult ultravioletkiirte suhtes, kuna nähtava valguse suhtes on tundlikud ainult leelismetallid, mida kasutataksegi fotoelementide katoodide valmistamiseks.

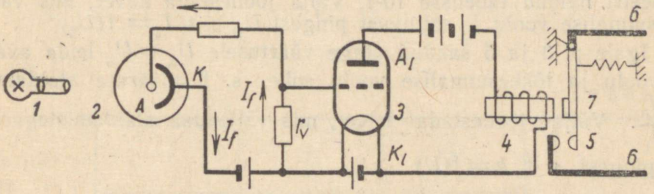
Fotoelementide juhtivuse suurendamiseks on nad tihti täidetud inertse gaasiga, tavaliselt argooniga. Kuna anoodi ja katoodi vahel valitseva kõrge pinge korral muutub gaas ise juhtivaks, siis gaasiga täidetud fotoelemente kasutatakse pingel mitte üle 250—300 V.

Peale ülalmainitute on kasutamist leidnud ka ventiilefektiga fotoelemendid, millede ehitus on analoogiline kuproksalaldajatega.

Paksule metallplaadile *1* (joon. 10-36) on kantud üliõhuke

läbipaistev pooljuhikiht *2*, millele kontakti saamiseks on asetatud metallvõrk *3*. Kui tõkkekihti *5* valgustada läbi selle võrgu, siis tekib fotoelemendi vooluahelas vool, mille suund välisvooluahelas on metallist pooljuhi poole. Sama elemendi kasutamisel alaldajana on aga voolu suund vastupidine. Ventiilefektiga seleen- ja kuproksfotoelementide tundlikkus valge valguse suhtes on peaaegu sama mis välise fotoefektiga fotoelementidel.

Fotoelementide vool on väga nõrk ning käivitus- ja reguleerimisaparatuuri töölerakendamiseks tuleb seda võimendada lampvõimendaja abil.



Joon. 10-37. Fotorelee skeem.

Joonisel 10-37 on näidatud lihtsaima fotorelee skeem. Lambi *1* valgus on suunatud läätsede abil fotoelemendi *2* aknasse. Selle tulemusel läbib fotoelemendi vooluahelat vool I_f joonisel noolega näidatud suunas. Võimenduslambi võreahela takistusel r_v tekib pingelang $I_f r_v$, mille tagajärjel võre potentsiaal jääb lambi katoodi K_1 potentsiaalist madalamaks. Anoodahelas voolu ei ole, mistõttu ei ole voolu ka kontaktori *4* poolis. Kontaktori töökontaktid *5* on avatud. Seega pole voolu ka töövooluahelas *6,6*.

Kui valgusallika ja fotoelemendi vahele ilmub mingi ese, mis katkestab valguskiire, siis vool I_f kaob, pingelang $I_f r_v$ muutub nulliks ning võre potentsiaal võrdseks katoodi K_1 potentsiaaliga. Võimendaja anoodahelas tekib vool, mis läbib kontaktori *4* pooli. Ankur *7* tõmmatakse külge, töökontaktid *5* sulguvad ning töövooluahelat *6* läbib vool.

10-11. Laboratoorne töö. Pooljuhtalaldajad

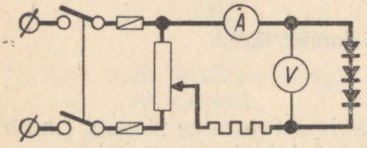
Enne töö tegemisele asumist tutvuda raamatu lõpus toodud lisaga ja § 10-4, *c*.

Tööplaan

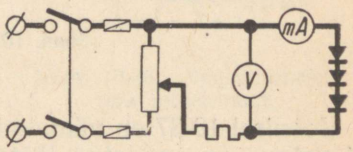
1. Tutvuda tööks vajalike riistadega ning üles märkida nende tehnilised andmed. Kindlaks teha alaldajate nimivool ja nimipinge.
2. Koostada skeem vastavalt joonisele 10-38 ning lasta see juhendajal kontrollida.
3. Mitmesugustel pinge väärtustel märkida voltmeetri ja ampermeetri näidud tabelisse 10-1 ning välja joonestada kõver, mis väljendab avasuunalise voolu I_a sõltuvust pingest U_a, s. t.

$$I_a = f(U_a).$$

4. Koostada skeem vastavalt joonisele 10-39 ning lasta see juhendajal kontrollida.
5. Samadel pinge väärtustel mis p. 3 märkida milliampermeetri ja voltmeetri näidud tabelisse 10-1. Välja joonestada kõver, mis väljendab tõkkesuunalise voolu I_t sõltuvust pingest U_t, s. t. $I_t = f(U_t)$.
6. Igale p. 3 ja 5 saadud pinge väärtusele $U_a = U_t$ leida avasuunalise voolu ja tõkkesuunalise voolu suhe, s. t. määrata alaldamistegur $k = \frac{I_a}{I_t}$. Välja joonestada kõver, mis väljendab alaldamisteguri sõltuvust pingest, s. t. $k = f(U)$.

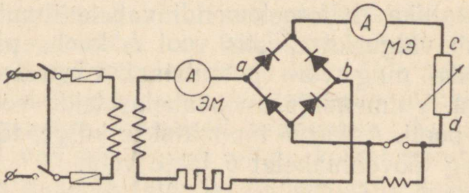


Joon. 10-38. Skeem alaldaja avasuunalise voolu kõvera saamiseks.



Joon. 10-39. Skeem alaldaja tõkkesuunalise voolu kõvera saamiseks.

7. Koostada skeem (joon. 10-40) ning lasta see juhendajal kontrollida.
8. Mitmesugustel koormustakistuse väärtustel ühepooluselise lüliti suletud olekus kanda tabelisse 10-2 vahelduvvoolu efektiivväärtust ja alaldatud voolu keskväärtust mõõtvate ampermeetrite näidud.



Joon. 10-40. Skeem laboratoorse töö juurde.

Iga tabelisse kantud väärtuse jaoks leida suhe $\frac{I}{I_k}$.

9. Ühendada klemmidele *ab* (joon. 10-40) elektronostsillograaf ning jälgida ja välja joonestada alaldaja sisendis esineva vahelduvpinge kõver.

Ühendada klemmidele *cd* (joon. 10-40) elektronostsillograaf ning suletud ühepooluselise lüliti puhul jälgida alaldatud pinge kõverat tarbija klemmidel. Korrata katset lüliti avatud olekus. Mõlema juhu kohta välja joonestada pinge kõverad.

Tabel 10-1

Katse jrk. nr.	$U_a = U_t$	I_a	I_t	$k = \frac{I_a}{I_t}$	Märkusi
	V	A	mA	—	

Tabel 10-2

Katse jrk. nr.	I	I_k	$\frac{I}{I_k}$	Märkusi
	A	A	—	

ÜHETEISTKÜMNES PEATÜKK

ELEKTRIAJAMID JA JUHTIMISAPARATUUR

11-1. Üldmõisted

Seoses tootmisprotsesside järjest suureneva mehhaniseerimisega on töömehhanismide (tööpinkide, pumpade, ventilaatorite, kraanade jt.) käitamiseks hakatud üha ulatuslikumalt rakendama elektriajameid.

Elektriajam koosneb kolmest põhiosast: elektrimootorist, mootori juhtimisaparatuurist ja mootori ning töömasina vahelisest mehaanilisest ülekandeseadmest.

Elektriajami kasutamine tõstab tööviljakust, parandab toodete kvaliteeti ja kergendab töölise tööd. Edaspidine tööviljakuse tõus on saavutatav elektriajamite ja tööprotsessi automatiseerimisega.

Väga suur tähtsus on töömehhanismi käitava mootori võimsuse õigel valikul. Kui mootori võimsus on väike, hakkab ta üle kuumenema ning ei arenda vajalikku pöördemomenti.

Liiga võimsa mootori valikul läheb kogu seade kallimaks ning kasutegur ja cos φ vähenevad.

Mootorite puhul eristatakse järgmisi võimsusi: nimivõimsus, hetkeline võimsus ja lühiajaline võimsus.

Nimivõimsus on võimsus, mis on märgitud sildiandmetes ja mida mootor suudab pidevalt arendada, ilma et tema temperatuur tõuseks üle isolatsioonile lubatud piiri.

Hetkeliseks loetakse võimsust, mida mootor võib arendada mõne sekundi jooksul. Hetkelise võimsuse määravad masina konstruktsioon ja masina elektromagnetilised omadused.

Lühiajaliseks loetakse võimsust, mida mootor suudab arendada 15, 30, 60 minuti jooksul soojenemata üle isolatsioonile lubatud piiri.

Niisugusteks ülekoormusteks ettenähtud mootoreil on sildiandmeis märgitud lühiajaline võimsus ja lubatud töötamisaeg.

11-2. Mootori võimsuse valik püsiva töörežiimi korral

Püsivaks nimetatakse sellist töörežiimi, mispuhul mootori töötamiskestus on niivõrd pikk, et mootori temperatuur omandab püsiva väärtuse.

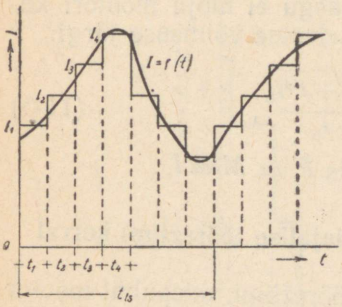
Mootori võimsuse määramiseks on vaja teada töömasina koormusgraafikut, s. t. tarbitava võimsuse või voolu sõltuvust ajast $P = f(t)$ või $I = f(t)$ (joon. 11-1). Lihtsamal juhul, kui koormus on konstantne, on mootori võimsus määratav käsiraamatutes toodud valemite abil. Näiteks ventilaatorit käitava mootori võimsus

$$P = \frac{Q_{sec} H}{102 \eta_v \eta_ü} \text{ kW},$$

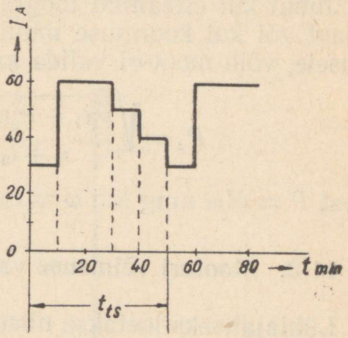
kus Q_{sec} — ventilaatori tootlikkus m³/sec;
H — kogusurve mm H_2O (veesamba millimeetrites);
η_v — ventilaatori kasutegur (väikestel ventilaatoritel $\eta_v = 0{,}3 - 0{,}5$, suurtel $\eta_v = 0{,}4 \div 0{,}7$);
$\eta_ü$ — ventilaatori ja mootori vahelise ülekande kasutegur.

Mootori koormatavuse määrab tema soojenemine. Mootori võimsuse valik püsiva muutuva koormuse korral toimub ekvivalentse voolu järgi. Ekvivalentseks nimetatakse niisugust muutumatut voolu, mis, läbides mootori mähiseid kogu tööperioodi vältel, soojendab neid sama temperatuurini kui tegelik, muutuv vool. Mootori etteantud koormusgraafiku puhul leitakse ekvivalentne vool järgmiselt.

Joonisel 11-1 toodud graafik $I = f(t)$ asendatakse astmelise kõveraga. Sel juhul aja t_1, t_2 jne. vältel tarbib mootor vastavalt voolud I_1, I_2 jne. Siis Lenz-Joule'i seaduse alusel



Joon. 11-1. Koormusgraafik.



Joon. 11-2. Koormusgraafik.

$$I_e^2 r t_{ts} = I_e^2 r(t_1 + t_2 + \ldots + t_n) = I_1^2 r t_1 + I_2^2 r t_2 + \ldots + I_n^2 r t_n,$$

kus t_{ts} — perioodiliselt muutuva koormuse ühe tsükli aeg;
r — mootori mähiste takistus.
Siit järeldub, et ekvivalentne vool

$$I_e = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \ldots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \ldots + t_n}}. \qquad (11\text{-}1)$$

See ekvivalentne vool ongi antud töörežiimi puhul vajaliku mootori nimivooluks.

Näide 11-1. Mootor töötab joon. 11-2 toodud graafiku kohaselt. Valida mootori nimivool.

$$I_n = I_e = \sqrt{\frac{30^2 \cdot 10 + 60^2 \cdot 20 + 50^2 \cdot 10 + 40^2 \cdot 10}{10 + 20 + 10 + 10}} = 49{,}5 \text{ A}.$$

Seda voolu tuleb võrrelda mootori maksimaalse vooluga (graafiku järgi). Suhe $\frac{I_{max}}{I_e}$ peab olema väiksem või võrdne antud mootori kohta kataloogis antud väärtusega. Vastasel korral tuleb valida suurema nimivooluga mootor.

Kui mootori magnetvoog on konstantne (sünkroonmootorid ja haruvoolumootorid), siis võib valida mootori ka ekvivalentse momendi järgi:

$$M_e = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \ldots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \ldots + t_n}}, \qquad (11\text{-}2)$$

sest $M = C\Phi I$ ja kui $\Phi = \text{const}$, siis $M \equiv I$.

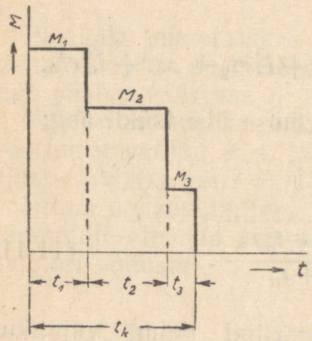
Juhul kui etteantud töögraafik kujutab võimsuse sõltuvust ajast või kui koormuse muutus peaaegu ei mõju mootori kiirusele, võib mootori valida ka ekvivalentse võimsuse järgi:

$$P_e = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \ldots + P^2 t_n}{t_1 + t_2 + \ldots + t_n}}, \qquad (11\text{-}3)$$

sest $P = M\omega$ ning kui $\omega = \text{const}$, siis $P \equiv M \equiv I$.

11-3. Mootori võimsuse valik lühiajalise töörežiimi korral

Lühiajaliseks loetakse niisugust töörežiimi, mispuhul mootor töötab pidevalt mitte üle 120 minuti ja sellele järgneb seisak, mille jooksul mootor jõuab jahtuda ümbritseva keskkonna temperatuurini (joon. 11-3). Mootor valitakse ekvivalentse momendi (11-2) või ekvivalentse voolu valemi järgi, kusjuures valemis (11-2) töötamise aeg $t_1 + t_2 + \ldots + t_n = t_k$. Seejärel valitakse kataloogist mootor, mis on ette nähtud lühiajaliseks töötamiseks aja t_k vältel. Seejuures peab mootori nimimoment M_n olema suurem või võrdne ekvivalentse momendiga M_e, mis on saadud valemist 11-2. Mootorit tuleb kontrollida hetkelise ülekoormuse suhtes (vt. § 11-2).



Joon. 11-3. Mootori lühiajalise töötamise graafik.

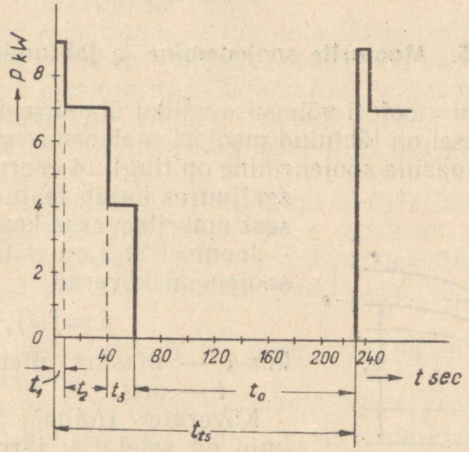
11-4. Mootori võimsuse valik vaheajalise töörežiimi korral

Vaheajaliseks nimetatakse niisugust töörežiimi, mispuhul töötamine regulaarselt vaheldub seisakutega, kuid seisuaja vältel mootor ei jõua jahtuda ümbritseva keskkonna temperatuurini. Niisuguses režiimis töötavad kraanade, vintside ja tõstukite mootorid.

Joonisel 11-4 on toodud vaheajalise töörežiimi graafik. Mootor töötab aja $t_1 + t_2 + t_3$ vältel. Seisuaeg on t_0. Seega kogu

tsükli aeg $t_{ts} = t_1 + t_2 + t_3 + t_0$. Tööaja ja tsükliaja suhet nimetatakse suhteliseks töötamisajaks ning tähistatakse $T_{\%}$ (vene k. ПВ. *Toim.*). Niisiis

$$T_{\%} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_0} \cdot 100\%. \qquad (11\text{-}4)$$



Joon. 11-4. Mootori vaheajalise töötamise graafik.

Mootoreid valmistatakse kolmele $T_{\%}$ väärtusele: 15, 25 ja 40%. Sama gabariidi korral on mootori nimivõimsus seda väiksem, mida suurem on $T_{\%}$:

$$P_{n15} > P_{n25} > P_{n40}.$$

Ekvivalentset võimsust arvutatakse valemi (11-3) järgi ning mootor valitakse kraanamootorite kataloogist vastavalt suhtelisele töötamisajale $T_{\%}$.

Näide 11-2. Valida joonisel 11-4 toodud graafiku järgi töötava mootori nimivõimsus.

$$P_e = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3}{t_1 + t_2 + t_3}} = \sqrt{\frac{9^2 \cdot 5 + 7^2 \cdot 35 + 4^2 \cdot 20}{5 + 35 + 20}} = 5{,}75 \text{ kW};$$

$$T_{\%} = \frac{5 + 35 + 20}{5 + 35 + 20 + 170} \cdot 100\% = 26\%.$$

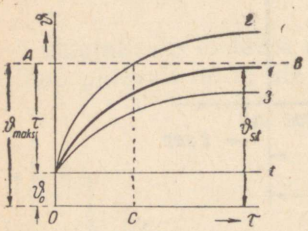
Vastavalt kataloogiandmeile võib valida kraanamootoriks $T_{\%} = 25\%$ kolmefaasilise asünkroonmootori võimsusega $P = 5{,}6$ kW või alalisvoolupeavoolumootori võimsusega $P = 6$ kW.

Kui leitud $T_{\%}$ ei vasta kataloogis olemasolevaile, siis tuleb mootori võimsus ümber arvutada lähima standardse $T_{\%}$ väärtusele:

$$P_{e2} = P_{e1} \sqrt{\frac{T_{\%1}}{T_{\%2}}}.$$

11-5. Mootorite soojenemine ja jahtumine

Elektriajami mootori võimsuse valiku ülalkirjeldatud meetodite käsitlemisel on lähtutud mootori soojenemisest töötamisel. Iga elektrimasina soojenemine on tingitud energiakadudest; sealjuures hajub teatud osa soojusest ümbritsevasse keskkonda.



Joon. 11-5. Mootori soojenemiskõverad mootori töötamisel konstantse koormusega.

Joonisel 11-5 on esitatud masina soojenemiskõverad

$$\tau = f(t),$$

kus τ — masina ületemperatuur;
t — aeg.

Kõverate (näiteks kõvera *1*) kuju on seletatav järgmiselt: töötamise eel masina temperatuur ϑ võrdub ümbritseva keskkonna temperatuuriga ϑ_0. Mootori sisselülitamisel, kui temperatuurivahe $\tau = \vartheta - \vartheta_0$ on väike, kulub suurem osa tekkivast soojusest masina temperatuuri tõstmiseks ja vaid väike osa sellest soojusest hajub ümbritsevasse keskkonda. Sellega on seletatav masina temperatuuri esialgne kiire tõus töötamise algperioodil.

Aja jooksul masina temperatuur tõuseb. Temperatuurivahe τ suureneb ja keskkonda kanduv soojushulk suureneb. Ajaühikus masinasse jääv soojushulk seetõttu väheneb ning masina temperatuuri tõus aeglustub.

Masina teatud temperatuuril tekib stabiilne olukord, mispuhul kogu soojushulk, mis masinas ajaühikus tekib, siirdub ümbritsevasse keskkonda ning masina enda temperatuur enam ei tõuse.

Masina edasisel töötamisel antud konstantse koormusega jääb tema temperatuur muutumatuks. Niisugust olukorda nimetatakse masina soojuslikuks tasakaaluks. Seejuures saavutatud temperatuuri nimetatakse stabiilseks temperatuuriks (ϑ_{st}).

Kui mootor töötab mingi teise, suurema või väiksema koormusega, jäävad soojenemiskõverad sarnasteks kõverale *1* (joon. 11-5) ja kulgevad kas allpool või ülalpool kõverat *1* (kõverad *2* ja *3*).

Ülalmainitust selgub, et masina stabiilne temperatuur on mitmesugustel koormustel erinev.

Mootori töötemperatuur ei tohi olla juhuslikult valitud, sest kui valime liiga madala töötemperatuuri, siis on masina tööiga küll pikk, kuid masin osutub liiga kalliks ja gabariitide poolest suureks. Vastupidi, valides kõrge töötemperatuuri, kuivab mähiste isolatsioon kiiresti ära ning liiga kõrge temperatuuri korral põleb läbi.

Lähtudes tingimustest, et mootorid oleksid ühelt poolt odavad ja kompaktsed ning teiselt poolt omaksid pikka tööiga (mõnikümmend aastat), on elektrimasinaehituse praktikas välja töötatud töötemperatuurid, mis rahuldavad kõiki neid nõudeid.

Mootorite töötemperatuuride normeerimisel on oluline kasutatava isolatsiooni liik.

Elektrimasinate standardi (ГОСТ 183-41) alusel on kõik isoleermaterjalid jaotatud viide klassi. Igale klassile on määratud maksimaalne lubatav temperatuur. Isoleermaterjalide astmestik on järgmine:

K l a s s A. Immutatud või õlis asetsevad kiudained (puuvill, siid, paber) ning emaillakid juhtmete katmiseks.

K l a s s B. Vilgukivist, asbestist ning teistest mineraalsetest ainetest tooted, mis sisaldavad orgaanilise päritoluga sideaineid.

K l a s s C. Vilgukivi ja klaas orgaaniliste sideaineteta, portselan, klaas, kvarts jts. materjalid.

K l a s s BC. Vilgukivist, klaasist ja asbestist tooted, kaetud kuumuskindla lakiga.

K l a s s CB. Vilgukivist, klaasist ja asbestist tooted, kaetud kuumuskindla lakiga, ilma A klassi isoleermaterjalideta.

Mida kuumuskindlam on isolatsioon, seda kõrgemal temperatuuril võib ta töötada.

Tabelis 11-1 on toodud väljavõtted elektrimasinate standardist (ГОСТ 183-41) koos igale isoleermaterjalide klassile lubatavate temperatuuridega.

Mootori soojenemine sõltub mitte ainult temas eraldunud soojushulgast, vaid ka eralduva soojuse eemalejuhtimise tingimustest. Seepärast pööratakse elektrimasinaehituses suurt tähelepanu jahutamise ja ventilatsiooni küsimustele.

Jahutusmeetodite poolest jagunevad masinad järgmisteks põhitüüpideks:

a) Loomuliku jahutusega masinad. Neil masinail ei ole spetsiaalseid jahutusseadmeid. Soojuse eemalejuhtimine on neis äärmiselt ebaintensiivne. Seetõttu tänapäeval loomuliku jahutusega masinaid peaaegu ei ehitata, välja arvatud väiksed, kuni kümnevatised masinad.

b) Omajahutusega masinad. Nendel masinatel asetseb masina ankru võllil ventilaator. Ankru pöörlemisel imeb ventilaator masinast soojenenud õhku välja. Teisest otsast suundub masinasse külm õhk ning läbib masina pikisuunas, jahutades seega nii pooluse- kui ka ankrumähiseid.

Tabel 11-1

Masina osad	Lubatavad ületemperatuurid, kui jahutusõhu temperatuur on kuni + 35°C			
	Isolatsioon klass A		Isolatsioon klass B	
	Termomeetri meetodil	Takistusmeetodil	Termomeetri meetodil	Takistusmeetodil
1. Kommutaatoriga ühendatud ankrumähised	60°C	65°C	75°C	85°C
a) Ühekihilised ergutusmähised	70°C	70°C	95°C	95°C
b) Turbogeneraatorite ergutusmähised ja asünkroonmasinate varrasmähisega rootorid, tingimusel, et uurdes ei ole üle kahe varda	—	70°C	—	95°C
2. Väikse takistusega mitmekihilised ergutusmähised ja kompensatsioonmähised	65°C	65°C	85°C	85°C
3. Isoleeritud, pidevalt lühistatud mähised	65°C	—	85°C	—
4. a) Isoleerimata, pidevalt lühistatud mähised	Nende osade ületemperatuur ei tohi mingil juhul tõusta nii kõrgele, et see ohustaks isolatsiooni			
b) Südamikud ja muud osad, mis ei puutu kokku mähistega				
5. Südamikud ja muud osad, mis puutuvad kokku mähistega	65° C A klassi isolatsioonile 85° C B klassi isolatsioonile			
6. Kontaktrõngad	70°C	—	90°C	—
7. Kommutaatorid	65°C	—	85°C	—
8. Liugelaagrid	45°C	—	45°C	—
9. Veerelaagrid	60°C	—	60°C	—

c) Võõrjahutusega masinad. Neisse antakse jahutusõhku eraldiasuvast ventilaatorist. Niisugust jahutusviisi kasutatakse võrdlemisi harva, nimelt eriti võimsate masinate puhul.

11-6. Elektrimasinate juhtimisaparatuur

Automatiseerimata juhtimise korral teostatakse kõik elektrimasina juhtimisoperatsioonid teenindava personali poolt käsitsi.

Selleks on mootori toiteahelasse üles seatud lülitid, kontrollerid ja reostaadid. Kaitseks ülekoormuse eest kasutatakse kaitsmeid ja automaatlüliteid.

Kui mootorite juhtimine toimub teenindava personali vahelesegamiseta, juhtimisaparatuuri abil, ning sõltub ainult aparaatide karakteristikutest ja nende seosest tootmisprotsessiga, siis nimetatakse seda automaatjuhtimiseks.

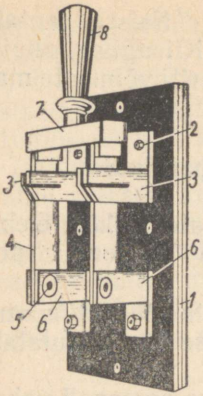
Automaatse juhtimise aparatuuri võib jaotada kolme rühma: kontaktorid — kaugjuhtimise teel sisse- ja väljalülitamise aparaadid; mootori juhtimisseadmete, s. t. kontaktorite, lülitite jne. tööd mõjutavad aparaadid — releed; komandoaparaadid — mille abil kas teenindav personal või töömasin ise mõjutab kaht esimest aparaatide rühma.

11-7. Vinnaklülitid

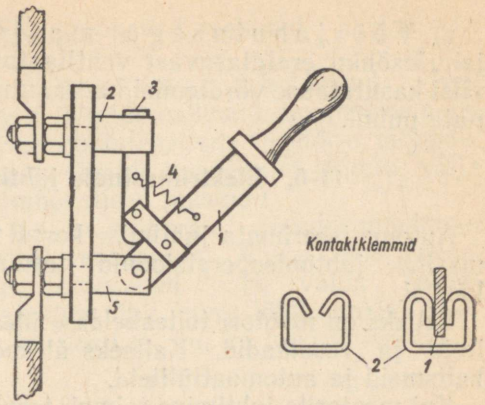
Vinnaklüliteid ja -ümberlüliteid kasutatakse generaatorite, mootorite ja teiste energiatarbijate käsitsi sisse- ja väljalülitamiseks. Neid kasutatakse nii vahelduvvoolu- kui ka alalisvooluseadmetes pingel kuni 500 V ning voolul kuni 1000 A. Alalisvooluseadmetes kasutatakse vinnaklüliteid ka suuremate voolude korral, kuigi väga harva.

Kahepooluseline vinnaklüliti on näidatud joonisel 11-6. Kaks omavahel isoleerliistuga *7* ühendatud metallriba (noad) *4* on käepideme *8* abil pööratavad telje *5* ümber. Joonisel 11-6 näidatud asendis asetsevad lüliti mõlemad metallnoad vetruvates kontaktklemmides *3*, ühendades ülemisi ja alumisi klemme *2* ja *6*, mille külge kinnitatakse juhtmed. Kogu seade on monteeritud isoleerplaadile *1*. Vooluahela katkestamisel tekib nugade *4* ja kontaktklemmide *3* vahel kaarleek, mille tagajärjel kontaktklemmide ja nugade metall osaliselt sulab.

Et vinnaklüliti peaks kauemini vastu, tuleb vooluahel katkestada võimalikult kiiresti. Sel eesmärgil kasutatakse sageli



Joon. 11-6. Kahepooluseline vinnaklüliti.

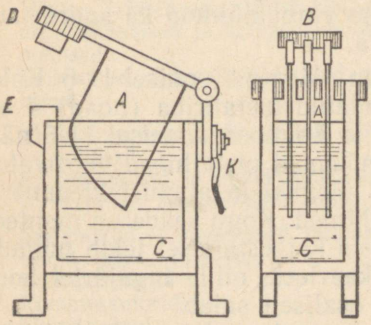


Joon. 11-7. Momentnugadega vinnaklüliti.

momentnugadega vinnaklüliteid. Joonisel 11-7 on katkestusnuga *1* ühendatud momentnoaga *3* vedru *4* abil. Vooluahela katkestamisel eralduvad kontaktklemmide *2* küljest esmalt katkestusnoad *1* ja alles seejärel, kui vedru pinge suureneb, eralduvad järsult momentnoad. Selle tagajärjel kaarleek venitatakse pikaks ja ta kustub kiiresti.

11-8. Käivitus- ja reguleerimisreostaadid

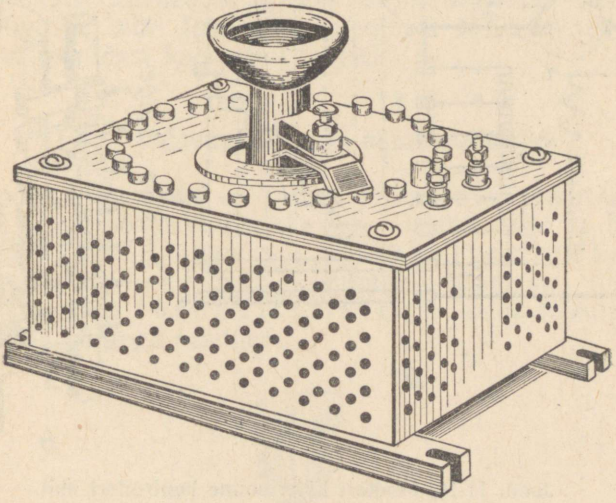
Käivitusreostaatideks nimetatakse reguleeritavaid takisteid, mis lülitatakse alalisvoolumootori ankruahelasse või asünkroonmootori rootoriahelasse käivitamise ajaks. Need reostaadid on ette nähtud vaid käivitamiseks, mistõttu kiiruse reguleerimiseks on nad kõlbmatud. Nad võivad olla kas vedelik- või traattakistid. Viimased on tavaliselt kas õhk- või õlijahutusega.



Joon. 11-8. Vedelikreostaat.

Joonisel 11-8 on näidatud vedelikreostaat asünkroonmootorite käivitamiseks. Kolm omavahel isoleeritud metallplaati *A*, mis on kinnitatud

isoleerliistu *B* külge ja painduvate juhtmete *K* abil rootori rõngaste külge, lastakse tiguülekandega (joonisel 11-8 pole näidatud) soodalahusega täidetud nõusse *C*. Mida sügavamale nad lastakse, seda vähemaks muutub plaatidevaheline takistus, mis muutub nulliks momendil, kui plaatide kontaktid *D* puudutavad kontakte *E*, mis on omavahel lühistatud.



Joon. 11-9. Traatreostaat.

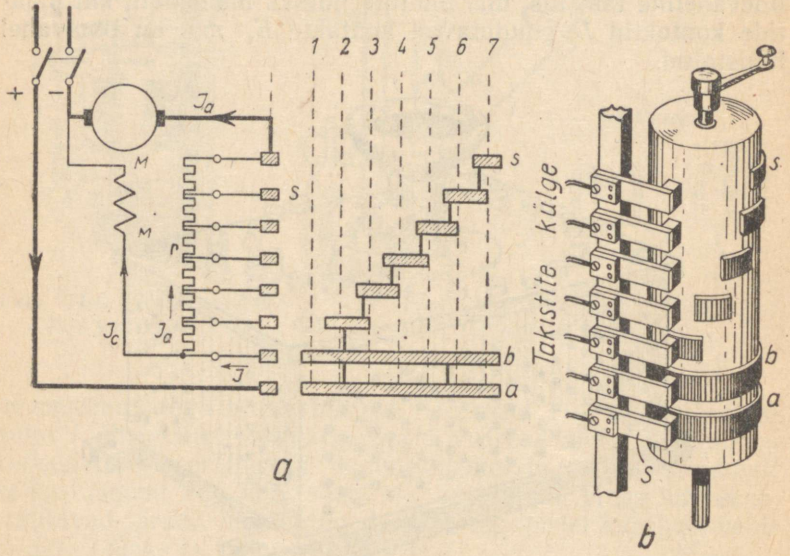
Vedelikreostaadid on odavad, kuid nõuavad rohkem hooldamist kui traatreostaadid.

Õhkjahutusega reostaat on näidatud joonisel 11-9. Ta on ette nähtud alalisvoolumasinate ergutusvoolu reguleerimiseks ning koosneb traatspiraalidest, mis on ühendatud ülemisel isoleerplaadil asuvate kontaktidega. Käepideme pööramisel libiseb kontakthari kontaktrõngal ja takistite kontaktidel. Niisugused reostaadid on ette nähtud kestvaks töötamiseks.

11-9. Kontrollerid

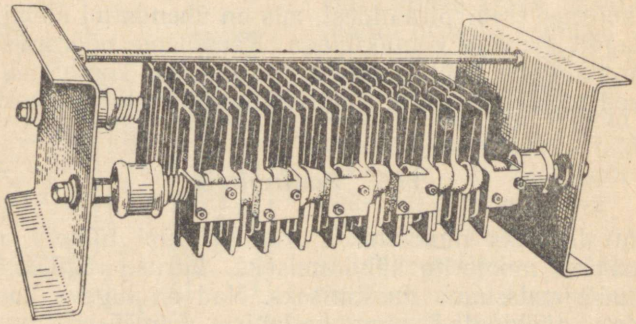
Kontrolleriteks nimetatakse trummeltüüpi lüliteid, mis on ette nähtud mootorite käivitamiseks, kiiruse reguleerimiseks ning pöörlemissuuna muutmiseks. Nad on tugeva konstruktsiooniga, töökindlad ning keskmise võimsusega mootorite juures laialdaselt kasutusel.

Joonisel 11-10, *a* on näidatud haruvooluergutusega mootori ühendusskeem kontrolleriga. Joonisel 11-10, *b* on kujutatud kontrolleri ehitus.



Joon. 11-10. Mootori käivitamine kontrolleri abil.

Segmendid *s*, mis asetsevad pöörleval trumlil (joon. 11-10, *b*) ning on omavahel ühendatud, on näidatud joonisel 11-10, *a* paremal viirutatud nelinurkadena, kuna kontrolleri

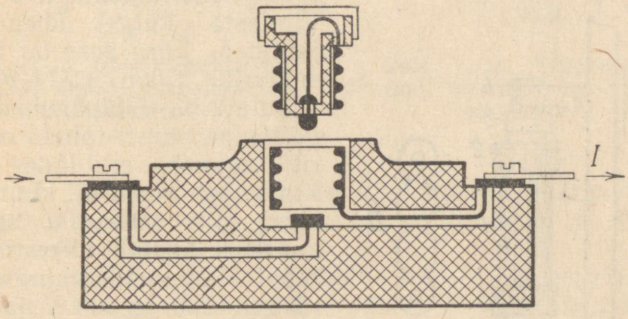


Joon. 11-11. Reostaattakisti.

sõrmed *S* on näidatud vasakul pool. Numbritega *1—7* on tähistatud kontrolleri käepideme positsioonid (asendid). Trumli pööramisel muutub trumli sõrmede positsioon segmentide suhtes. Oletame, et sõrmed *S* on asendis *1*. Siis vool *I* pääseb segmentide *a* ja *b* kaudu ergutusmähisesse ja takistuse *r* kaudu ankrumähisesse. Positsioonis *2* on takistuse alumine sektsioon juba lühistatud jne. Takistus *r* koosneb tavaliselt üksikuist elementidest, mis on valmistatud malmist, konstantaanist või fekraalist. Joonisel 11-11 on näidatud malmsektsioonidest koostatud takisti.

11-10. Sulavkaitsmed ja automaatlülitid

Kaitsmete ülesandeks on kaitsta juhtmeid ja elektrienergia tarbijaid voolu soojusliku toime eest ülekoormuste ja lühiste korral. Kaitsmed jagunevad korkkaitsmeteks ja ribakaitsmeteks, mida kasutatakse seadmeis pingega kuni 500 V, ning torukaitsmeteks, mida kasutatakse ka kõrgema pingega seadmeis.

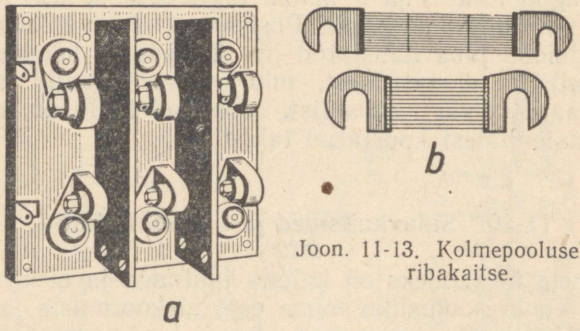


Joon. 11-12. Korkkaitse.

Korkkaitsmeid (joon. 11-12) valmistatakse voolule kuni 60 A ja pingele 250 ning 500 V. Nende eeliseks on asjaolu, et kaitsme vahetamise puhul ei ole vaja puudutada voolu juhtivaid osi. Ülekoormustel põleb läbi korkkaitsme sees olev sulavtraat.

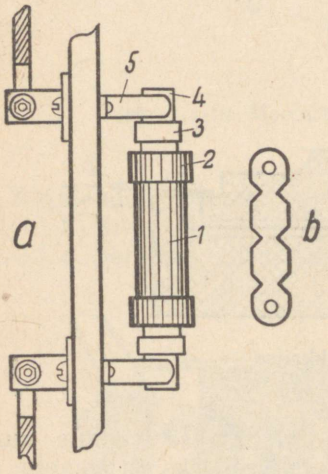
Ribakaitse (joon. 11-13, *a*) koosneb isoleerplaadist ja selle küljes asuvatest kontaktidest, mille vahele kinnitatakse sulavelement (joon. 11-13, *b*). Need kaitsmed on tingimata vaja katta kaitsekestaga inimeste kaitseks sulametalli pritsmete

eest kaitsme läbipõlemisel. Ribakaitsmeid kasutatakse seadmeis pingega kuni 380 V ja sulavribad valmistatakse kuni 200 A voolule.



Joon. 11-13. Kolmepooluseline ribakaitse.

Torukaitse ПР-1 on näidatud joonisel 11-14. Ta koosneb fiibertorust *1*, mille otstes on valgevasest võrud *2* ja valgevasest kapslid *3*. Torul on lapikud kontaktnoad *4*, mis asetuvad kontaktmokkade *5* vahele. Viimaste külge ühendatakse juhtmed. Toru sees on tsingist sulavriba (joon. 11-14, *b*).



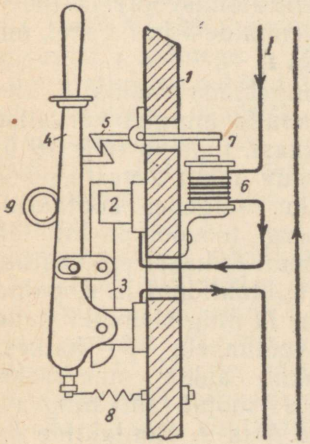
Joon. 11-14. Torukaitse ПР-1.

Sulavriba läbipõlemisel kõrge temperatuuri toimel osa fiibrit laguneb, eraldades gaasi. Kuna toru otsad on kinni, tekib torus rõhk 90—100 at ning kaarleek kustub kiiresti. Seda tüüpi kaitsmeid valmistatakse pingele 250 ja 500 V ja vooludele 6 kuni 1000 A.

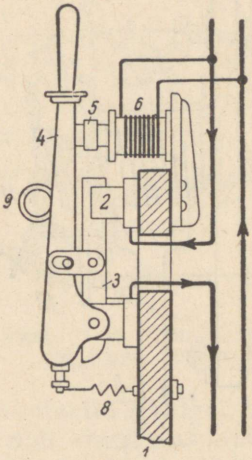
Kuni 500 V pingega seadmeis on laialdaselt kasutusel õhkautomaatlülitid, mis asendavad üheaegselt nii vinnaklülitit kui ka kaitset.

Joonisel 11-15 on näidatud maksimaalvoolu-automaatlüliti, mis kaitseb seadet ülekoormuste ja lühisvoolude eest. Isoleerplaadile *1* on kinnitatud vetruvad kontaktmokad *2*, mille vahele läheb vinnaklüliti nuga *3*. Tööolukorras hoitakse lüliti nuga sees riivi *5* abil.

Elektromagneti mähis *6* on ühendatud järjestikku vinnaklüliti noaga *3*. Kui vool ületab lubatud piiri, tõmbab elektromagnet *6* ankru *7* ligi. Selle tagajärjel riiv *5* vabastab lüliti käepideme *4*, mis vedru *8* ja raskuse *9* mõjul liigub vasakule ning katkestab vooluahela. Niisugune kaitse on kindlam kui sulavkaitse.



Joon. 11-15. Ühepooluseline viivituseta maksimaalvoolu-automaatlüliti.



Joon. 11-16. Ühepooluseline minimaalpinge-automaatlüliti.

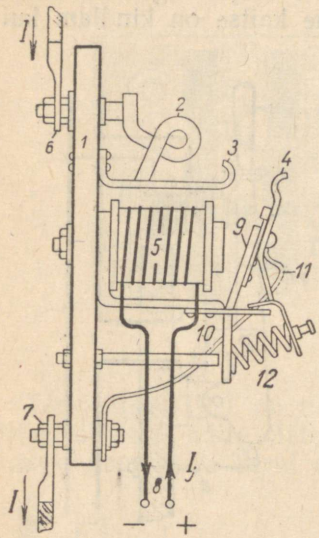
Joonisel 11-16 on näidatud minimaalpinge-automaatlüliti, mis lülitab seadme välja juhul, kui pinge kaob või langeb ülemääraselt.

Elektromagneti *6* mähis on ühendatud võrgupingele ning hoiab käepidemega *4* ühendatud ankrut *5*. Pinge langemisel elektromagneti tõmbejõud väheneb ning kontakt katkestatakse vedru ja raskuse mõjul. Mõlema automaatlüliti sisselülitamine toimub käsitsi.

11-11. Kontaktorid

Kontaktoriteks nimetatakse automaat- ja distantsjuhtimiseks ettenähtud lüliteid, mida kasutatakse elektriseadmetes pingega kuni 500 V (alalisvoolu korral kuni 3000 V). Kontaktorid on arvestatud suure arvu sisse- ja väljalülitamiste teostamiseks ning neid valmistatakse nii alalis- kui ka vahelduvvoolule.

Joonisel 11-17 on näidatud alalisvoolukontaktor. Isoleerplaadile *1* on monteeritud kaarleegi-kustutuspool *2*, liikumatu kontakt *3*, liikuv kontakt *4* ja elektromagnet *5* sisselülitamiseks.



Joon. 11-17. Alalisvoolukontaktor.

Kontaktoris on kaks vooluahelat. Üks on juhtimisvooluahel, mis koosneb elektromagneti mähisest *5*, mida läbib vool I_j (kontaktori sisselülitamisvool) ja töövooluahel klemmide *6* ja *7* vahel, mida läbib vool *I*.

Kui pingestada mähis *5* klemmide *8* kaudu mingist kõrvalisest vooluallikast, tõmbub telje *10* ümber pöörduv ankur *9* vastu pooli *5* südamikku, sulgedes kontaktid *3* ja *4*, ning töövooluahelat läbib vool klemmi *6*, kaarleegi-kustutuspooli *2*, kontaktide *3* ja *4*, painduva juhtme *11* ning klemmi *7* kaudu. Juhtimisvooluahela *8* katkestamisel kukub ankur oma raskuse ja vedru *12* mõjul lahti ning avab kontaktid *3* ja *4*. Kontaktide *3* ja *4* avamisel tekib kaarleek, mis sulatab neid. Kaarleegi kiireks kustutamiseks ongi ette nähtud kustutuspool *2*, mille magnetvälja mõjul kaarleek puhutakse kontaktide tööpindade vahelt välja ja katkestatakse.

On olemas kontaktoreid normaalasendis suletud ja normaalasendis avatud kontaktidega. Kontaktide normaalasendiks loetakse sellist asendit, mispuhul elektromagneti pool on pingestamata.

Tänapäeva kontaktorid taluvad 20 kuni 50 miljonit lülitamist, lülitades kuni 600 A voolu. Kontaktorid töötavad väga kiirelt, teostades lülitamise 0,04—0,1 sekundi jooksul.

11-12. Õlilülitid

Pingel üle 500 V on eespool käsitletud lülitite kasutamine raskendatud, eriti suuremate võimsuste korral.

Kõrgepingelist vahelduvvoolu lülitatakse peamiselt õlilülitite abil, mille kontaktid asuvad õlis.

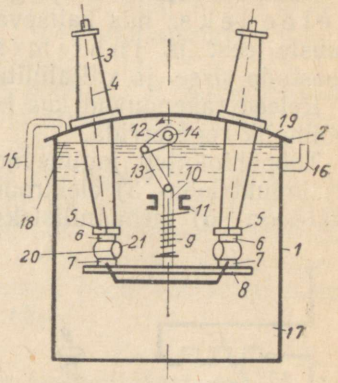
Õli on esiteks hea isoleeraine ja teiseks on tal omadus kiirelt kustutada kaarleeki hetkel, kui vool läbib nullväärtuse.

Õlilülitid jagunevad suure õlihulgaga ja väikse õlihulgaga lülititeks. Suure õlihulgaga lülitites kasutatakse õli nii voolu juhtivate osade isoleerimiseks kui ka kaarleegi kustutamiseks. Väikse õlihulgaga lülitites kasutatakse õli vaid kaarleegi kustutamiseks.

Joonisel 11-18 on näidatud lihtsaima suure õlihulgaga õlilüliti joonis. Lüliti koosneb teraspaagist *1* kaanega *2*, millele on kinnitatud isolaatorid *3* koos voolu juhtivate osadega *4*, ja lülitamismehhanismist.

Õlilülitit juhitakse vastavate mehhanismide abil kas käsitsi või automaatselt.

Sisselülitamisel pöördub võll *14* kellaosuti liikumise suunas ning kangide süsteem *12* ja *13* tõstab varrast *10*, mis liigub juhtpuksis *11*. Varras *10* tõstab üles traaversi *8*, mille küljes olevad kontaktid *7* sulgevad isolaatorite *3* külge kontaktihoidjate *5* abil kinnitatud liikumatud kontaktid *6*. Sisselülitatud asendis on lüliti riivistatud vastava riiviga.



Joon. 11-18. Suure õlihulgaga paak-õlilüliti.

Väljalülitamisel riiv nihkub kõrvale ja võll vabaneb. Vedru *9* mõjul pöördub võll *14* vastu kellaosuti liikumise suunda ja kontaktid *6* ja *7* avanevad. Katkestamise hetkel tekib kaarleek, õli aurustub ning ümbritseb kaarleegi gaasiga, milles kaarleek kustub.

Voolutarbijate kaitseks on õlilülitid varustatud releedega, mis rakenduvad ülekoormuste, lühiste ja pinge languse puhul ning lülitavad õlilüliti välja.

Peale õlilülitite kasutatakse kõrgepingeseadmetes lahklüliteid. Nad sarnanevad ehituselt tavaliste vinnaklülititega ning võimaldavad välja lülitada kas kogu vooluahelat või osa sellest. Operatsioone (lülitamisi) lahklülititega teostatakse ainult voolu puudumisel vooluahelas.

11-13. Releed

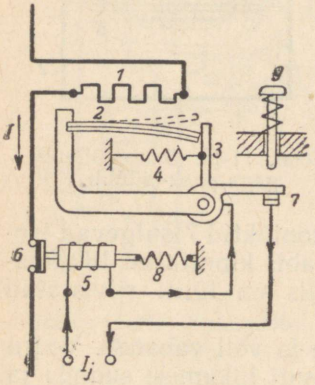
Releed on ette nähtud automaatsete ümberlülitamiste teostamiseks vooluahelates. Relee rakendub elektriliste, mehaaniliste või muude, väikse võimsusega suuruste toimel. Ajamite

skeemides juhivad releed kontaktorite tööd, kuid väga väikeste võimsuste korral toimub vooluahelate lülitamine otseselt releede endi poolt.

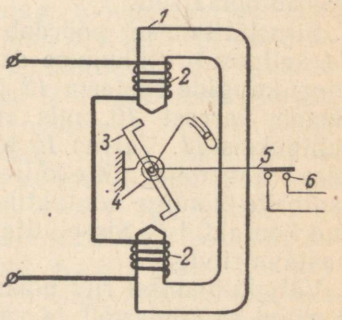
Kasutamisotstarbe järgi liigitatakse releed *kaitsereleedeks*, mis kaitsevad seadmeid ja mootoreid ülekoormuste eest ja *juhtimisreleedeks*, mis võimaldavad teostada sisse- ja väljalülitamisi.

Releed rakenduvad kas hetkeliselt või viivitusega, mida on võimalik reguleerida.

Tööpõhimõttelt jagunevad releed: 1) elektromagnetilisteks, 2) induktsioon-, 3) elektrodünaamilisteks, 4) soojus-, 5) elektron-ioon-, 6) mehaanilisteks jne. releedeks.



Joon. 11-19. Soojusrelee.



Joon. 11-20. Pöörduva ankruga elektromagnetilise relee põhimõtteline ehitus.

Joonisel 11-19 on esitatud soojusrelee põhimõtteskeem. See relee kaitseb mootoreid ülekuumenemise eest. Mootori vool *I* läbib soojenduselementi *1*. See soojenduselement soojendab bimetallplaati *2*, mis koosneb kahest kogu pikkuses kokkukeevitatud, erineva paisumisteguriga plaadist. Plaadi *2* üks ots on jäigalt kinnitatud, kuna teise, vaba otsa vastu on surutud vedru *4* jõul kang *3*. Juhtimisvooluahela vool I_j läbib pooli *5*, mille tagajärjel südamik tõmbub sisse ning sulgeb peavooluahela kontaktid *6*.

Kui vool *I* suureneb üle lubatud piiride, hakkab plaat *2* kuumenema ja tõmbub ülespoole, nagu on näidatud joonisel punktiiriga ning vabastab kangi *3*, mis, liikudes vasakule, katkestab juhtimisvooluahela kontaktid *7*. Vedru *8* tõmbab

südamiku *5* paremale, katkestades sellega peavooluahela kontaktid *6*. Survenupu *9* abil taastatakse kang *3* tööasendisse.

Joonisel 11-20 on näidatud pöörduva ankruga elektromagnetilise relee ЭТ-60(ХЭМЗ) skeem. Elektromagnetilisi releesid kasutatakse maksimaalvoolu-, maksimaalpinge-, minimaalpinge-, aeg-, signaalreleedena jne.

Terassüdamikul on väljaulatuvad poolused *2*, mille mähist läbib töövooluahelasse lülitatud voolutrafo või pingetrafo vool. Selle voolu väärtusele reageeribki relee.

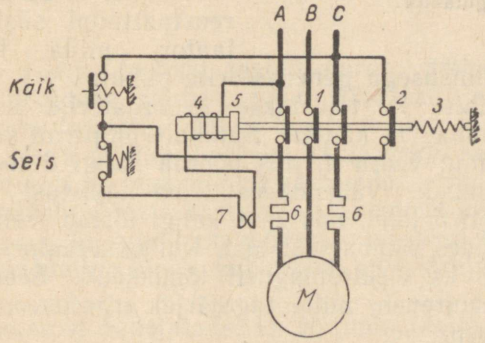
Terasest *Z*-kujuline ankur *3* koos vedruga *4* on kinnitatud võllile ning võib pöörduda koos liikuvate kontaktidega *5*. Kui vool mähises *2* saavutab rakendusvoolu väärtuse, pöördub ankur *3* paremale ning kontaktid *5* ja *6* sulguvad. Sellega sulgub kontaktori või lüliti elektromagneti pooli vooluahel ning peavooluahel avatakse või katkestatakse.

11-14. Tootmisoperatsioonide automatiseerimine

Tootmisprotsesside automatiseerimise tehnika kaasaegse taseme juures avanevad meie ühiskonna tootlike jõudude edasiseks arenguks piiramatud võimalused.

Ülisuurt tähtsust omab automaatika maailma suurimate — Kuibõševi ja Stalingradi — hüdroelektrijaamade rakestamisel.

Allpool on toodud lihtsamaid näiteid automaatika rakendamise kohta.

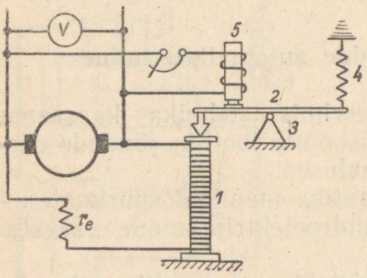


Joon. 11-21. Magnetkäiviti skeem.

Joonisel 11-21 on antud magnetkäiviti skeem lühisrootoriga asünkroonmootori käivitamiseks. Magnetkäiviti koosneb kolmepooluselisest kontaktorist *1* plokk-kontaktidega *2*, vedrust *3*,

kontaktori sisselülitamise elektromagnetist *4* ja kahest soojusreleest *6*. Sisse- ja väljalülitamise survenupud «Käik» (Пуск) ja «Seis» (Стоп) on asetatud sellisesse kohta, kus neid on mugav käsitseda.

Vedrud hoiavad nuppe joonisel märgitud asendis. Sisselülitatud mootori puhul (joon. 11-21) kulgeb vool faasist *A* läbi pooli *4* soojusrelee kontaktide *7*, väljalülitamisnupu ja plokk-kontaktide *2* faasi *C*. Kui vajutada väljalülitamise survenupule, siis vooluahel katkeb ning vedru *3* mõjul kontaktori kontaktid avanevad ja mootor lülitub välja. Ülekoormuse korral soojenduselemendi *6* poolt kuumendatav bimetallplaat katkestab kontaktid *7* ning mootor seiskub. Käivitamiseks tuleb uuesti vajutada nupule «Käik». Vool suundub nüüd faasist *C* läbi nuppude «Käik» ja «Seis» faasi *A* poole ning kontaktor sulgub. Kuna plokk-kontaktid *2* on nüüd suletud, võib nupu «Käik» lahti lasta.



Joon. 11-22. Automaatne pingeregulaator.

Magnetkäiviti kaitseb mootorit ka pinge alanemisel, sest sel juhul vool poolis *4* nõrgeneb, kontaktori elektromagnet ei suuda ankrut vastas hoida ning vedru *3* mõjul kontaktid avanevad ja mootor jääb seisma.

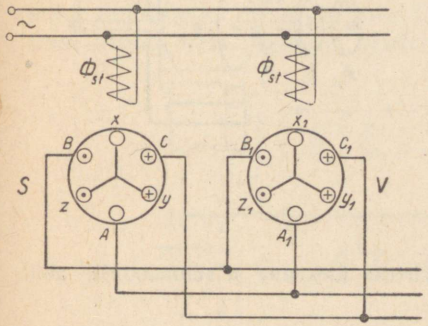
Joonisel 11-22 on näidatud reostaattüüpi süsipingeregulaator, mida kasutatakse väiksema võimsusega generaatorite puhul.

Ergutusmähist r_e toidetakse generaatorist söeplaatidest koosneva samba *1* kaudu. Sambale mõjuvad kaks vastassuunalist jõudu: vedru *4*, mis pöörab kangi *2* toe *3* ümber, surub söesambale, vähendades tema takistust, kuna aga elektromagneti *5* jõud, mis seda kangi tõstab, vähendab survet, suurendades samba takistust. Kui generaatori pinge langeb, väheneb ka elektromagneti tõmbejõud. Seetõttu surve söesambale suureneb, mille tagajärjel ergutusvool tugevneb ja pinge tõuseb.

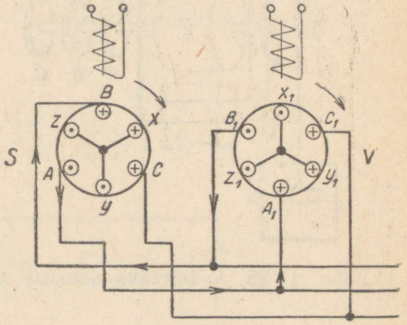
Tehnikas on laialdast kasutamist leidnud sünkroonsidesüsteemid (elektriline võll), mille moodustavad nn. saatja, s. o. elektrimasin, mis annab juhtimissignaale ja vastuvõtjaid, mis on täidesaatvateks masinateks. Vastuvõtjad jälgivad täpselt saatja asendit. Niisugust sidet nimetatakse sünkroonseks ja ta on leidnud laiaulatuslikku rakendamist automaatjuhti-

misega seadmeis mitmesuguste näitude edasiandmiseks, tootmisprotsessi juhtivate regulaatorite, ventiilide jne. ajamites.

Joonisel 11-23 on toodud kaks asünkroonmootorit, mille staatorite ühefaasilised mähised on ühendatud ühisesse vahelduvvooluvõrku. Nende mootorite kolmefaasilised rõngastega rootorid on omavahel harjade kaudu ühendatud. Mõlemad rootorimähised on ühendatud tähte. Vasakpoolne masin on saatjaks *S*, kuna parempoolne on vastuvõtjaks *V*. Vastuvõtjaid võib olla ka mitu. Rootorite täpselt ühesuguse ruumilise asendi korral on nende rootorimähistes indutseeritud sekundaarsed elektromotoorsed jõud vastastikku tasakaalus. Seetõttu voolu mähistes ei ole ja masinad seisavad.



Joon. 11-23. Selsünmootori tööpõhimõte — lähteasend.



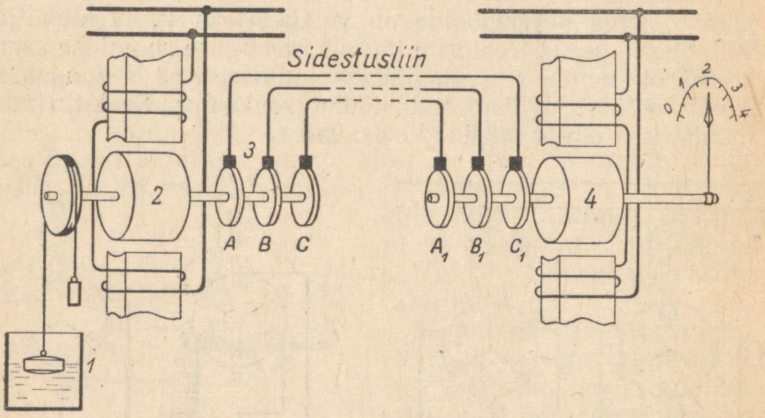
Joon. 11-24. Selsünmootori tööpõhimõte — signaali ülekanne.

Pöörates saatja rootorit teatud nurga, näiteks 60° võrra kellaosuti liikumise suunas, nagu näidatud joonisel 11-24, kaob elektromotoorsete jõudude tasakaal ning rootorite ahelas tekib vool. Nagu nähtub joonisest 11-24, tekib sektsiooni A_1X_1 voolu ja staatori magnetväljaga vastastikuse mõju tulemusena jõud, mis püüab pöörata vastuvõtja *V* rootorit kellaosuti liikumise suunas (jõu suund on määratav vasaku käe reegliga). Rootori pöördumine lõpeb, kui rootor on pööratud samuti 60° võrra.

Neid mootoreid nimetatakse ka selsünmootoriteks ja valmistatakse üksikpoolustega masinatena. Selsünmootoritel võivad olla ka kolmefaasilised staatorimähised nagu tavalistel mootoritel; sel juhul on rootoril ühefaasiline mähis.

Joonisel 11-25 on toodud selsünmootorite abil kaugmõõtmise lihtsustatud skeem. Paagis *1* on ujuk, mis tõuseb või vajub vastavalt vedelikunivoo muutusele. Ujukiga on ühendatud

selsünsaatja rootor *2*, mis pöördub vastavalt ujuki asendile. Rootori *2* mähis on rõngaste *ABC* ja harjade *3* kaudu sideliini abil ühendatud selsünvastuvõtja rootoriga. Rootor *4* pöördub sama nurga võrra mis rootor *2* ning osuti *5* näitab skaalal vedelikunivoo muutusi.



Joon. 11-25. Mõõdetava suuruse väärtuse ülekanne selsünmootorite abil.

Kaugjuhtimisseadmed võimaldavad käivitada ja seisata eemalasuvaid generaatoreid, avada ning sulgeda lüüse jne.

11-15. Kaitsemaandamine ja -nullimine

Meie maal tehakse kõik selleks, et töö muutuks töötajate elule ja tervisele täiesti ohutuks. Seepärast tuleb elektriseadmete ja aparatuuri ülesseadmisel ja ekspluateerimisel kinni pidada nõuetest, mis tagavad teenindava personali ohutuse.

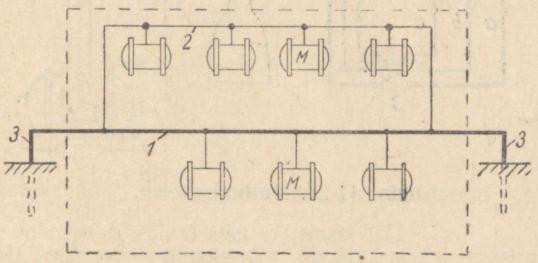
Elektrivool, läbides inimese keha, kutsub organismi kudedes esile füüsikalisi ja keemilisi muutusi, mis ilmnevad põletushaavadena, krampidena jne. Eriti ohtlik on elektrilöök, millele kaasneb teadvuse kaotus ja häired vereringe ja hingamisorganite tegevuses. Seejuures võib esineda varjusurm, s. t. elutunnuste kadumine. Sellisest olekust võib inimest uuesti ellu äratada kunstliku hingamise ja arstlike abinõudega.

Inimese elule on ohtlik vool alates 0,05 amprist. Vool tugevusega 0,1 A ja üle selle on inimesele surmav. Inimese keha takistus kõigub 600 oomist kuni kümnete tuhandete oomideni.

Naha niiskumise ja juhtivate ainetega kattumise tagajärjel väheneb keha üldtakistus tunduvalt.

Kuna on esinenud surmajuhtumeid 60 V pinge alla sattumisel, siis loetakse kandelampide puhul ohutuks pingeks kuivades puitpõrandatega ruumides 36 V ja niisketes ning palavates ruumides, kus esineb ka metallesemete (katelde, paakide, talade jne.) puudutamise vajadust, 12 V.

Isolatsiooni rikke (läbilöögi) korral satuvad elektrimasinate kered, trafode paagid, lülitid ja elektriseadmete teised metallosad pinge alla, mille tagajärjel tekib elektrilöögi oht teenindavale personalile. Selle vältimiseks kasutatakse seadmete maandamist ja nullimist. Kaitsemaanduse eesmärgiks on vähendada aparatuuri maandatud osade pinget ohutu suuruseni. Seadmetes pingega kuni 1000 V kasutatakse kaitsemaandusi ainult maandamata neutraali puhul.



Joon. 11-26. Kaitsemaandus.

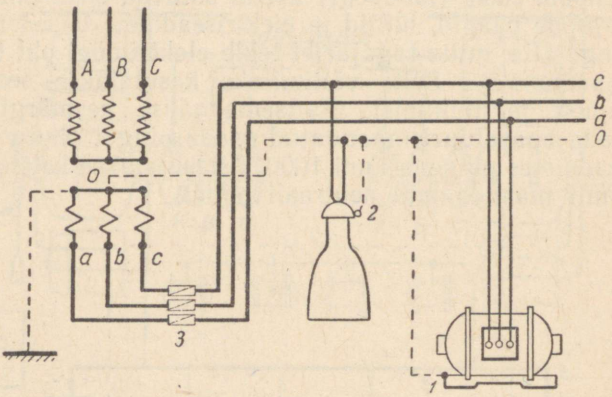
Joonisel 11-26 on näidatud seadme kaitsemaanduse skeem. Mootorite kered ühendatakse poltide abil metallribadega *1*, *2*, mis on keevitatud maandajate *3* külge. Maandajateks on maasse löödud torud või vardad. Torude või varraste minimaalne arv on 2 ning torude seina paksus 2—3 m pikkuse juures peab olema vähemalt 3,5 mm. Kaitsemaanduse olemasolu korral muutub masina ja maa vaheline potentsiaalide vahe niivõrd väikeseks, et maapinnal seisev inimene võib ohutult puudutada mootori keret ka mähise isolatsiooni rikke korral.

380/220 V neljajuhtmelises kolmefaasilises süsteemis ja 220/127 V maandatud neutraaliga süsteemis kasutatakse kaitsemaandamise asemel kaitsenullimist, s. t. seadmete metallkorpuste ühendamist nulljuhtme külge.

Kaitsenullimise eesmärgiks on saavutada seadme isolatsiooni rikke korral vigastatud faasis niisugust voolu, mis oleks piisav sulavkaitsme läbipõletamiseks või releekaitse (automaa-

tika) rakendamiseks ning vigastatud seadmeosa väljalülitamiseks.

Joonisel 11-27 on näidatud seadme kaitsenullimise skeem. Mootori kere *1* ja valgustusarmatuuri maandumiskontakt *2* on ühendatud nulljuhtmega. Seade on kaitstud sulavkaitsmetega *3*.



Joon. 11-27. Nullimisskeem.

Ühtede seadmete maandamine ja teiste seadmete nullimine ühes ja samas võrgus on keelatud.

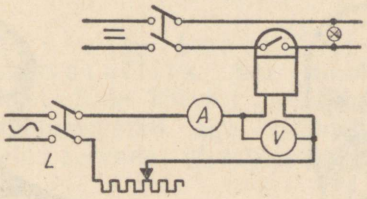
Kui võrgu pinge maa suhtes on üle 150 V, tuleb seadmed maandada või nullida kõigis tootmisruumides. Elektrilöögi suhtes eriti ohtlikes ruumides, välisseadmetes ning tule- ja plahvatusohtlikes ruumides on maandamine või nullimine kohustuslik alates pingest 65 V maa suhtes.

11-16. Laboratoorne töö. ЭТ-tüüpi elektromagnetiline relee

Tööplaan

1. Maha võtta relee kate ja tutvuda relee ehitusega.
2. Joonestada relee elektriliste ühenduste skeem.
3. Joonestada relee osade koostöö skeem relee rakendumisel.
4. Leida relee tagastumistegur $k_t = \frac{I_t}{I_r}$.
5. Määrata relee mähiste poolt tarbitav võimsus nimivoolul.

Relee töötamise skeem on näidatud joonisel 11-20. Relee tagastumisteguri määramiseks koostatakse skeem vastavalt joonisele 11-28. Relee skaalal seatakse sisse vool, mille juures relee peab rakenduma ja lülitatakse sisse vinnaklüliti L. Nüüd vähendatakse reostaadi takistust niikaua, kuni relee kontaktid sulguvad. Minimaalset voolu väärtust, mille juures relee rakendub, nimetatakse rakendusvooluks I_r. Seejärel hakatakse voolu vähendama ja märgitakse üles voolu väärtus, mille juures relee kontaktid tagastuvad lähteasendisse. Seda voolu nimetatakse tagas-



Joon. 11-28. Relee lülitusskeem.

tusvooluks I_t.

Tagastustegur $K_t = \frac{I_t}{I_r}$ peab maksimaalvoolureleedel olema vähemalt 0,85 ja minimaalvoolureleedel vähemalt 1,2.

Relee poolt tarbitavat võimsust $S = UI$ määratakse joonisel 11-28 toodud skeemi järgi, kusjuures voltmeeter on ühendatud nii, et mõõtmisviga oleks minimaalne.

KAHETEISTKÜMNES PEATÜKK

ELEKTRIKEEVITUS. ELEKTROTERMIA

12-1. Elektrikeevitus

Keevitamiseks nimetatakse materjalide lahutamatuks tervikuks liitmist nende kohaliku kuumutamise teel vedela või plastilise olekuni. Elektrikeevitusel, mida rakendatakse väga ulatuslikult, kasutatakse kuumutamiseks elektrienergiat. Elektrikeevitus jaguneb kaheks keevitusmeetodiks: kaarleekkeevituseks ja kontaktkeevituseks (takistuskeevitus).

Esimese meetodi järgi keevitamisel annab soojust kaarleek, teise meetodi puhul eraldub metallide sulatamiseks vajalik soojus keevitatavate detailide kontaktikohas.

Elektrikeevitusel on metallosade teistsuguste ühendamisviisidega võrreldes rida olulisi eeliseid: metalli sääst, tugevamad õmblused, mis oma kvaliteedilt ei jää maha alusmetallist; aja ja tööjõu kokkuhoid.

Metallide elektrikeevitus on vene leiutis.

1882. a. esitas N. N. Benardos meetodi metallide keevitamiseks süsielektroodi ja toote vahel tekkiva kaarleegi abil.

N. G. Slavjanov töötas aastail 1888—1890 välja meetodi kaarleekkeevituseks metallelektroodi abil.



Nikolai Nikolajevitš Benardos (1842—1905).

Süsielektroodiga elektrikeevituse leiutaja.



Nikolai Gavrilovitš Slavjanov (1854—1897).

Metallelektroodiga elektrikeevituse leiutaja.

Elektrikeevituse laiaulatuslik rakendamine meie maal võimaldas sõjaeelsetel viisaastakutel kokku hoida tuhandeid tonne metalle ja kiirendada industrialiseerimise tempot.

Suure Isamaasõja perioodil oli elektrikeevitusel tähtis osa relvastuse ja sõjavarustuse tootmisel ja sõjas purustatud ehitiste taastamisel.

Nõukogude Liidus rakendatakse elektrikeevitust kui eesrindlikku, progressiivset tehnoloogilist meetodit paljudes tööstusharudes kõige erinevamate metalltoodete ja konstruktsioonide valmistamisel. Näiteks rakendatakse elektrikeevitust vagunite, vedurite, lennukite, autode, laevakerede, hoonete ja kõrgahjude metallsõrestike, iga liiki metallkonstruktsioonide jne. valmistamisel.

Suurt tähtsust elektrikeevituse edasisele arengule omavad

Ukraina Teaduste Akadeemia Elektrikeevituse Instituudis tehtud tööd. Seal töötati välja ja juurutati praktikasse automaatkeevituse uued kiirmeetodid.

Viimasel ajal on hakatud laialdaselt rakendama keevitamist vee all ja metallide lõikamist kaarleegi abil, mille kohta vastavad meetodid on välja töötatud K. K. Hrenovi poolt.

Keevitamine N. N. Benardose meetodil toimub alalisvoolukaarleegiga, mis tekib süsi- või grafiitelektroodi (—) ja metalli (+) vahel.

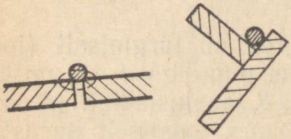
Süsielektroodiga võib keevitada kolmel meetodil.



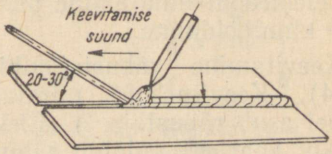
Joon. 12-1. Lisametallita keevisõmblus.

Esimene meetod — keevitamine ilma lisametallita. Sel juhul moodustatakse keevisliide kõrvuti asetsevatest servadest, õmblusemetall aga kujuneb kõrvuti asetsevate servade ülessulatamise arvel (joon. 12-1).

Teine meetod — keevitamine lisatraadi asetamisega õmbluse lahkmesse (joon. 12-2). Seda meetodit kasutatakse paksude detailide keevitamisel. Kaarleek sulatab lisatraadi ja koos sellega ka alusmetalli ning moodustub kumer (tugevdatud) õmblus.



Joon. 12-2. Keevisõmbluse saamine lisametalli abil.



Joon. 12-3. Süsielektroodiga keevitamine lisametalli andmisega kaarleeki.

Kolmas meetod — keevitamine lisametalli etteandmisega kaarleeki (joon. 12-3). Seda meetodit kasutatakse 0,3—1 mm paksuste metall-lehtede keevitamiseks. Sel juhul hoiab keevitaja käes 0,5—0,7 m pikkust traatvarrast, mis on kaetud spetsiaalse kattega, paremas käes aga elektroodihoidjat. Kaarleek suunatakse traatvarda otsale, mis hoitakse alusmetalli pinna suhtes 20—30° nurga all.

Kõige rohkem on levinud elektrikeevitus N. G. Slavjanovi meetodil. Sel juhul tekib kaarleek keevitatava toote (üks elektrood) ja metallelektroodi (teine elektrood) vahel, mis on ühtlasi ka lisametalliks.

Kaarleegi tekkimisel asetub varraselektroodi sulametall ülessulatatud põhimetallile, mille tulemusena moodustub õmbluse vööt. Vöödi moodustamine peab toimuma pidevalt, kaarleeki katkestamata seni, kuni kogu elektrood on üles sulanud (käsitsikeevitusel) või kuni kogu õmblus on keevitatud (automaatkeevitusel).

Käsitsikeevitamise suureks puuduseks on õmbluse kvaliteedi sõltuvus keevitaja kvalifikatsioonist. Mehhaniseeritud keevitamisprotsessi puhul (automaatkeevitusel) seda puudust ei esine, samuti suureneb sel puhul tööviljakus ja hoitakse kokku metalli.

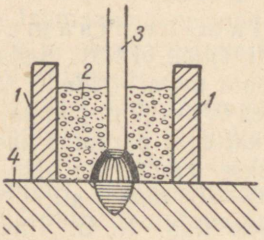
Nõukogude Liidus on saavutanud kõige suurema leviku automaatkeevitus räbustajakihi all.

Räbustaja kujutab endast peeneteralist sõmerainet, mis koosneb silikaatidest ning kaltsium- ja mangaanoksüüdist.

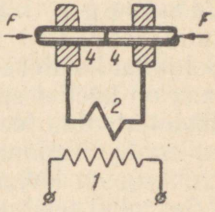
Automaatses kaarleekkeevitusseadmes toimub elektroodi etteandmine ja kaarleegi nihutamine piki õmblust mehhaniseeritult.

Normaalne automaatkeevitusseade koosneb kahest põhiosast: automaatpeast ja automaatpingist. Automaatpea süütab kaarleegi, hoiab kaarleegi pikkuse konstantsena ja annab ette elektroodi vastavalt selle sulamisele. Automaatpingi ülesandeks on elektroodi nihutamine piki õmblust ja keevitatavate detailide kinnihoidmine.

Keevitamine räbustajakihi all toimub järgmiselt (joon. 12-4). Keevituskoht piiratakse kahe plaadiga *1—1*, millede vahel asub räbustaja *2*. Elektroodi *3* ja alusmetalli *4* vahel tekkiv kaarleek sulatab räbustajat, mis osaliselt aurustub. Elektroodi liikumisel piki õmblust liigub kaarleek räbustajas. Seejuures on ülessulatatud metall õhust täielikult isoleeritud, mis soodustab kvaliteetse keevisõmbluse saamist.



Joon. 12-4. Kaarleegi põlemine räbustajakihi all.

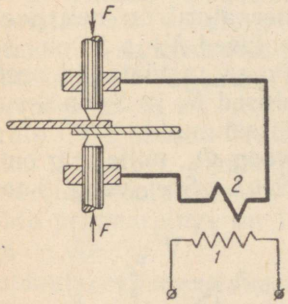


Joon. 12-5. Põkkkeevituse skeem.

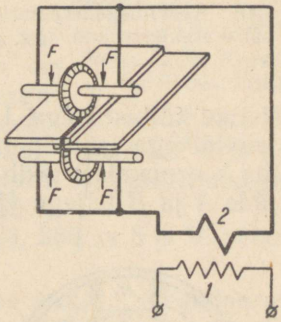
Kontaktkeevitusel läbib elektrivool otseselt keevitatavaid detaile ja nende kokkupuutekohta. Sõltuvalt kontaktikoha takistusest ja keevitusvoolu tugevusest muundub elektrienergia suuremal või vähemal määral soojuseks, mille tõttu kontaktikoha temperatuur tõuseb nii kõrgele, et detailide metall muutub seal plastiliseks. Vajaliku kuumenemise saavutamisel surutakse detailid kokku ja nad moodustavad ühe terviku.

Rakendatakse kolme kontaktkeevituse meetodit: põkk-, punkt- ja rullkeevitust.

Põkk-keevitust teostatakse põkk-keevitusmasinal. Keevitatavad detailid *4-4* surutakse kontaktmokkade *3-3* vahele (joon. 12-5) ja surutakse pärast kuumendamist kokku. Keevitusvool antakse kontaktmokkadele transformaatori *2* sekundaarmähisest.



Joon. 12-6. Punktkeevituse skeem.



Joon. 12-7. Rullkeevituse skeem.

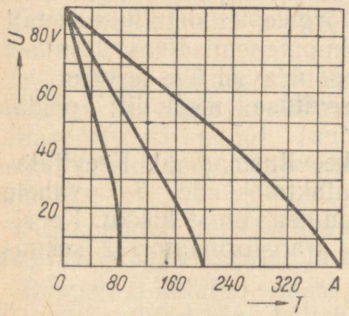
Punktkeevitus toimub punktkeevitusmasinal. Keevitatavad metall-lehed kinnitatakse masina kooniliste vaskelektroodide vahele (joon. 12-6). Elektroodidest ja keevitatavatest lehtedest voolu läbilaskmisel kuumeneb metall-lehtede see osa, mis asetseb elektroodide vahel, kuni plastilise olekuni ja keevitub surve mõjul kokku.

Punktkeevitusel on liitekoha (punkti) pindala väike (läbimõõt 3—20 mm). Sõltuvalt keevitatavate detailide suurusest liidetakse nad suurema või väiksema arvu punktidega.

Kui keevituspunktid asetsevad pidevalt üksteise järel, siis kujuneb rullõmblus. Rullkeevituse teostamiseks asendatakse varraselektroodid rullidega (joon. 12-7). Keevitatavad lehed asetatakse servapidi teineteise peale ja surutakse kahe rulli vahele jõuga *F-F*. Seejärel lülitatakse vool sisse ja pannakse

rullid pöörlema. Nii toimub üheaegselt lehtede edasinihutamine ja pideva keevisõmbluse kujunemine.

Keevitamisel alalisvooluga on toiteallikaks keevitusgeneraator (-agregaat).



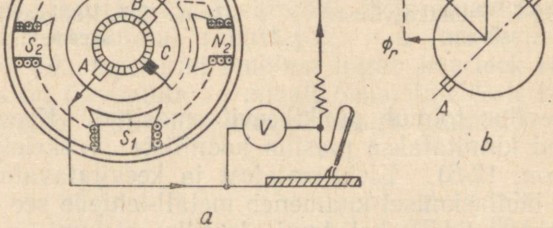
Joon. 12-8. Keevitusgeneraatori väliskarakteristikud.

Keevitusgeneraatorid peavad tühijooksul arendama pinget, mis on vajalik kaarleegi süütamiseks, ja taluma lühisvoole. Nende väliskarakteristik peab olema langev (joon. 12-8).

Mida järsumalt langev on karakteristik, seda vähem kõigub vool masina pinge muutumisel. Tehases «Elektrik» toodetava keevitusgeneraatori skeem on toodud joonisel 19, *a*.

Generaatoril on neli poolust. Peapoolused N_1 ja S_1 on suure ristlõikega ja töötavad seetõttu mittetäieliku küllastusega. Lisapoolused N_2 ja S_2 on seevastu väikse ristlõikega ja töötamisel küllastunud.

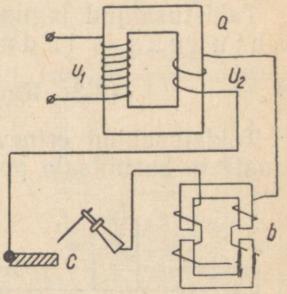
Masina koormamisel tekib ankruvoog Φ_a, mille telg on risti peaharjade A ja B teljega (joon. 19, *b*). See voog koosneb



Joon. 12-9. Keevitusgeneraatori skeem.

kahest komponendist: pikivoost Φ_p, mis on suunalt peapooluste vooga vastupidine ja avaldab sellele tugevat lahutimagneetivat mõju, sest peapoolused ei ole küllastunud, ja ristvoost Φ_r, mille telg ühtib lisapooluste teljega. Ristvälja magneetimisergutus ei mõjuta praktiliselt lisapooluste voogu, sest nad on küllastunud.

Järelikult masina koormuse suurenemisel (kaarleegi takistuse vähenemisel) väheneb tunduvalt elektromotoorne jõud ankrumähise paralleelharudes, mis asuvad harjade *A* ja *B* vahel ja koos sellega langeb ka masina pinge. Kuid vool tugevneb seejuures võrdlemisi vähe, nagu nähtub jooniselt 12-8. Järjestikku ühendatud ergutusmähised on ühendatud peaharjaga *B* ja lisaharjaga *C*. Nende harjade kaudu on ergutusmähis ühendatud sektsioonide selle osaga, mis pöörlevad lisapooluste magnetväljas ja milles indutseeritav elektromotoorne jõud jääb peaaegu muutumatuks.



Joon. 12-10. Keevitustrafo CT-2 ühendusskeem.

Nõukogude Liidus projekteeriti ja ehitati esimesed keevitusmasinad 1924. a. tehases «Elektrik».

Keevitamisel vahelduvvooluga kasutatakse keevitustrafosid, mis on samuti langeva väliskarakteristikaga.

Joonisel 12-10 on esitatud keevitustrafo CT-2 skeem. Trafo *a* toidab kaarleeki *c* reaktori *b* kaudu. Reaktori raudkeha õhupilu reguleerimisega saab reguleerida voolu piirides 70—300 A.

Trafo primaarpinge on 127—220, 380 ja 500 V, sekundaarpinge — 60—70 V.

Kontaktkeevitamisel kasutatakse trafot sekundaarpingega mõni volt, kuid seejuures on keevitusvool suur, ulatudes 10—20 kA-ni.

12-2. Elektrotermia

Elektriahjusid kasutatakse paljudes tööstusharudes, näiteks metallurgiatööstuses kõrgeltlegeeritud teraste ja ferrosulamite saamiseks, masinaehitustööstuses metallide termiliseks töötlemiseks, keemiatööstuses rea keemiliste produktide saamiseks. Viimastel aastatel on saavutanud ulatusliku leviku dielektrikute kuumutamine kõrgsageduslikus elektriväljas.

Elektriahjude laialdane levik seletub terve rea tehniliste ja tehnoloogiliste eelistega, milledest peamised on järgmised:

1) temperatuuri reguleerimise lihtsus;
2) soojuse ühtlane jaotumine;
3) ahjugaaside puudumine, mis võiksid mõjuda tootele;
4) võimalus saada väga kõrget temperatuuri;

5) võimalus toodet väga kiiresti kuumutada ja seega saavutada suurt tootlikkust;

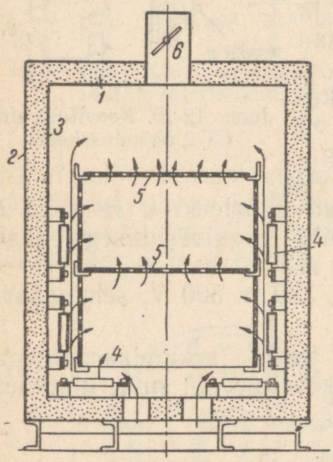
6) seadme teenindamise lihtsus.

Sõltuvalt sellest, mil viisil toimub elektrienergia muundamine soojuseks, liigitatakse elektriahjud takistusahjudeks ja kaarleekahjudeks.

Takistusahjud jagunevad omakorda kaudse küttega ahjudeks ja induktsioonahjudeks.

12-3. Kaudse küttega takistusahjud

Takistusahjud erinevad üksteisest võimsuse, ehituse, omaduste ja kasutusala poolest.



Joon. 12-11. Takistusahi.

Neid ahje kasutatakse peamiselt seal, kus vajatakse täpselt väljareguleeritud temperatuuri ja esitatakse kõrgendatud nõudeid kuumutuse ühtluse suhtes.

Kõige rohkem kasutatakse neid terase karastamiseks, noolutamiseks ja lõõmutamiseks, värviliste metallide, kergete sulamite ja klaasi lõõmutamiseks ning samuti värviliste metallide ja kergete sulamite sulatamiseks.

Ühe sellise ahju ristlõige on kujutatud joonisel 12-11. Ahi koosneb nelinurksest kambrist (kapist) soojusisolatsiooniga *1*, mis paikneb metallkarkassis *2* ja *3*. Nikroomkuumendajad *4* asetsevad ahju alumises osas ja külgseintel. Kapi sees on riiulid *5* kuumutatavate või kuivatatavate toodete jaoks. Ühu tõmmet reguleeritakse siibriga *6*. Ahjus võib saada kuni 300° temperatuuri.

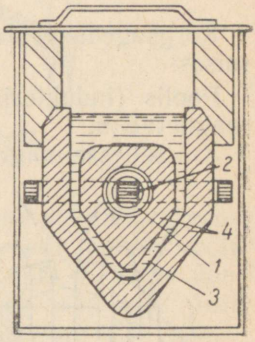
Kõrgema temperatuuri saamiseks kasutatakse mittemetalseid kuumendajaid, mis võimaldavad saada kuni 1400° temperatuuri.

12-4. Induktsioonahjud

Induktsioonahjud liigitatakse terassüdamikuga madalsagedusahjudeks, mida kasutatakse peamiselt värviliste metallide sulatamiseks, ja ilma terassüdamikuta kõrgsagedusahjudeks (sagedus $5 \cdot 10^2 — 10^6$ Hz), mida kasutatakse metallide ja dielektrikute termiliseks töötlemiseks.

Kõrgsageduslike induktsioonvoolude kasutamisel pindkarastamiseks on rida eeliseid: 1) võimalus karastada ainult terastoote või -tööriista töötavosa; 2) termilise töötlemise kestuse vähenemine kuni mõne sekundini; 3) võimalus teostada karastamist voolumeetodil; 4) maksumuse vähenemine.

Puidu, plastmassi, kummi ja teiste mittejuhtivate materjalide kuumutamine kõrgsageduslikus elektriväljas nende kuivatamiseks, vulkaniseerimiseks ja pressimiseks võimaldab kümneid kordi lühendada tehnoloogilise tsükli kestust.



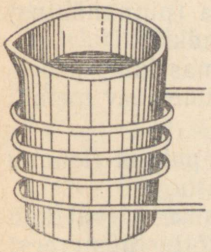
Joon. 12-12. Terassüdamikuga induktsioonahju ehitus.

a) Terassüdamikuga ahjud

Sellise ahju skeem on näidatud joonisel 12-12. Ahi kujutab endast ühefaasilist manteltrafot, mille primaarmähis *1* paikneb südamiku keskmisel sambal *2*. Kontsentriliselt primaarmähisega asetseb sulatuskanal *3* ahjukivis *4*. See vedela metalliga täidetud kanal moodustab trafo ühekeerulise lühistatud sekundaarmähise.

Vahelduva magnetvälja poolt metallis indutseeritud voolud kuumutavad metalli vajaliku temperatuurini.

b) Terassüdamikuta ahjud


Joon. 12-13. Terassüdamikuta induktsioonahju põhimõtteline ehitus.

Joonisel 12-13 on näidatud terassüdamikuta ahju põhimõtteline ehitus. Tiigel metalliga paikneb silindrilise pooli (induktori) sees, mille mähis on valmistatud vasktorust. Ahju töötamisel voolab selles torus jahutusvesi. Pooli läbiva vahelduvvoolu mõjul tekkiv magnetväli indutseerib metallis pöörisvoole. Et nende voolude suurus on võrdeline magnetvoo muutumise kiirusega, siis tehnilise vahelduvvoolu sagedusel (50 Hz) ei saavuta pöörisvoolu vajalikku väärtust. Voolu sageduse tõstmisel suureneb magnetvoo muutumise kiirus ja pööris-

voolud saavutavad väärtuse, mis on vajalik metalli sulatamiseks.

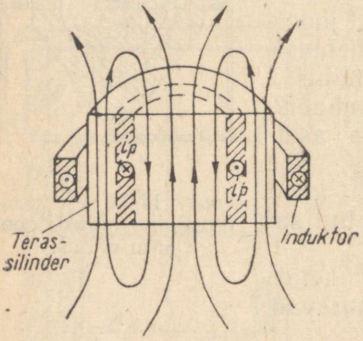
Nende ahjude toitmiseks kasutatakse vahelduvvoolu sagedusega 500—10 000 Hz.

c) Kuumutamine kõrgsagedusvooluga

Kõrgsagedusvooluga kuumutamise põhimõte seisab järgmises:

Poolis (induktoris) kulgev vahelduvvool tekitab selle sees magnetvälja.

Kui sellesse magnetvälja paigutada metallese, näiteks terassilinder, siis indutseeritakse selles pöörisvoolud, mille tõttu silinder kuumeneb.



Joon. 12-14. Magnetvälja nõrgenemine silindri keskosas.

Kõrge sageduse puhul ilmneb, et magnetvoog jaotub silindri ristlõikes ebaühtlaselt. Silindri pinnapoolses osas on väljatihedus suurem kui keskosas.

See nähtus on seletatav sellega, et terassilindris indutseeritud pöörisvoolud nõrgendavad põhimagnetvälja silindri keskosas ja tugevdavad seda pinnapoolses osas (joon. 12-14).

Magnetvoo ebaühtlase jaotumise tõttu kontsentreeruvad silindris indutseeritavad pöörisvoolud peamiselt selle pinnapoolsesse ossa (pinnanähtus). Selle tagajärjel kuumeneb ainult silindri pindkiht.

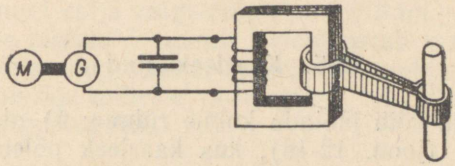
Mida kõrgem on voolu sagedus, seda õhemas kihis pöörisvoolud esinevad ja järelikult seda õhem on kuumenev metallikiht.

Voolu kestval kulgemisel kuumutatud kihi paksus (kuumutamise sügavus) suureneb soojusjuhtivuse tõttu.

Pöörisvoolude poolt põhjustatud kuumutamise kõrval kuumeneb silinder ka terase ümbermagneetimise tõttu (hüsterees). Siiski omab see kuumutus väiksemat osatähtsust ja esineb ainult siis, kui terase temperatuur on alla 800—900°, sellest kõrgemal temperatuuril kaotab metall oma magnetilised omadused ja hüstereesist tingitud kuumenemist ei esine.

Sageduse, võimsuse ja kuumutuse kestuse valikuga võib saavutada mitmesugust kuumutustemperatuuri ja kuumutuse sügavust.

Kuumutatud detaili jahutamisel veejoas saadakse vajalik karastus.



Joon. 12-15. Karastusseadme skeem.

Joonisel 12-15 on näidatud karastusseadme põhimõtteskeem. Vooluahelat toidetakse masingeneraatorist, mis annab voolu sagedusega 2000—10 000 Hz pingel 750—1500 V. Kuna ühekeerulises induktoris vajaliku karastusvoolu saamiseks peab pinge olema 20—50 V, siis kasutatakse generaatori ja induktori vahel pingetmadaldavat trafot. Keevitusseadme võimsusteguri parandamiseks kasutatakse kondensaatoreid.

Kui karastamiseks on vaja kõrgemat sagedust, siis kasutatakse masingeneraatori asemel lampgeneraatorit (vt. § 10-8).

d) Dielektrikute kuumutamine

Kui paigutada dielektrik kõrgsageduslikku elektrivälja, siis muudab vahelduv elektriväli pidevalt dielektriku polarisatsiooni, mille tagajärjel elektrienergia muundub soojusenergiaks.

Dielektriliste kadude võimsus

$$P = 2\pi f C U^2 \operatorname{tg} \delta,$$

kus C — elektroodide ja dielektriku poolt moodustatud kondensaatori mahtuvus;

U — pinge kondensaatori klemmidel V;

$\operatorname{tg} \delta$ — kaonurga tangens, mis võrdub voolu aktiivkomponendi ja reaktiivkomponendi suhtega.

See võimsus sõltub antud dielektriku puhul mahtuvusest, sagedusest ja pingest.

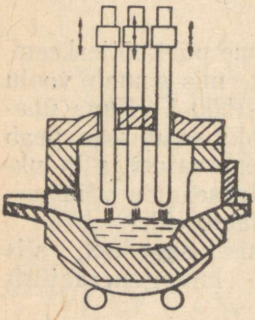
Kui paigutada dielektrik teatud kindla sageduse ja väljatugevusega elektrivälja, muutub elektrienergia soojuseks selli-

sel määral, mis tagab kogu dielektriku ühtlase ja kiire kuumenemise.

Et pinge tunduv tõstmine on seotud raskustega, siis vajaliku kuumustemperatuuri saavutamiseks tõstetakse sagedust (kuni $50 \cdot 10^6$ Hz).

12-5. Kaarleekahjud

Kaarleekahje võib jaotada kolme rühma: 1) otsese küttega kaarleekahjud (joon. 12-16), kus kaarleek põleb otse elektroodi ja sulametalli vahel; 2) kaudse küttega kaarleekahjud, kus kaarleek põleb ainult elektroodide vahel; 3) kaarleek-takistusahjud, kus kaarleek põleb sulatatavas materjalis.



Joon. 12-16. Otsese küttega kaarleekahju põhimõtteline ehitus.

Kaarleekahjude eristavaks iseärasuseks on kaarleegi olemasolu, millesse on keskendatud suur võimsus ja kõrge temperatuur.

Neid ahje iseloomustavad suured temperatuurivahed ahju üksikute osade vahel, mistõttu ühtlast kuumutamist ei ole võimalik saavutada.

Kaarleekahje kasutatakse peamiselt mustade metallide sulatamiseks ja mõnede värviliste metallide saamiseks maakidest.

KOLMETEISTKÜMNES PEATÜKK

ELEKTRIVALGUSTUS

13-1. Põhimõisted

Hea valgustus võimaldab tõsta tööviljakust, parandada toodangu kvaliteeti ja vähendada õnnetusjuhtumite arvu.

Tänapäeval kasutatakse kunstlike valgusallikaina enamikul juhtudel hõõglampe, kus valgust kiirgab kuni umbes 3000°-ni kuumendatud volframniit.

Osa lambi poolt kiiratavast energiast tajub silm valgusaistinguna. Silma poolt ajaühikus valgusaistinguna tajutud energiahulka nimetatakse v a l g u s v o o k s (F).

Valgusvoo ühikuks on luumen (lm). Selle ühiku täpne suurus määratakse kindlaks D. I. Mendelejevi nimelise Üleliidulise Metroloogia Teadusliku Uurimise Instituudi (ВНИИМ) etaloonlambi järgi.

Näitena märgime, et 100-vatine 127-voldine hõõglamp kiirgab nimipingel välja valgusvoo $F = 1\,275$ lm.

Valgusvoo jaotumist ruumis iseloomustab valgustugevus (I). Valgustugevuseks nimetatakse valgusvoo suhet sellesse ruuminurka, millesse ta kiirgub.

Niisiis valgustugevus

$$I = \frac{F}{\omega}.$$

Ruuminurgaks nimetatakse ruumi osa, mis on piiratud koonilise pinnaga, mille tipp asub kera tsentris ja mis toetub selle kera meelevaldsele pinnaosale. Ruuminurka mõõdetakse tema poolt eraldatud kerapinna osa (S) ja kera raadiuse (R) ruudu suhtega:

$$\omega = \frac{S}{R^2}.$$

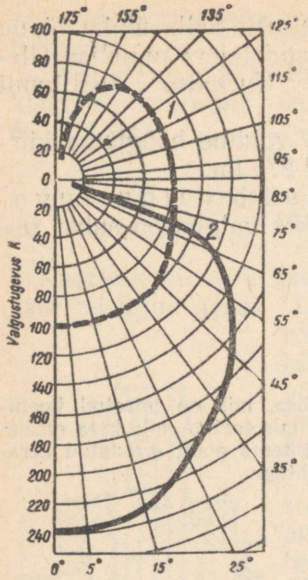
Ruuminurga ühikuks — steradiaaniks — on võetud nurk, mispuhul eraldatud kerapinna osa võrdub kera raadiuse ruuduga.

Valgustugevuse ühikuks on küünal (K). Üks küünal on sellise punktikujulise valgusallika valgustugevus, mis kiirgab ruuminurka 1 steradiaan ühtlaselt valgusvoo 1 luumen:

$$1\,\text{K} = \frac{1\,\text{lm}}{1\,\text{ster}}.$$

Lampide ja valgustite valgustugevus ei ole eri suundades ühesugune. Valgustugevuse jaotust iseloomustatakse polaarkoordinaatides ehitatud kõveratega. Hõõglampide kohta, mille puhul valgustugevuse kõverad omavad sümmeetriatelge, antakse tavaliselt ainult pool kõverat, sest kõvera teine pool on esimese peegelkujutis.

Näitena on joonisel 13-1 punktiirjoonega *1* kujutatud 100-vatise 220-voldise hõõglambi valgustugevuse kõver, täisjoonega *2* aga on kujutatud valgustugevus sama lambi kohta, kui see on varustatud valgustusarmatuuriga «Universaal». Raadiuse pikkus poolusest O kuni valgustugevuse kõverani väljendab teatud mastaabis valgustugevust raadiuse suunas. Raadiuse suund määratakse raadiuse ja vertikaaltelje vahelise nurgaga. Näiteks ilma valgustusarmatuurita lambi valgustugevus 15° nurga all tõmmatud raadiuse suunas on 100 K.



Joon. 13-1. Valgustugevuse kõverad.

1 — hõõglamp 220 V, 100 W;
2 — valgusti «Universaal» sama lambiga.

Valgusallika kogu valgusvoo ja kera kogu pinnale toetuva ruuminurga (4π) suhet nimetatakse keskmiseks sfääriliseks valgustugevuseks:

$$I_0 = \frac{F}{4\pi}.$$

See suurus näitab, missugune oleks antud valgusallika valgustugevus, kui tema valgusvoog jaotuks ühtlaselt igas suunas. Näiteks 100-vatise 127-voldise lambi valgusvoog $F = 1\,275$ lm ja tema keskmine sfääriline valgustugevus

$$I_0 = \frac{1\,275}{4 \cdot 3{,}14} \approx 100 \text{ K}.$$

Valgusvoo ja selle voo poolt ühtlaselt valgustatava pinna suhet nimetatakse valgustustiheduseks:

$$E = \frac{F}{S}.$$

Valgustustihedus iseloomustab valgustuse intensiivsust.

Valgustustiheduse ühikuks on luks (lx), mille tekitab pinnale 1 m² langev valgusvoog 1 lm:

$$1 \text{ lx} = \frac{1 \text{ lm}}{1 \text{ m}^2}.$$

Näiteks lugemiseks on vajalik pinna valgustustihedus 50 lx.

Mida suurem valgusvoog langeb silma helendava või valgustatava pinna ühikult, seda tugevam on eseme kujutise poolt põhjustatud nägemistaju silma võrkkestal. Seega on ese näha seda paremini, mida rohkem valgust ta kiirgab oma pinna ühikult.

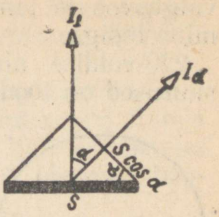
Heleduseks (B) nimetatakse pinnalt kiirguva valgustugevuse ja selle pinna suhet. Ta iseloomustab pinna nähtavust.

Heledus pinna normaali (ristsirge) suunas (joon. 13-2) määratakse avaldisega:

$$B_{\perp} = \frac{I_{\perp}}{S}.$$

Heledus suunas, mis moodustab pinna normaaliga nurga α (joon. 13-2):

$$B_{\alpha} = \frac{I_{\alpha}}{S_{\cos\alpha}}.$$



Joon. 13-2. Pinnalt peegeldunud valguse heledus.

Heleduse ühikuks on stilb (sb). Tasapinna heledus on 1 sb, kui selle pinna iga cm^2 kiirgab normaali suunas valgustugevusega 1 K:

$$1\ \text{sb} = \frac{1\text{K}}{1\text{cm}^2}.$$

Näiteks on küünlaleegi heledus 0,6 sb ja gaastäitega hõõglambi niidi heledus 500 sb.

Kehale langev valgusvoog võib sõltuvalt selle pinna füüsikalistest omadustest ja olekust suuremal või vähemal määral peegelduda, neelduda või tungida läbi keha.

Kehalt peegelduva valgusvoo F_p ja kehale langeva valgusvoo F_1 suhet nimetatakse peegeldumisteguriks:

$$\varrho = \frac{F_p}{F_1}.$$

Näiteks peeglil on peegeldustegur 0,85, valgel liimivärvil 0,8, kollasel värvil 0,4.

Peegeldumisteguri suuruse järgi liigitatakse pinnad tumedateks, kui nende $\varrho = 0{,}06—0{,}2$; keskmisteks, kui $\varrho = 0{,}2—0{,}5$, ja heledateks, kui $\varrho = 0{,}5—0{,}8$.

13-2. Valgusallikad

Hõõglambi väliskuju on näidatud joonisel 13-3.

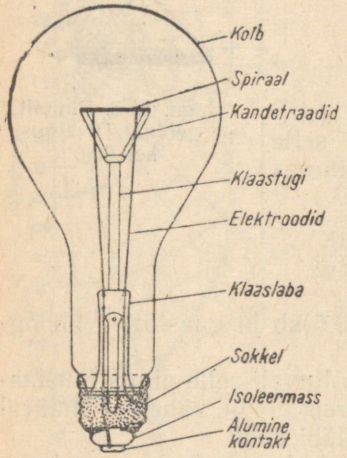
Normaalsed hõõglambid võimsusega kuni 40—60 W valmistatakse õhutühjadena.

Suurema võimsusega lampides täidetakse kolb pärast õhu väljapumpamist inertse gaasiga, tavaliselt argooni ja lämmastiku seguga. Need gaasid takistavad lambi hõõgniidi aurumist, mille tagajärjel lambi tööiga suureneb.

Hõõglambi iseloomustavateks näitajateks on: 1) nimipinge; 2) elektriline võimsus; 3) valgusvoog; 4) valgusviljakus, s. o.

valgusvoo ja lambi poolt tarbitava võimsuse suhe; 5) keskmine tööiga.

220-voldise nimipingega lampide põhilised iseloomustussuurused on toodud tabelis 13-1.



Joon. 13-3. Hõõglambi ehitus.

Tabel 13-1

Võimsus W	Pinge 220 V	
	Valgusvoog lm	Valgusviljakus lm/W
25	191	7,65
40	336	8,40
60	540	9,00
75	671	10,19
100	1000	10,42
150	1710	11,87
200	2510	13,07
300	4100	14,24
500	7560	15,59

Lambi hõõgniit, mis õhutühjas lambis on kuumendatud temperatuurini 2400° ja gaasitäitega lambis temperatuurini 2900°, aurustub aja jooksul, moodustades kolvi sisepinnal tumeda kihi. See vähendab valgusvoogu, mistõttu lambi ekspluateerimine muutub ebaökonoomseks. Hõõglambi normaalseks tööeaks loetakse 1000 tundi.

Lambi tööiga sõltub tunduval määral temale rakendatavast pingest. Nimipinge kõikumisel $\pm$ 1% võrra võib lambi tööiga muutuda keskmiselt $\pm$ 13%.

Gaasitäitega lampides esinevad gaasi soojusjuhtivuse tõttu suured kaod soojuse näol. Soojuskadude vähendamiseks kasutatakse viimasel ajal bispiraalseid hõõgniite, mis on saadud selliselt, et volframtraadist spiraal on keeratud veel kord spiraali.

§ 10-3 käsitleti elektrivoolu nähtusi gaasides. Seal märgiti, et anoodi juures tekib helendus. Seda helendust kasutatakse laialdaselt gaaslahendustorudes reklaamvalgustuseks. Normaalseks valgustuseks ei ole need torud sobivad, sest nad kiirgavad värvilist valgust.

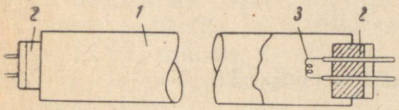
Voolu kulgemisel hõrendatud gaasides täheldatavaid nähtusi

rakendatakse tänapäeval luminestsentslampides. Need lambid on väga ökonoomsed ja kiirgavad valgust, mis on spektrilt väga lähedane päikesevalgusele.

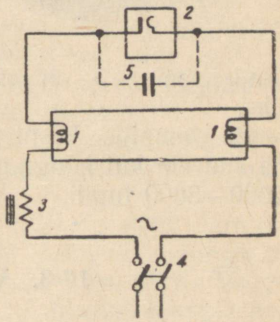
Joonisel 13-4 on kujutatud luminestsentslamp, mis koosneb klaastorust *1*. Toru kumbagi otsa on kinnitatud soklid *2*, mis kannavad bispiraalseid volframelektroode. Volframniit on elektronide emissiooni hõlbustamiseks kaetud õhukese baariumoksüüdi kihiga.

Klaastoru sisepind on kaetud luminofooridega, milleks kasutatakse kaltsiumi, magneesiumi, tsingi jt. spetsiaalselt töödeldud ühendeid väävliga. Lambi elektroodidele juhitav elektrienergia muundub kiirgusenergiaks, mis luminofoorile langedes paneb selle helenduma. Luminofoorid muundavad kiirguse nähtamatu ultravioletse osa nähtavaks valguseks, mistõttu luminestsentslampide valgusviljakus on tunduvalt suurem kui hõõglampidel. Luminofooride valikuga õnnestus saada lampe, mille kiirguse spektraalne koostis sarnaneb päevavalguse omaga.

Õhk pumbatakse torust välja, kuid süütamise hõlbustamiseks viiakse sinna teatav kogus elavhõbedat ja argooni.



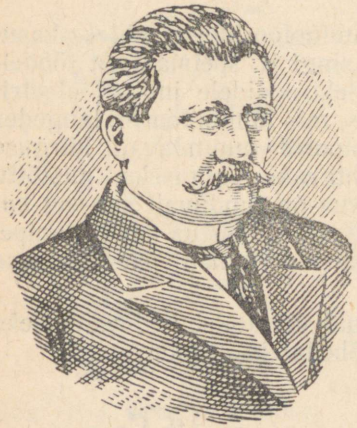
Joon. 13-4. Luminestsentslamp.



Joon. 13-5. Luminestsentslambi lülitusskeem.

Lambi skeem on näidatud joonisel 13-5. Lambi elektroodid *1* ühendatakse järjestikku starteriga *2* ja paispooliga *3*. Starter koosneb soojusreleest, mille bimetallplaadike paikneb neooniga täidetud klaasballoonis. Lüliti *4* sulgemisel tekib starteris leeklahendus, bimetallplaat kuumeneb, paindub ning sulgeb elektroodide ahela. Kuna starteri kontaktid on suletud, siis leeklahendus seal katkeb, bimetallplaat jahtub ja katkestab elektroodide ahela. Selleks ajaks on elektroodid kuume-

nenud elektronide emiteerimiseks vajaliku temperatuurini (800—1000°) ja vooluahela katkemise hetkel paispoolis indutseeritava kõrge pinge tõttu tekib torus sädelahendus, mis läheb üle leeklahenduseks. Leeklahendus tekitab suurel hulgal ultravioletset kiirgust, mille luminofoorid muundavad nähtavaks valguseks.



Aleksandr Nikolajevitš Lodõgin (1847—1923). Silmapaistev vene insener, hõõglambi leiutaja.

Kondensaator *5* on ette nähtud raadiohäirete kõrvaldamiseks.

Nende lampide kasutegur on umbes 6%, seega 2,5—3 korda suurem kui hõõglampidel. Luminestsentslampide tööiga on 2000—3000 tundi.

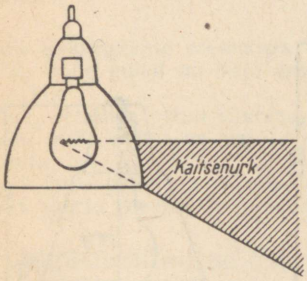
13-3. Valgustusseadised

Valgustusseadiseid, mis on ette nähtud valgustamiseks kuni 20—30 m kaugusele, nimetatakse *valgustiteks*. Valgustusseadiseid kaugemale valgustamiseks nimetatakse *prožektoriteks*. Valgustusseadis koosneb lambist ja armatuurist, mille ülesandeks on valgusvoo õige jaotamine, silmade kaitsmine liigse heleduse eest, valgusallika kaitsmine vigastuste ning määrdumise eest jne.

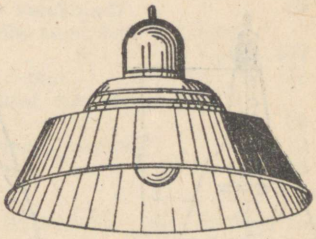
Silmade kaitsmise astet valgusallika kiirgava osa pimestava mõju eest iseloomustatakse valgusti *kaitsenurgaga* (joon. 13-6), mille piirides lambi kiirgavad osad ei ole silmale nähtavad.

Valgusti kasuteguriks nimetatakse tema poolt kiiratava valgusvoo ja lambi valgusvoo suhet.

Otsese valgustusega valgusti kiirgab vähemalt 90% valgusvoost alumisse poolsfääri. Üheks selliseks valgustiks on «Universaal» (joon. 13-7), mille kohta valgustugevuse



Joon. 13-6. Valgusti kaitsenurk.



Joon. 13-7. Valgusti «Universaal».

jaotus on näidatud joonisel 13-1. Seda valgustit kasutatakse kuni 6—8 m kõrguste vabrikuruumide valgustamiseks. Valgusti «Universaal» koosneb teraskuplist, mis on väljastpoolt kaetud tumeda ja seestpoolt valge emailiga, ning selle sees paiknevast lambist. Silmade kaitsmiseks ereda valguse eest kasutatakse mõnikord mattklaasist hajutajat.

Valgustis võib kasutada lampi võimsusega kuni 500 W. Tema kaitsenurk on 14° ja kasutegur mattklaasist hajutaja korral 58%, ilma hajutajata aga 70%.

Otsese valgusega valgustiks on ka valgusti «Sügavkiirgaja» (joon. 13-8), mis on arvestatud lambi jaoks võimsusega kuni 1000 W. Tema kaitsenurk on 27° ja kasutegur 58%. Valgusti on lihtne, odav ja seda kasutatakse laialdaselt tootmisruumides, kusjuures riputuskõrgus ei ületa 12 m.

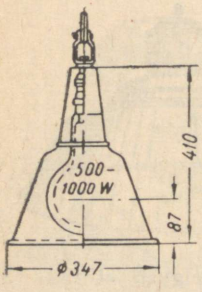
Hajutatud valgustusega valgustid jaotavad valgusvoo nii, et ühte poolsfääri kiirgub üle 10%, teise aga alla 90% valgusvoost.

Üheks selliseks valgustiks on «Lütsett» (joon. 13-9), mida kasutatakse nii tootmisruumides kui ka kontori- jt. ruumides. Tema kuppel, mis on valmistatud piimklaasist, on alt lahtine. Valgusti on ette nähtud lambi jaoks kuni 200 W ja teda kasutatakse 3—5 m kõrgusel. Valgusti kasutegur on 75% ja kaitsenurk 36°.

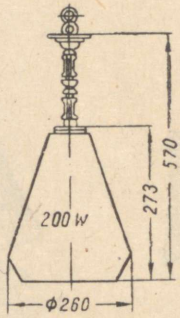
Kaudse valgustusega valgustid kiirgavad vähemalt 90% kogu valgusvoost ülemisse poolsfääri. Need lambid

võivad olla kujult väga mitmesugused ja peavad olema kooskõlas ruumi arhitektuurilise kujundusega.

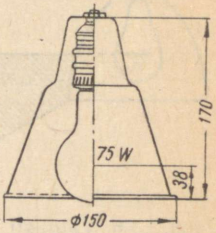
Töökohtade täiendavaks valgustamiseks kasutatakse valgustit «Alfa» (joon. 13-10). Valgustis võib kasutada kuni 75 W võimsusega lampe; tema kasutegur on umbes 50%.



Joon. 13-8. Valgusti «Sügavkiirgaja», emailitud.

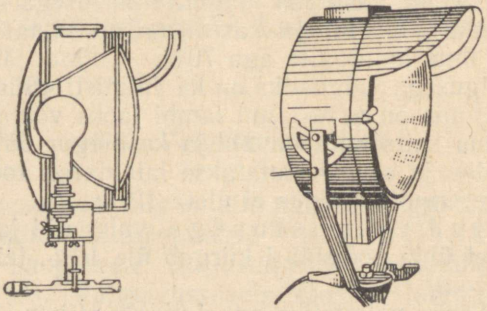


Joon. 13-9. Valgusti «Lütsett», piimklaasist.



Joon. 13-10. Valgusti «Alfa».

Väljakute, raudteede, väljas olevate töökohtade jt. valgustamiseks pimedal ajal kasutatakse prožektoreid. Joonisel 13-11 on kujutatud prožektor ПЗ-45. Optilise süsteemi abil koonda-



Joon. 13-11. Prožektor ПЗ-45.

takse valgusvoog väiksesse ruuminurka, millega saavutatakse suur valgustugevus (sajad tuhanded küünlad). Prožektor ПЗ-45 on arvestatud 1000 W lambi jaoks ja ta annab valgustugevuse 160 000 K.

13-4. Elektrivalgustuse arvutus

Valgustuse arvutamisel tuleb lähtuda minimaalse valgustustiheduse normidest sõltuvalt töö iseloomust.

Erisugustel töödel on minimaalsed valgustustihedused järgmised.

Tööd isekiirgavate esemetega (sepikojad, valukojad)	50 lx
Tööd, mille puhul on vaja eraldada detaile suurusega 0,2 kuni 1 mm	100—300 lx
Sama, detailide puhul suurusega 1 kuni 10 mm	75 lx
Tööd, mille puhul on vaja eraldada esemed suurusega 1 kuni mitu cm	20 lx
Tööd, mille puhul on vaja eraldada suuremaid esemeid	10 lx
Tööd suurte esemete ja puistainete ladudes	5 lx

Valgustustiheduse normid administratiiv- ja kontoriruumide kohta on järgmised.

Administratiiv- ja kontoriruumid, lugemistoad, õppetoad	50 lx
Sööklad, puhvetid, köögid	50 lx
Duširuumid, käimlad	15 lx
Läbikäigud, trepikojad, koridorid	10—5 lx

Selleks et valgustus oleks küllaldaselt ühtlane, tuleb üles seada mitte üks, vaid mitu valgustit ja paigutada need sellisele kaugusele üksteisest, et nende omavaheline kaugus ei oleks suurem kui valgustite kahekordne kõrgus tööpinnast, s. t. $L \leqslant 2H$.

Valgustite vahekaugus on soovitav võtta nii ruumi pikkuse kui ka laiuse sihis ühesugune, s. t. paigutada nad ruudu tippudesse. Kui seinte ääres töökohti ei ole, siis paigutatakse seinaäärne valgustite rida seinast kaugusele $(0{,}4 \div 0{,}5)L$ (L on ridadevaheline kaugus). Kui aga seinte ääres on töökohad, siis kaugusele $(0{,}2 \div 0{,}25)L$.

Valgustid peavad olema nii üles seatud, et tsehhi seadmed ei segaks töökohtade valgustamist.

Valgustite minimaalne riputuskõrgus oli märgitud eespool.

Elektrivalgustuse arvutamise lihtsaimaks meetodiks kuni 100 m² suuruse põrandapinnaga ruumi korral on arvutus erivõimsuse (W/m²) normide järgi.

Tabelis 13-2 on toodud võimsuse normid põrandapinna 1 m² kohta sõltuvalt ruumi põrandapinna suurusest, valgustite tüübist ja vajalikust valgustustihedusest. Niisiis antud ruumi valgustuse arvutamiseks tuleb võtta tabelist vastav erivõimsus, korrutada see ruumi põrandapinnaga ja saadud üldvõimsuse jagamisel lampide arvuga saamegi ühe lambi võimsuse.

Tabel 13-2

Erivõimsused 11—100 m² suuruste ruumide kohta

Ruumi põrandapind m²	Valgusti tüüp	Valgustustihedus 1x (riputuskõrgus 2,5—3,5 m)							
		100	75	50	30	20	15	10	5
11—20	1. «Lütsett» tervikklaasist; «Universaal» poolmattklaasist hajutajaga	47	35	23	15	11	8	5	—
	2. «Universaal» hajutajata; «Alfa»	32	26	19	11	8	6	4	3
	3. Kuul, plafoon	—	—	40	26	18	14	10	—
	4. Vee- ja tolmukindel portselanist valgusti; poolhermeetiline valgusti	—	—	29	20	15	11	7	4
21—50	1. «Lütsett» tervikklaasist; hajutajata «Universaal» poolmattklaasist hajutajaga	34	26	18	11	8	6	4	—
	2. «Universaal» hajutajata; «Alfa»	25	19	13	8,5	6,5	5	3,5	2
	3. Kuul, plafoon	52	43	30	20	14	10,5	7	—
	4. Vee- ja tolmukindel portselanist valgusti; poolhermeetiline valgusti	40	34	23	13	9	7	5	3
50—100	1. «Lütsett» tervikklaasist; «Universaal» poolmattklaasist hajutajaga	28	24	18	11	7	5,5	4	—
	2. «Universaal» hajutajata; «Alfa»	22	16	11	7	5	4	3	1,5
	3. Kuul, plafoon	48	36	24	15	11	8	5	—
	4. Vee- ja tolmukindel portselanist valgusti; poolhermeetiline valgusti	35	27	16	12	8	6	4	2,5

Märkus. Tabelis toodud erivõimsused kehtivad pingel 220 V. Pingel 127 V tuleb võimsusi vähendada 10% võrra.

Üheaegselt töövalgustusega peab ruumides olema ka avariivalgustus. Ruumides, kus tööseisakud ei ole lubatud (välu- ja martääntsehhid, elektrijaamad ja alajaamad), seatakse sisse avariivalgustus kestvaks töötamiseks. Avariivalgustusel peab olema iseseisev toiteallikas ja ta peab andma valgustustiheduse, mis moodustab vähemalt 10% normaalsest valgustustihedusest.

Kuni 50 töötajaga tootmisruumides, kus töö ajutine katkestamine on lubatud, kuid kus valguse puudumine võib põhjustada tööõnnetusi, samuti läbikäikudes ja trepikodades peab olema sisse seatud avariivalgustus inimeste evakueerimiseks.

Avariivalgustuse valgustid võivad töötada üheaegselt töövalgustuse valgustitega või nad lülitatakse automaatselt sisse töövalgustuse kustumisel.

NELJATEISTKÜMNES PEATÜKK

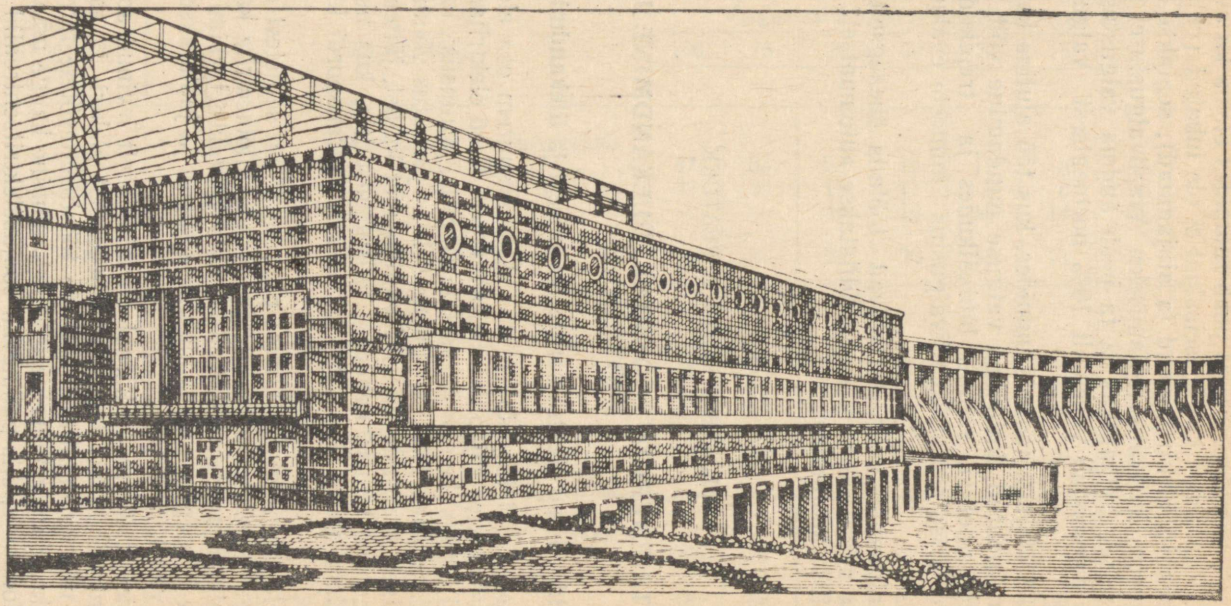
ELEKTRIENERGIA TOOTMINE, ÜLEKANDMINE JA JAOTAMINE

14-1. Üldmõisted elektrienergia tootmisest ja ülekandmisest

Käesoleval ajal toodetakse NSV Liidus suurem osa elektrienergiat võimsates rajoonielektrijaamades. Need elektrijaamad paiknevad looduslike energiavarude (turvas, pruunsüsi, langev vesi) piirkondades. Elektrijaamade selline paigutus võimaldab ratsionaalselt kasutada madalakvaliteedilist kütust, jättes kõrgekvaliteedilise kütuse nendele tööstusharudele, kus neid ei saa asendada teiste liikidega, ja vabastab transpordi kütuse veost.

Kuna elektrienergia tarbimise piirkonnad on sellistest elektrijaamadest tavaliselt kümnete ja sadade kilomeetrite kaugusel, siis elektrijaamas toodetud energia kantakse tarbimispiirkonda üle kõrgepinge-ülekandeliinide kaudu ja jaotatakse seal tarbijate vahel.

Rajoonielektrijaamade kõrval on laialdaselt levinud soojuselektritsentraalid, mis toodavad üheaegselt elektri- ja soojusenergiat, mis on vajalik linnade ja tööstusettevõtete termofitseerimiseks. Kuna soojusenergia ülekandmine kauge maa taha pole ratsionaalne, siis paiknevad soojuselektritsentraalid energia tarbimise piirkondades.



Joon, 14-1. Dnepri hüdroelektrijaam pärast taastamist.

Peale eelnimetatute on olemas veel kohaliku tähtsusega elektrijaamad, näiteks tööstusettevõtete, linna- ja põllumajanduslikud elektrijaamad. Selliste elektrijaamade võimsus on tunduvalt väiksem ja nad töötavad kas koos (paralleelselt) suurte elektrijaamadega või iseseisvalt (isoleeritult).

Elektrijaamade poolt tarbitava energia liigi järgi saab neid jaotada hüdroelektrijaamadeks ja soojuselektrijaamadeks. Tuule-elektrijaamad on seni veel vähe levinud.

Hüdroelektrijaamad kasutavad vee liikumisenergiat. Nendes elektrijaamades on kõige suuremate ehituskuludega seadeldisteks hüdrotehnilised ehitised, mis võimaldavad tekitada ja reguleerida vajalikku veesurvet ja juhtida vett hüdroturbiinidele. Hüdroturbiinis muundatakse vee-energia mehaaniliseks energiaks. Hüdroturbiiniga ühisel võllil asetsevas generaatoris muundatakse mehaaniline energia elektrienergiaks.

Joonisel 14-1 on näidatud V. I. Lenini nimeline Dnepri hüdroelektrijaam. See elektrijaam, mille ehitamine lõpetati 1932. aastal ja mis sõja ajal purustati, on täielikult taastatud.

Soojuselektrijaamad liigitatakse auruturbiinidega elektrijaamadeks, mis on kõige laialdasemalt levinud ja sisepõlemismootoritega elektrijaamadeks (kohaliku tähtsusega elektrijaamad).

Joonisel 14-2 on näidatud soojuselektrijaama skeem.

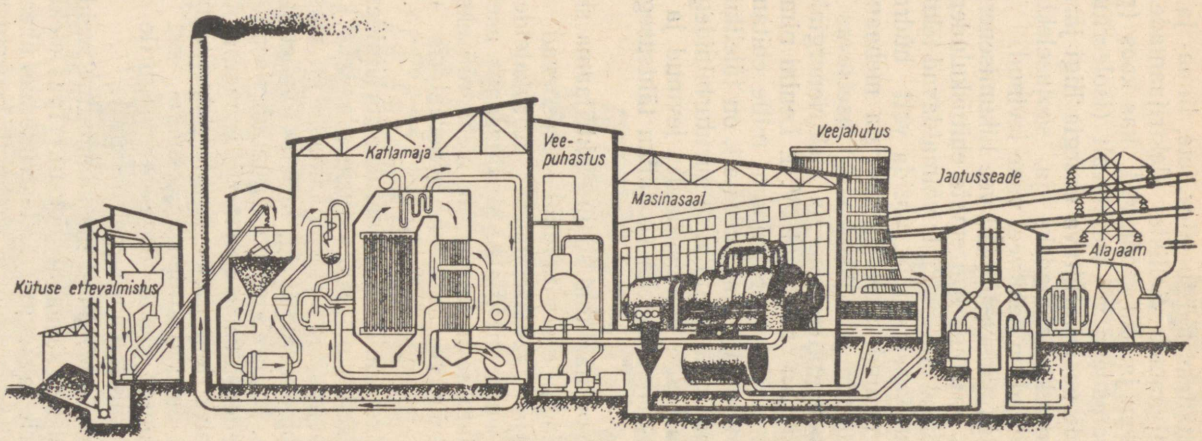
Auruturbiinidega elektrijaamad koosnevad katlamajast, masinasaalist ja jaotusseadmest. Aurukateldes muundub kütuse energia auru energiaks. Masinasaalis asetsevates turbiinides muundatakse auru energia mehaaniliseks energiaks. Turbiiniga ühisel võllil asetsevas generaatoris muundatakse mehaaniline energia elektrienergiaks.

Soojuselektritsentraalides suunatakse turbiinidest läbikäinud aur tarbijatele selles peituva soojuse edasiseks kasutamiseks.

Sisepõlemismootoritega elektrijaamadel on masinasaal, kus paiknevad sisepõlemismootorid, mis on vahetult ühendatud generaatoritega. Kütuse energia muundub sisepõlemismootoris mehaaniliseks energiaks ja generaatoris muundatakse mehaaniline energia elektrienergiaks. Nende elektrijaamade võimsus on väiksem kui auruturbiinidega jaamadel, sest sisepõlemismootorid, vaatamata nende kõrgele kasutegurile, vajavad kõrgekvaliteedilist kütust (nafta, petrooleum).

Elektrijaamade koormus ei ole konstantne, vaid muutub nii ööpäeva jooksul kui ka aasta jooksul. Igas elektrijaamas on mitu generaatorit (agregaati). Elektrijaamas üheaegselt töötavate generaatorite arv muutub vastavalt koormusele.

Kõik rajoonielektrijaamad ja soojuselektritsentraalid ning



Joon. 14-2. Soojuselektrijaam.

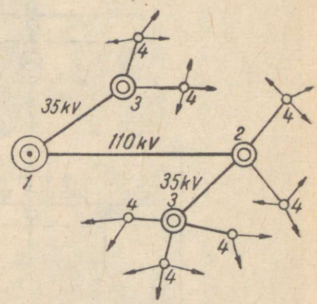
samuti osa kohaliku tähtsusega elektrijaamadest toodavad elektrienergiat kolmefaasilise vahelduvvooluna. Mõned kohaliku tähtsusega elektrijaamad toodavad alalisvoolu energiat.

Väikse võimsusega kohalikud elektrijaamad teenindavad jaama vahetus läheduses asetsevaid tarbijaid. Sel juhul toimub elektrienergia ülekanne pingel, mis võrdub generaatorite pingega.

Need elektrijaamad toodavad alalisvoolu energiat pingel 110, 220 ja 440 V ning vahelduvvoolu energiat pingel 127—220—380 või 500 V.

Nimetatud pinged on standardsed.

Suurema võimsusega kohalikud elektrijaamad töötavad pingel 3—6 kV. Sel juhul suunatakse elektrienergia jaamast vahetult kõrgepingeliinide kaudu kõrgepingelistele tarbijatele või transformeeritakse ja juhitakse tarbijatele 127—220—380 või 500 V võrgu kaudu.



Joon. 14-3. Elektrienergia jaotamise skeem.

1 — elektrijaam ja 15/110 ning 15/35 kV alajaam; *2* — 110/35 ja 110/6 kV alajaam; *3* — 35/6 kV alajaam; *4* — 6/0,22 kV alajaam.

Rajoonielektrijaamades ja soojuselektritsentraalides on üles seatud generaatorid pingega 6—10—15 kV. Sellistest jaamadest elektrienergia ülekandmisel transformeeritakse generaatoripinge pingettõstvas alajaamas pingele 110 ja 220 kV ja kantakse sellel pingel ülekandeliinide kaudu 110—220/35 või (väga harva) 110—220/10 kV pingetmadaldavasse alajaama, mis paikneb energia tarbimise piirkonnas. Järgnevalt transformeeritakse energia teistkordselt 35/10—6 kV alajaamas ja pingel 6—10 kV kantakse üle alajaamadesse, mis muundavad selle madalapingeliseks vahelduvvoolu energiaks, mis jaotatakse tarbijate vahel (joon. 14-3).

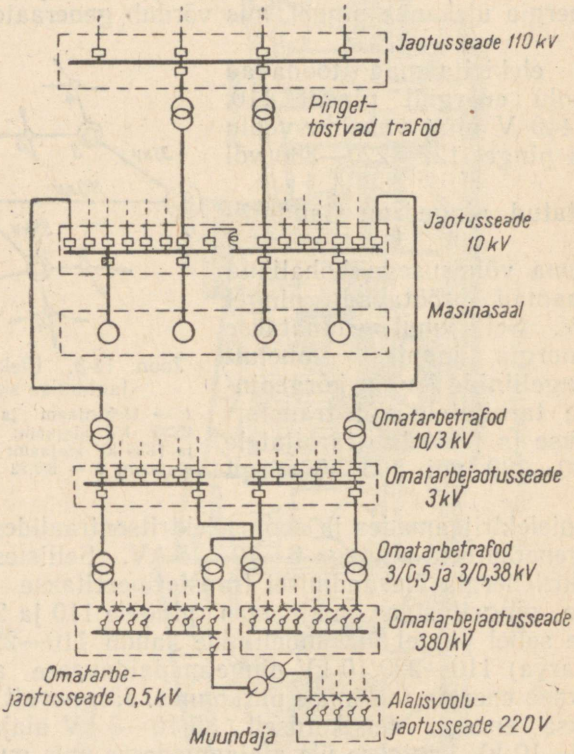
Mõnel juhul väljuvad pingettõstvast alajaamast peale 110—220 kV ülekandeliinide veel 35 ja 6—10 kV liinid.

Suure elektrijaama elektriline osa koosneb järgmistest põhielementidest:

1) kolmefaasilistest generaatoritest, jõutrafodest, muundajatest, mis muundavad vahelduvvoolu alalisvooluks, ja lõpuks jaama omatarvet teenindavatest elektrimootoritest;

2) jaotusseadmetest, mis kujutavad endast kommutatsiooni- ja mõõteaparatuuri kompleksi ning millede ülesandeks on kogumislattidele saabuva energia vastuvõtmine ja selle edasine jaotamine;

3) juhtimiskilbist, kuhu on koondatud: a) generaatorite, trafode ja ülekandeliinide võimsuslülitite juhtimisseadised; b) kõigi kilbilt juhitavate ahelate kontroll-mõõteriistad; c) kommutatsiooniaparatuuri asendi signalisatsioon.

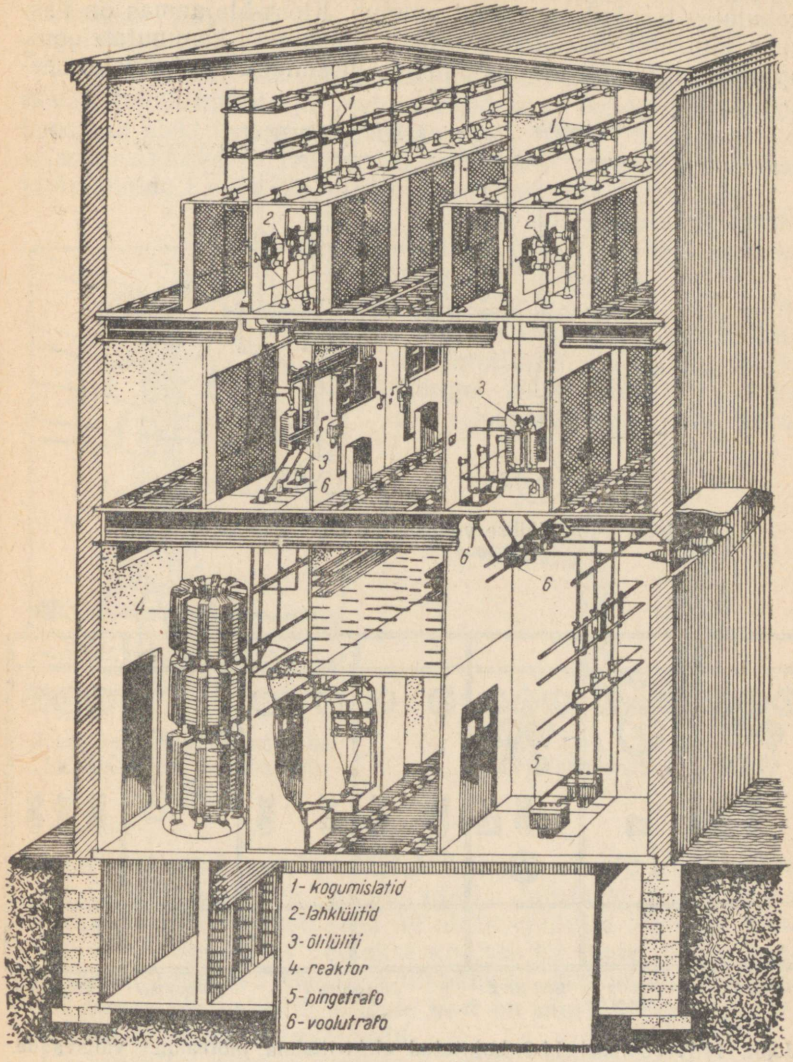


Joon. 14-4. Võimsa elektrijaama ja pingettõstva alajaama jaotusseadmete skeem.

Väikse võimsusega madalpingejaamas moodustavad jaotusseade ja juhtimiskilp ühe terviku, mida nimetatakse jaotuskilbiks (joon. 14-6 ja 14-7).

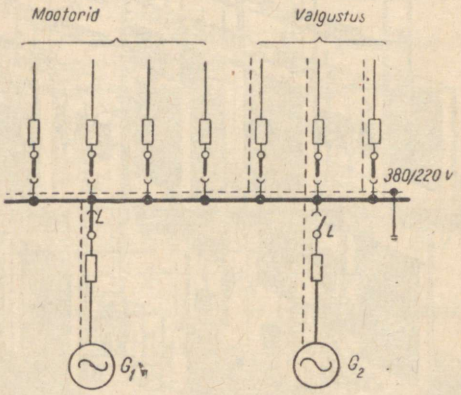
Alajaamad erinevad üksteisest võimsuse, pinge ja seadmestiku poolest.

Suure võimsusega 110—220 kV alajaamad on keerukad ehitised, kusjuures osa alajaama seadmestikust paikneb tavaliselt vabas õhus. Nende alajaamade põhielementideks on jõutrafod, jaotusseadmed ja juhtimiskilbid.

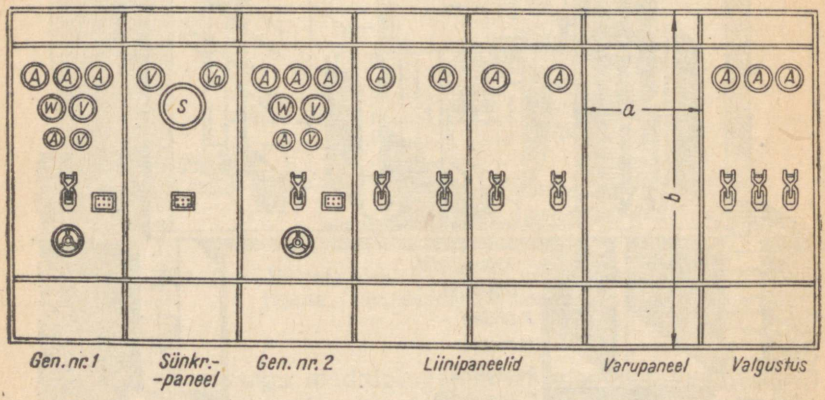


Joon. 14-5. 6—10 kV sisejaotusseadme üldvaade.

Lihtsaimaks alajaamaks on kiosk-alajaam, milles pidevalt kohalolev teeninduspersonal puudub. Kiosk-alajaamas on ükskaks jõutrafot koos hädavajaliku lihtsaima kommutatsiooniaparatuuriga. Nende alajaamade ülesandeks on transformee-



Joon. 14-6. Väikse võimsusega elektrijaama skeem.



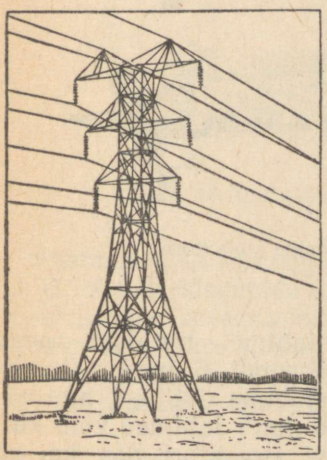
Joon. 14-7. Joonisel 14-6 kujutatud elektrijaama jaotuskilbi välisvaade.

rida kõrgepingeline energia (6—10 kV) madalpingeliseks elektrienergiaks (380—220—127 V), millega toidetakse väikse võimsusega tarbijaid.

Elektrienergia kantakse jaamast tarbijatele üle liinide ja alajaamade süsteemi kaudu, mida nimetatakse elektrivõrguks.

Pinge suuruse järgi liigitatakse elektrivõrgud kõrgepingevõrkudeks pingega üle 380 V ja madalpingevõrkudeks pingega 380 V ja alla selle.

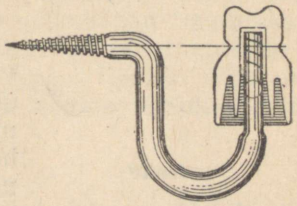
Oma otstarbelt jaotatakse võrgud toitevõrkudeks, mis koosnevad toiteliinidest, ja jaotusvõrkudeks. Toiteliinide kaudu kantakse elektrienergia elektrijaamast võrgu tähtsamatesse sõlmpunktidesse — toitepunktidesse, kust energia kantakse jaotusliinide kaudu üle vahetult elektrienergia tarbijatele.



Joon. 14-8. Metallmast kahe 110 kV kolmefaasilise liini jaoks.

Ehituse seisukohalt liigitatakse liinid õhu- ja kaabelliinideks ning sisevõrkudeks.

35—220 kV õhuliinide juhtmeteks on paljasjuhtmed, mis on kinnitatud rippisolaatoritele (pingel 35 kV kasutatakse ka varrasisolaatoreid). Isolaatorid on riputatud metallmastidele või pingel 110 kV ja alla selle ka puitmastidele (joon. 14-8). Juhtmete vahekaugus valitakse sellise arvestusega, et oleks välditud läbilöök juhtmete vahel, kusjuures võetakse arvesse ka tuule mõju. Mastide vahekauguseks võetakse umbkaudu 200 m. Liini kaitseks atmosfääriliste liigpingete eest on mastide tippu kinnitatud maandatud metalltrossid.

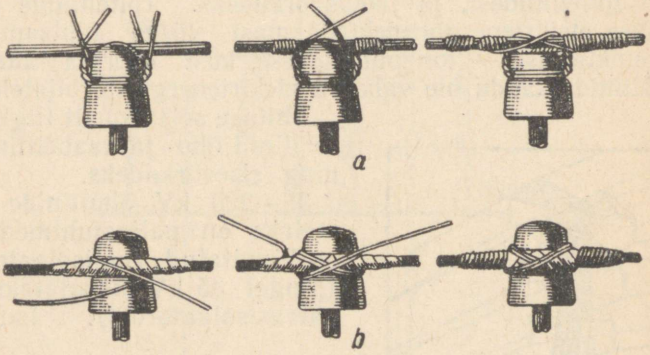


Joon. 14-9. Isolaator konksuga.

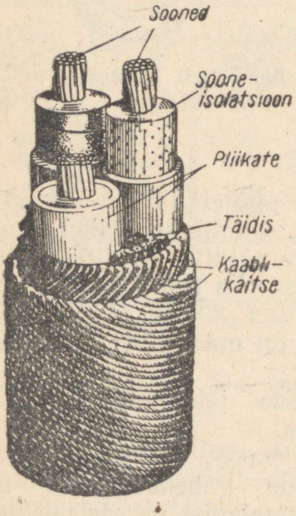
Ülekandeliin viiakse alajaama sisse läbiviiguisolaatorite kaudu, mis paiknevad alajaama seinas.

Madapinge-õhuliinides kasutatakse vask-, alumiinium- või terasjuhtmeid puitmastidel. Mastide vahekauguseks on 30—80 m. Juhtmed monteeritakse portselanist varrasisolaatoritele (joon. 14-9), mis kinnitatakse masti postisse keeratud teraskonksule.

Isolaatorid paiknevad mastil malekorras sellise arvestusega, et juhtmetevaheline kaugus pingel kuni 250 V oleks vähemalt 30 cm. Juhtmete kaugus maast peab olema vähemalt 5 m.



Joon. 14-10. Juhtmete kinnitamine isolaatorile.



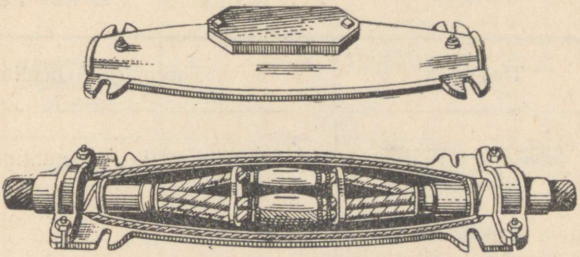
Joon. 14-11. Kolmefaasiline kaabel.

Vask-köisjuhtme ristlõige peab olema vähemalt 6 mm², alumiinium-köisjuhtme ristlõige aga vähemalt 16 mm². Juhtmed võib kinnitada nii isolaatori pea kui ka kaela külge (joon. 14-10).

Kaabelliinides kasutatavad kaablid koosnevad ühest, kahest või kolmest isoleeritud soonest, mis on ümbritsetud kaablikaitsega. Joonisel 14-11 on näidatud kolmesoonelise kaabli ehitus. Isoleermaterjalina kasutatakse erisegudega immutatud paberit. Kaitseks niiskuse eest ümbritsetakse sooned pliikattega, mis kaetakse pealt asfalditud džuudiga. Selle peal on spiraalina teraslindist soomus, mis kaitseb kaablit mehaaniliste vigastuste eest. Kaablisoomus on omakorda kaetud asfalditud džuutmähisega.

Kaablid paigaldatakse maasse 60—80 cm sügavusele. Suurtes

linnades, kus on olemas keerukas maa-aluste ehitiste süsteem, ehitatakse spetsiaalsed maa-alused koridorid-kollektorid, kuhu paigutatakse ka kaablid. Kaabliotste ühendamiseks ja haruühenduste tegemiseks kasutatakse pliist, terasest või malmist kaablimuhve (joon. 14-12).



Joon. 14-12. Kaabliotste ühendamine malmmuhvis.

Kaablisoontelt kõrvaldatakse kaitsekatted, isolatsioonikiht ja jätkatakse klemmide abil ning jätkukohad tinutatakse üle. Kaablisoonte isoleerimiseks ja niiskuse sissetungimise vältimiseks täidetakse muhv kaablipigiga. Kaabli lõpetamiseks kasutatakse malmist lõpumuhve ja terasest kaablilehtreid, mis samuti täidetakse kaablipigiga.

14-2. Joonistel ja skeemidel kasutatavad tingmärgid

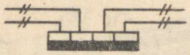
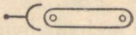
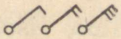
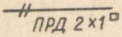
Vagustusseadmete montaaži teostatakse jooniste ja skeemide järgi, milledel on tingmärkidega tähistatud energiatarbijad, rühmakilbid, lülitid, pistikupesad ja juhtmed, nende ristlõige ning mark.

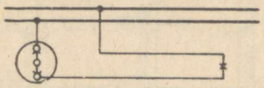
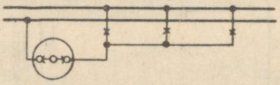
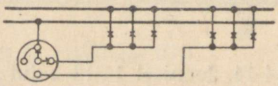
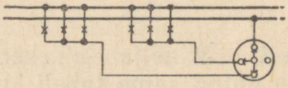
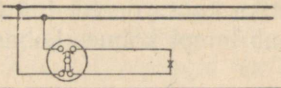
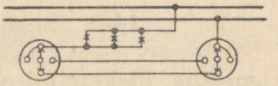
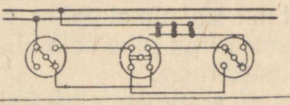
Tabelis 14-1 on toodud sagedamini esinevad tingmärgid.

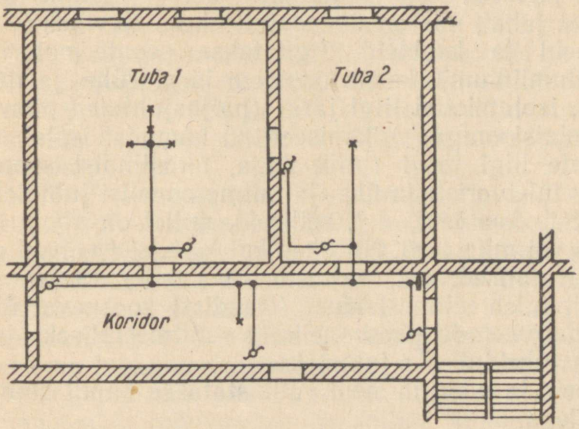
Joonisel 14-13 on toodud korteri valgustusjuhtmestiku skeem. Sellise skeemi järgi, kus mitu juhet või soont on kujutatud ühe joonega, peab oskama kindlaks määrata juhtmete arvu valgustusvõrgu mitmesugustes osades ja ühenduskohtades. Selleks peab teadma hõõglampide võrku lülitamise lihtsamaid skeeme, mis on antud tabelis 14-2.

Joonisel 14-14 on antud valgustusjuhtmestiku montaaživiskeem, mis vastab joonisel 14-13 toodud ühejoonelisele skeemile. Montaažiskeemil on iga juhe ja soon tähistatud eraldi joonega. Toas *1* on armatuur nelja hõõglambiga. Juhtmestik peab võimaldama sisse lülitada üht, kolme või kõiki nelja lampi. Juhtmestiku ja lüliti skeem selle juhu kohta on näida-

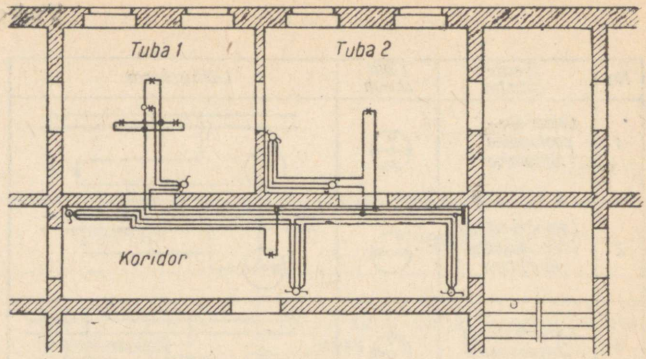
Tabel 14-1

Jrk. nr.	Tingmärk	Tingmärgi tähendus
1.		Rühmakilp nelja kahejuhtmelise liini jaoks
2.		Jaotuskilp
3.		Pistikupesa
4.		Ühe-, kahe- või kolmepooluseline pöördlüliti
5.		Ümberlüliti
6.		Kahesooneline juhe, mark ПРД ristlõige 1 mm²
7.		Üles minev juhe; alla minev juhe
8.		Alt tulev juhe; ülalt tulev juhe
9.		Ülalt tulev ja alla minev juhe; alt tulev ja üles minev juhe
10.		Maandus
11.		Kõrgepinge

Nr.	Skeemi nimetus	Lüliti skeem	Lülitusskeem
1	Lambi ühepooluseline lülitamine		
2	Lampide rühma ühepooluseline lülitamine		
3	Lampide rühma ühepooluseline ümberlülitamine		
4	Lampide rühma ühepooluseline ümberlülitamine		
5	Lambi kahepooluseline lülitamine		
6	Lampide rühma lülitamine kahest kohast		
7	Lampide rühma lülitamine kolmest kohast		



Joon. 14-13. Korteri elektrijuhtmestiku ühejooneline skeem.



Joon. 14-14. Joonisel 14-13 kujutatud skeemile vastav montaažiskeem.

tud tabeli 14-2 neljandal skeemil. Skeem toa *2* juhtmestiku kohta on antud sama tabeli kuuendal skeemil. Skeem koridori juhtmestiku kohta on toodud tabeli seitsmendal skeemil, mille järgi saab lampi kolmes kohas sisse lülitada.

14-3. Sisevõrkude ehitus

Elektrienergia ülekandmiseks kasutatakse juhtmeid.

J u h t m e k s nimetatakse paljast või isoleeritud traati või soont. Isoleeritud juhe võib olla ümbritsetud metallist või kummist kaitsekattega.

S o o n e k s nimetatakse üht või mitut kokkukeeratud traati.

N ö ö r j u h t m e k s nimetatakse kahte või kolme isoleeritud painduvat juhet, mis on ühendatud üheks tervikuks.

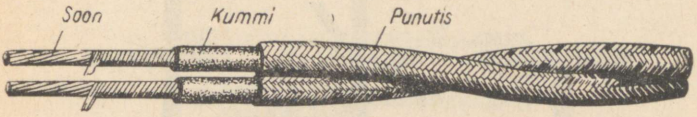
Juhtmeid ja kaableid liigitatakse soonte materjali järgi (vask, alumiinium), konstruktsiooni järgi (ühe- ja mitmesoonelised), isolatsiooni liigi järgi (paljasjuhtmed puuvillpunutisest isolatsiooniga, vulkaniseeritud kummist isolatsiooniga), kaitsekatte liigi järgi (pliikestaga, teraslindist soomusega).

Niisiis tuleb eristada ühe- ja mitmesoonelisi juhtmeid, nöörjuhtmeid ja kaableid, s. t. selliseid, millel on voolu kulgemiseks üks või mitu teed. Nii ühed kui ka teised võivad olla ühe- või mitmekiulised, s. t. koosneda ühest või mitmest traadist. Järelikult tuleb mitmest kiust (traadist) koosnevat ühesoonelist juhet nimetada ühesooneliseks mitmekiuliseks juhtmeks, mitte aga ühekiuliseks juhtmeks.

Juhtmeid ja nöörjuhtmeid valmistatakse ainult standardsete ristlõigetega.

Jõu- ja valgustusvõrkudes kasutatakse kõige rohkem järgmist marki juhtmeid.

1. Kahesooneline kummiisolatsiooniga juhe ПРД (joon. 14-15). See juhe on ette nähtud kohtkindlaks paigaldamiseks isoleerrullidele kuivades köetavates ruumides pingel mitte üle 220 V.



Joon. 14-15. Juhe ПРД ja nöörjuhe ШР.

2. Kummiisolatsiooniga kahesooneline nöörjuhe ШР (joon. 14-15). Kasutatakse samades tingimustes, mis juhet ПРД, kuid on viimasest painduvam.

3. Kummiisolatsiooniga ühesooneline armatuurjuhe АР (joon. 14-16). Kasutatakse valgustusarmatuuri ülespanemiseks. Soone ristlõige 0,75 mm². Kasutatav pingel kuni 220 V.



Joon. 14-16. Juhe АР.

Juhe АРД — sama, mis АР, kuid kahesooneline.

4. Kummiisolatsiooniga ühesoonelised juhtmed ПР ja АПР; esimene vask-, teine alumiiniumjuhe. Neid kasutatakse kohtkindlaks paigaldamiseks rullidel, isolaatoritel ja torudes. Juhet ПР valmistatakse pingetele 380—500—3000 V, juhet АПР ainult pingetele 380 ja 500 V. Isoleeritud alumiiniumjuhet ei lubata kasutada niisketes sööbivate aurude või gaasidega ruumides.

5. Juhe ПРГ — sama, mis ПР, kuid painduvam.

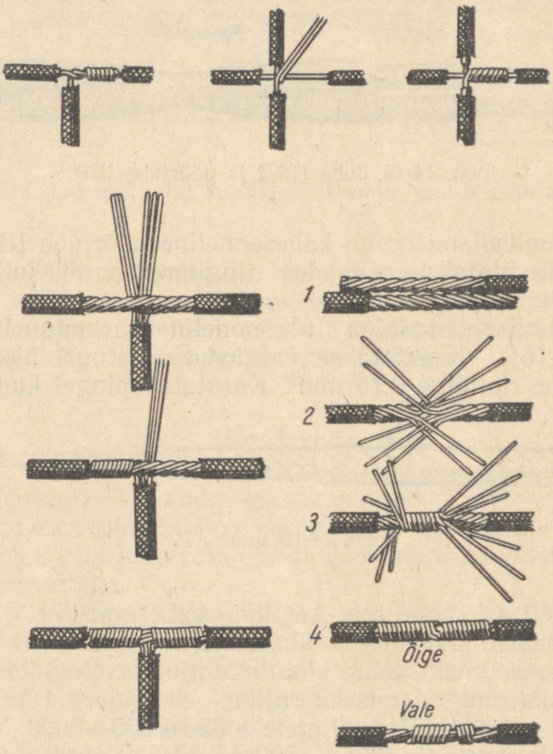
6. Juhe ДПРГ — sama, mis ПРГ, kuid kahesooneline.

7. Kummiisolatsiooniga juhe ПРТО. Kasutatakse paigaldamiseks terastorudes; konstruktsioonilt sarnane juhtmega ПРГ. Valmistatakse pingetele 500 ja 2000 V.

8. Vaskjuhe ПВМ. See juhe kuulub paljasjuhtmete hulka, sest ta ei oma kummiisolatsiooni, vaid on kaetud immutatud sukkpunutisega, mis kaitseb metalli korrodeerumise eest ilmastikutingimustes ja mõningate keemiliste ainete keskkonnas.

Seda juhet kasutatakse väljas (hoonetevahelised visangud, sisestused hooneisse).

Juhtmestiku paigaldamisel tuleb osutada erilist tähelepanu ühendustele ja juhtmete lõpetamisele, sest korratud ühendused võivad põhjustada häireid tarbijate varustamisel elektrienergiaga.

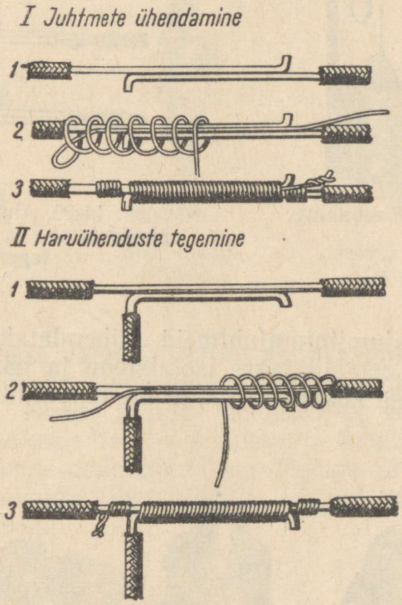


Joon. 14-17. Vaskjuhtmete ühendamine ja haruühenduste tegemine kokkukeeramise teel.

Kuni 6 mm² ristlõikega ühekiuliste ja samuti igasuguse ristlõikega mitmekiuliste juhtmete ning nöörjuhtmete ühenduskohad ja haruühendused teostatakse traatide kokkukeeramise teel, nii nagu on näidatud joonisel 14-17. Ühekiulised juhtmed ristlõikega 6 ja 10 mm² ühendatakse jootmise teel (joon. 14-18).

Kuni 6 mm² ristlõikega ühekiulise juhtme ühendamiseks tarbijaga tuleb juhtmelt eemaldada punutis ja isolatsioon ning

seejärel sõltuvalt klemmi konstruktsioonist kinnitada kohe paljas juhtmeots klemmi alla või painutada paljastatud traat rõngasse ja kinnitada kruviga. Isolatsioon ja punutis juhtme otsa või ühenduskoha juures on soovitav mähkida isoleerpaelaga.



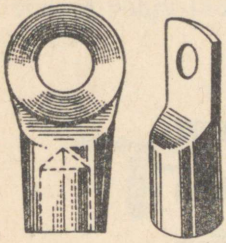
Joon. 14-18. Ühekiuliste vaskjuhtmete ühendamine ja haruühenduste tegemine jootmise teel.

Nöörjuhtmeid ja mitmekiulisi juhtmeid ristlõikega kuni 6 mm² lubatakse vahetult ühendada energiatarbijaga, juhtmete suurema ristlõike korral tuleb juhtmete otsa joota kaablikingad (joon. 14-19). Juhul kui ühendus teostatakse ilma kaablikingata, tuleb soonte kiud kokku keerutada, rõngasse painutada ja saadud rõngas tingimata läbi joota.

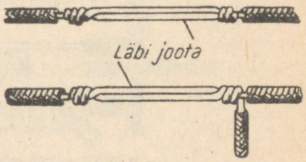
Rullidele või isolaatorile paigaldatud juhtmete puhul tuleb teha ühendused ja haruühendused rullide või isolaatorite juures kokkukeeramise ja sellele järgneva jootmise teel. Seejuures peab harujuhtme tõmme kanduma rullile või isolaatorile, mitte aga juhtmele.

Väiksema ristlõikega vaskjuhtmete ühenduskohtade jootmi-

seks kasutatakse tinooli (tina ja plii sulam kampoli ja õliga). Suurema ristlõikega juhtmete jootmiseks kasutatakse väikse tinasisaldusega joodist (pliid 83%, tina 15% ja antimoni 2%) ning kampolit.

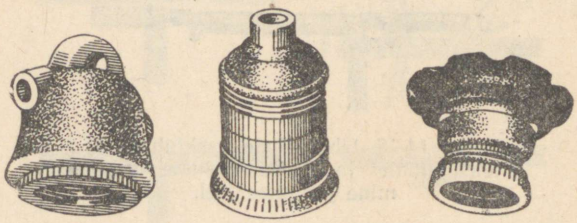


Joon. 14-19. Kaabliking.



Joon. 14-20. Alumiiniumjuhtmete ühendamine ja haruühenduste tegemine.

Ühekiulisi alumiiniumjuhtmeid ühendatakse järgmiselt. Juhtme otstelt eemaldatakse isolatsioon ja hästi puhastatud otsad keeratakse kokku nii, nagu on näidatud joonisel 14-20.



Joon. 14-21. Normaalkeermega lambipesad. Ripp-pesa, tavaline pesa ja laepesa.

Ühenduskoht kaetakse jootepastaga (20 g kampolit lahustatud 100 cm^3 denatureeritud piirituses). Seejärel viiakse ühenduskoht jootelambi leeki ja sulatatakse joodist (30% tina ja 70% tsinki) juhtmetevahelisse renni.

Isoleeritud juhtmete ühenduskoht mähitakse isoleerpaelaga.

Põhilisteks elektrienergia tarbijateks korteri elektrivõrgus on hõõglambid. Võrgujuhtmeid ei ühendata vahetult hõõglampidega, vaid lambipesaga, kuhu keeratakse lamp. Joonisel 14-21 on toodud mitut liiki normaalkeermega lambipesi.

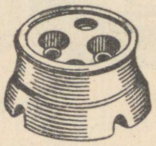
Kuplid kinnitatakse lambipesa külge kuplihoidja abil (joon. 14-22). Kuplihoidja ühendatakse padruniga vastava nipli abil (joon. 14-23).



Joon. 14-22. Kuplihoidja.

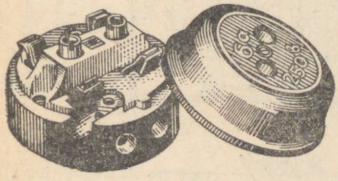


Joon. 14-23. Nippel.

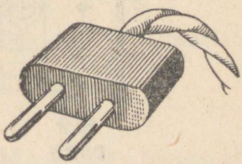


Joon. 12-24. Pistikupesa.

Sageli lülitatakse valgustusvõrku mitmesuguseid soojendus- ja majapidamisriistu (elektritriikraudu, elektrikeetjaid, ventilaatoreid jne.). Nende riistade ühendamine võrguga toimub spetsiaalse kontaktseadise — pistikupesa kaudu (joon. 14-24 ja 14-25). Pistikupesa ühendatakse võrguga ja energiatarbija ühendatakse pistikuga (joon. 14-26) varustatud nöörjuhtme kaudu pistikupesaga.



Joon. 14-25. Pistikupesa.



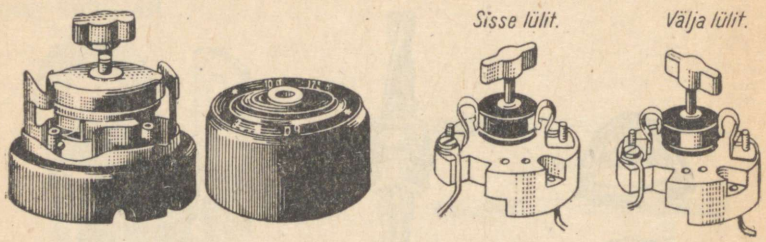
Joon. 14-26. Pistik.

Üksikute lampide või lambirühmade sisse- ja väljalülitamiseks kasutatakse karplüliteid ja -ümberlüliteid, milledest üks tüüp (pöördlüliti) on näidatud joonisel 14-27.

Võrgu kaitsmiseks ülekoormuste ja lühiste eest kasutatakse sulavkaitsmeid, milledest oli juttu eespool (joon. 11-12). Teatud arv kaitsmeid monteeritakse sageli ühele alusele, mis kokku moodustab nn. grupikilbi (joon. 14-28).

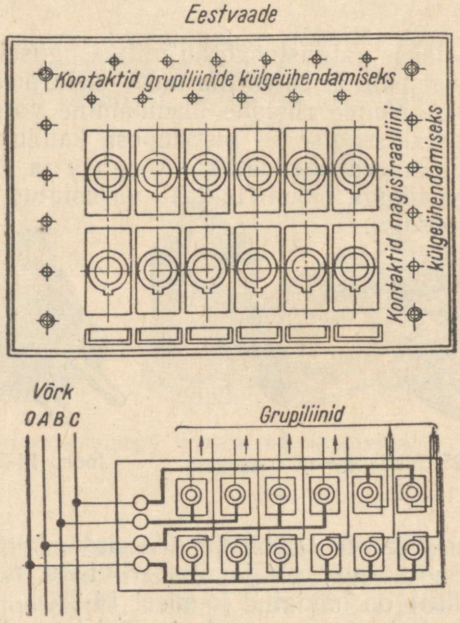
Jõuseadmete elemente (mootoreid, vinnaklüliteid, kaitsmeid ja reostaate) käsitleti eespool.

Hoone sisejuhtmestikuna kasutatakse peamiselt isoleeritud juhtmeid torudes ja nöörjuhet isolaatoritel, isoleerrullidel (pingel kuni 500 V) ja trossidel.



Joon. 14-27. Ühepooluseline pöördlüliti.

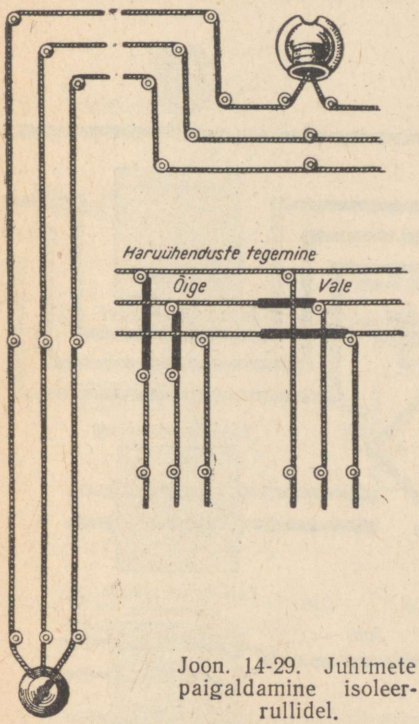
Juhtmete paigaldamisviis isolaatoritel on näidatud joonisel 14-10. Isolaator peab alati asetsema vertikaalasendis.



Joon. 14-28. Kaitsmekilp kuue liini jaoks.

Juhtme võib kinnitada kas isolaatori pea või kaela külge. Juhtmete puhul ristlõikega 1,5—2,5; 4—10; 16—25 ja 35—150 mm² võetakse juhtmete vahekauguseks sirgjoonelises osas vasta-

valt 7; 10 ja 15 cm ja isolaatorite vahekauguseks piki juhet vastavalt 2; 2,5; 3,0 ja 6 m. Juhtmete paigaldusviis isoleerrullidel on näidatud joonisel 14-29. Isoleerrullid kinnitatakse puitseintele ja -lagedele puidukruvidega. Rullide kinnitamiseks kiviseinale tuleb seinasse raiuda auk ja sellesse kinnitada kipsi või alabastri abil kruvi, mille keermeosa ümber on mähitud traatspiraal (joon. 14-30). Pärast massi kivistumist keeratakse kruvi välja ja seejärel keeratakse sisse tagasi koos isoleer-

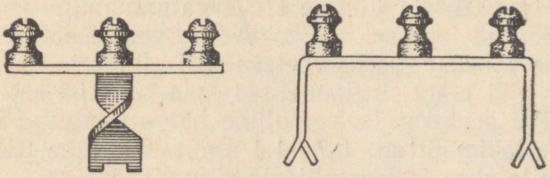


Joon. 14-29. Juhtmete paigaldamine isoleerrullidel.



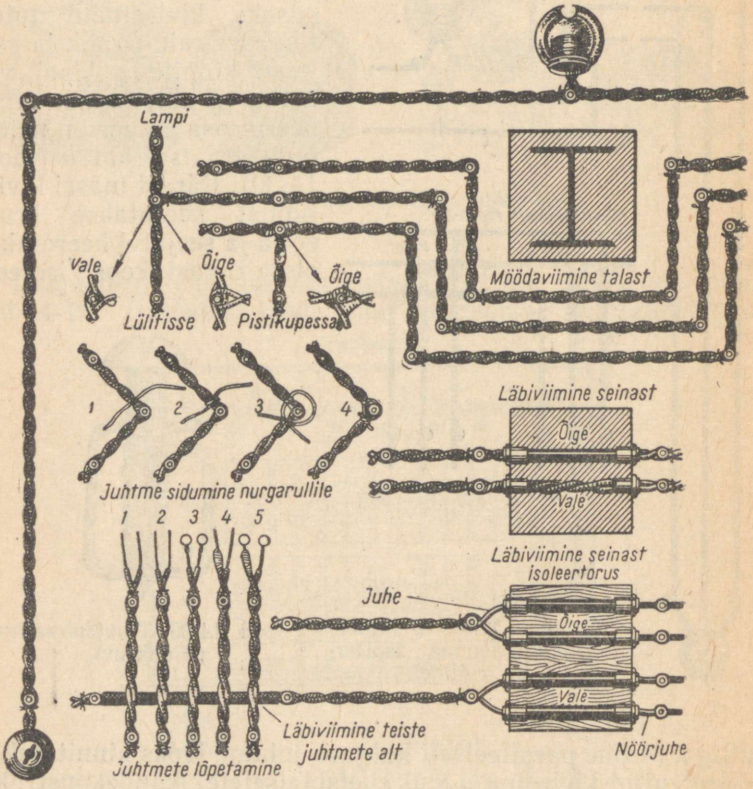
Joon. 14-30. Traatspiraaliga puidukruvi.

rulliga. Mitme paralleelselt kulgeva juhtme jaoks kinnitatakse isoleerrullid kiviseina puhul spetsiaalsetele kandekonstruktsioonidele — ankrusabale või terasklambrile (joon. 14-31), mille külge rullid kinnitatakse metallkruvidega.



Joon. 14-31. Ankrusaba ja terasklamber kolme isoleerrulliga.

Juhtmete puhul läbimõõduga 1—2,5; 4—10; 16—25 ja 35—70 mm² võetakse juhtmete vahekauguseks sirgjoonelises osas vastavalt 3,5; 5,0 ja 7,0 cm ja isoleerrullide vahekauguseks piki juhet vastavalt 80; 100 ja 120 cm.

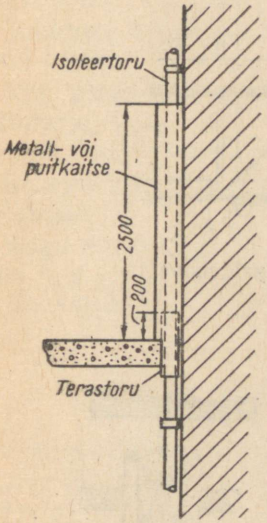


Joon. 14-32. Juhtme ПРД ja nöörjuhtme montaažjoonis.

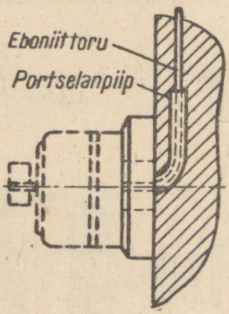
Nöörjuhtme ШР ja juhtme ПРД paigaldamine isoleerrullidel on näidatud joonisel 14-32. Kahe paralleelselt kulgeva nöörjuhtme vahekauguseks võetakse 3,5—5 cm ja rullide vahekauguseks piki juhet sirgjoonelises osas 80—100 cm. Juhtmed ШР ja ПРД seotakse isoleerrullide külge tsingitud raudtraadiga, mille läbimõõt on 0,7—1,4 mm. Nöörjuhe ШР ja juhe ПРД kinnitatakse isoleerrullidele sidumisnööriga.

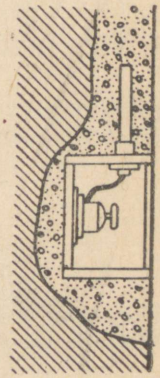
Seintest läbiminekukohtades paigaldatakse juhtmed isoleer-

torusse, mille otstesse kinnitatakse portselanpuksid või lehtrid (joon. 14-32). Pukse kasutatakse kuivades ja lehtreid niisketes ruumides. Niiskuse sissetungimise vältimiseks valatakse lehtrid täis sulatatud kompaundi (naftabituumenite segu).



Joon. 14-33. Isoleeritud juhtmete läbiviimine vahelaest.



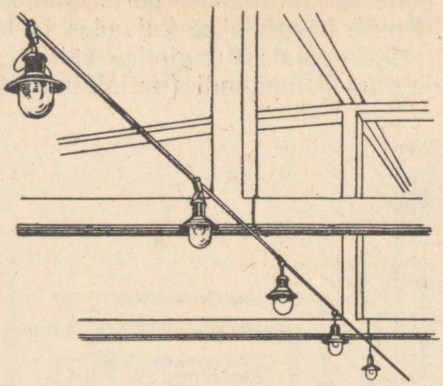


Joon. 14-34. Lüliti paigutamine seina peal ja süvistatult.

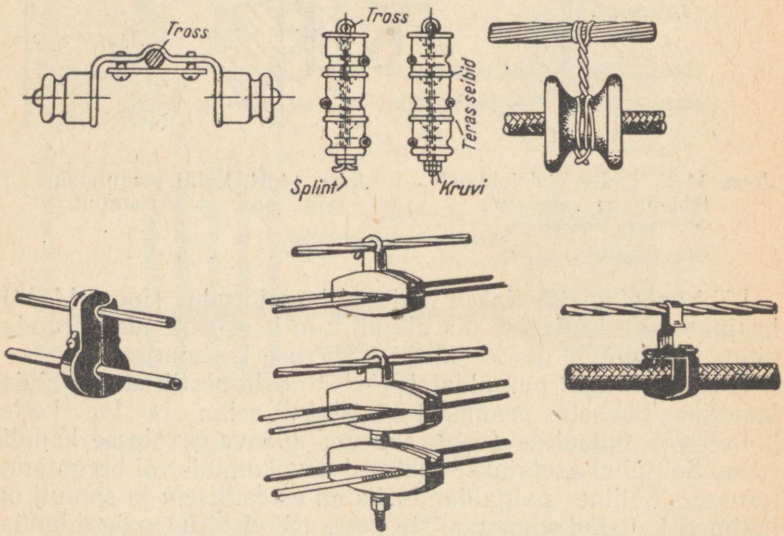
Läbi vahelagede viiakse juhtmed terastorudes (joon. 14-33), kusjuures toru ülemine ots ulatub 2 m kõrgusele üle põrandapinna ja alumine ots — alumise korruse lae pinnani.

Käesoleval ajal paigaldatakse elektrijuhtmestik elu- ja ühiskondlikes hoonetes peamiselt süvistatult seina ja lae kattekrohvi või -plaatide (papp, vineer) alla vastavatesse kanalitesse. Sel juhul asetatakse juhtmed kõvakummi- või bergmanntorusse. Selline paigaldamisviis on esteetilisem ja samuti on juhtmed kaitstud vigastamiste eest. Süvistatud paigaldamisviis on lubatud pingel kuni 500 V.

Torudes asetsevate juhtmete ühendamine ja haruühenduste tegemine toimub isoleerkarpides, mis samuti süvistatakse seina nii, et seina pinnal jääb nähtavale ainult karbikaane kinnitusnupp. Mitme paralleelselt kulgeva toru korral teostatakse ühendused ja haruühendused seinasse süvistatud erikastides. Süvistatud ehitusviisi korral paigaldatakse sellis-



Joon. 14-35. Valgustite paigaldamine trossil.



Joon. 14-36. Juhtmete kinnitamine trossi külge.

tesse kastidesse ka kaitsmed, lülitid ja pistikupesad (joon. 14-34).

Vabrikuhoonetes kinnitatakse valgustusjuhtmestik seintel vaba ruumi puudumisel trossidele (joon. 14-35).

Tross kinnitatakse kahe vastasseina vahele ja pika visangu korral kinnitatakse täiendavalt veel talade või kandekonstruktsioonide külge.

Terastrossi läbimõõt võetakse sõltuvalt visangu pikkusest ning selle külge kinnitatud juhtmete ja valgustite kaalust 4,5 või 6 mm.

Juhtmete kinnitamise viisid trossi külge on näidatud joonisel 14-36.

Kui juhtmed on paigutatud õhukese metallkattega isoleertorudesse, siis kinnitatakse torud trossiga klambrite abil. Samuti kinnitatakse ka kaablid.

Samale trossile kinnitatakse ka ühendus- ja harukarbid ning valgustid.

Kogu montaaž teostatakse tavaliselt 1,5 m kõrgusel põrandast ja seejärel tõstetakse tross koos valgustusseadmega vajalikule kõrgusele ja kinnitatakse seal lõplikult.

14-4. Valgustusseadmete hooldamine

Elektrivalgustusseadmed võivad pärast nende paigaldamist minna kiiresti korrast ära, kui neid süstemaatiliselt üle ei vaadata ega hooldata.

Elektrivalgustusseade koosneb kahest põhiosast: juhtmestikust ja valgustitest. Kumbki neist nõuab omaette ülevaatust ja hooldamist.

Perioodiliselt, mitte harvem kui 3 kuu tagant, tuleb kontrollida juhtmestiku korrasolekut hoolsa ülevaatuse ja isolatsioonitakistuse mõõtmise teel. Rippuvad ja kinnitamata juhtmed tuleb uuesti kinnitada. Kui juhtmete isolatsioon on riknenud, tuleb see taastada. Ülevaatusel tuleb välja selgitada ja kõrvaldada rikked lülitites, lambipesades, pistikupesades ja grupikilpides, kusjuures erilist tähelepanu tuleb pöörata kontaktidele ja nende kuumenemisele. Magistraalliinide ülevaatamisel tuleb kontrollida üksikute faaside koormatust ja faaside koormuse suure ebaühtluse korral koormus faaside vahel ümber jaotada.

Valgustite ülevaatamisel tuleb silmas pidada, et kui lamp ei ole täiesti korras ja valgustusarmatuur on halvas seisukorras ja määrdunud, siis väheneb valgustugevus, mis vähendab tööviljakust, mõjub halvasti töötajate nägemisele ja põhjustab elektrienergia mittetootlikku kulutamist.

Valgustusseadmete normaalse ekspluatatsiooni tagamiseks

tuleb regulaarselt (1 kuni 6 korda kahe kuu jooksul, sõltuvalt ruumi tolmusisaldusest) puhastada valgustit ja lampi kuiva lapiga või vajaduse korral petrooleumiga niisutatud lapiga.

Lambi keeramisel pessa tuleb kontrollida, et lambi ja pesa vahel kujuneks hea kontakt, sest vastasel juhul võib lambipesa täiendavalt kuumeneda, mis vähendab lambipesa tööiga; ka võib lamp sel juhul pessa kinni keevituda.

LISA

ORGANISATSIOONILISI JA METOODILISI JUHISEID LABORATOORSETE TÖÖDE LÄBIVIIMISEKS

Laboratoorsete tööde tegemiseks jaotatakse õpperühm (25—30 õpilast) kaheks alarühmaks, mis töötavad eraldi kumbki ühe juhendajaga.

Alarühmades moodustatakse 2—4 õpilasest koosnevad brigaadid. Brigaadid teevad järjekorras kõik õppekavas ettenähtud tööd. Laboratoorsete tööde tegemist on otstarbekas alustada pärast õppekava 1. osa — «Elektrotehnika alused ja elektrimõõtmised» — läbivõtmist. Laboratoorsete tööde teostamise kvaliteedi parandamiseks tuleb õpilasi eelnevalt ette valmistada. Õpilased peavad varakult, äärmisel juhul nädal varem, teadma, millist tööd nad hakkavad tegema. Õpilased peavad kordama õpiku järgi teoreetilist materjali, tutvuma laboratoorse töö plaaniga, endale selgeks tegema laboratoorses töös ülesseatud eesmärgid ja ülesanded. Igal õpilasel peab olema töövihik, kuhu kantakse tööplaan, vajaliku aparatuuri ja seadmete loetelu, elektriline ühendusskeem, arvutusvalemid, tabelid jm.

Aparatuuri valikuks tuleb ligikaudselt (täpsusega kuni 10%) arvutada voolud ja pinged kõigis ahela harudes suurima ja väikseima võimsuse korral. Saadud andmete põhjal valida töö tegemiseks vajalikud seadmed ja üles märkida nende tehnilised andmed. Selle järel tuleb koostada seadmete paigutuse plaan töölaual. Seejuures tuleb mõõteriistad, abi- ja reguleerimisseadmed paigutada nii, et koostatav lülitus oleks võimalikult lihtne ja ülevaatlik ning et reguleerimine ja mõõteriistade jälgimine oleks mugav ning et seejuures ei oleks vaja teha üleliigseid liigutusi. Enne lülituse koostamist tuleb tutvuda mõõteriistade, aparaatide ja masinate lülitusskeemiga. Seejuures tuleb välja selgitada, missugused mõõteriistade ja masinate klemmid vastavad lülituse ühele või teisele punktile ja millisesse asendisse tuleb seada reostaatide liugkontaktid ning reguleerimisseadiste käepidemed. Ühendusjuhtmete pikkus peab vastama ühendatavate klemmide vahekaugusele. Peavooluahela juhtmed soovitatakse valida üht värvi ja sellise ristlõikega, mis vastab voolule. Abivooluahelates (vattmeetrite ja arvestite paralleelharud) soovitatakse kasutada teist värvi ja väiksema ristlõikega juhtmeid.

Lülituse koostamist on soovitav alustada peavooluahelast ja seejärel ühendada paralleelharud. Lülituse koostab üks brigaadi liige. Teised liikmed kontrollivad koostatud skeemi. Järgmisi lülitusi koostavad järjekorras teised brigaadi liikmed. Lülituse kontrollimisel vaadatakse kõigepealt üle peavooluahel ja seejärel paralleelharud. Kontrollimisel tuleb veenduda, et kõik klemmühendused on küllalt tihedad, et reostaatide liugkontaktid ja teiste reguleerimisseadiste käepidemed on õiges asendis ja et kõigi mõõteriistade osutid on nullis.

Pärast seda, kui lülitus on õpilaste poolt kontrollitud, peab seda tingimata kontrollima ka juhendaja ja alles tema loal võib lülituse pingestada. Kui lüliti on sisse lülitatud, siis on soovitav algul läbi viia kõik reguleerimised ja sisse seada järjekorras kõik režiimid ilma näite üles märkimata, tehes ainult vaatlusi, ja alles seejärel teistkordselt läbi teha kõik operatsioonid ning märkida vajalikud näidud töövihikusse.

Laboratooriumis tuleb töötada äärmiselt ettevaatlikult ja iga kord ette näha, milliseid tagajärgi põhjustab ahela režiimi iga muutmine.

Töö tegemisel on vaja jälgida ohutuseeskirjade täitmist. Kategooriliselt on keelatud kätega puudutada isoleerimata juhtmeid ja klemme, kui lülitus on pingestatud. Eriti ettevaatlik tuleb olla kondensaatoreid ja poole sisaldava vahelduvvooluahela puhul, sest sel juhul võib pinge töö käigus tõusta tunduvalt kõrgemale võrgupingest.

Pärast kõigi vaatluste ja arvutuste sooritamist näidatakse neid juhendajale, kes töö kordamineku korral lubab töö lõpetada. Seejärel võetakse lülitus koost lahti. Seadiste klemmid keeratakse kinni ja juhtmed pannakse korralikult nende jaoks ettenähtud kohta.

Iga laboratoorse töö kohta koostavad õpilased aruande (protokolli). Aruanded tehakse eriplanketile või ruudulisele paberile. Aruanne peab olema tehtud täpselt ja hoolikalt. Aruandes peab sisalduma:

1) töö nimetus ja number;
2) õpilase nimi, rühma nimetus ja töö tegemise kuupäev;
3) mõõteriistade ja aparaatide loetelu ja nende tehnilised põhiandmed;
4) lühike töökirjeldus;
5) ühendusskeemid;
6) vaatluste ja arvutuste tulemused tabelites;
7) graafikud;
8) kokkuvõte.

SISUKORD

Eessõna 3
Sissejuhatus 4

Esimene peatükk

Elektriväli

1-1. Põhimõisted 7
1-2. Pinge. Potentsiaal 8
1-3. Elektrijuhid ja dielektrikud 10

Teine peatükk

Alalisvooluahel

2-1. Vooluahel 12
2-2. Primaar- ehk galvaanielement 13
2-3. Elektrivool 14
2-4. Elektrivoolu töö ja võimsus 16
2-5. Ohmi seadus 19
2-6. Takistus ja juhtivus 21
2-7. Elektrienergia muundumine soojuseks 25
2-8. Kirchhoffi esimene seadus 27
2-9. Takistuste järjestikku-ühendus 28
2-10. Takistuste paralleelühendus 29
2-11. Takistuste segaühendus 32
2-12. Vooluahel kahe elektromotoorse jõu allikaga 33
2-13. Kirchhoffi teine seadus. Vooluahela arvutus Kirchhoffi seaduste põhjal 35
2-14. Galvaanielemendid ja akumulaatorid 37
2-15. Vooluallikate ühendamine 40
2-16. Pingekaod juhtmetes 42
2-17. Laboratoorne töö. Pingekadu juhtmetes 44

Kolmas peatükk

Elektromagnetism

3-1. Elektrivoolu magnetväli 45
3-2. Magnetvälja tihedus 46
3-3. Magnetvoog 49
3-4. Voolust läbitavate paralleelsete juhtmete vahel avalduv jõud 50
3-5. Magnetiline läbitavus 52

3-6. Magnetvälja tugevus. Magnetiline pinge 53
3-7. Magneetimisergutuse seadus 53
3-8. Voolust läbitava pooli magnetväli 54
3-9. Ferromagnetiliste kehade magneetimine 56
3-10. Magnetiline hüsterees 57
3-11. Magnetahel 59
3-12. Elektromagnetid 61
3-13. Elektromagnetiline induktsioon 62
3-14. Elektromotoorne jõud juhtmekeerus 64
3-15. Mehaanilise energia muundamine elektrienergiaks . . . 67
3-16. Elektrienergia muundamine mehaaniliseks energiaks . . . 68
3-17. Pöörisvoolud 69
3-18. Induktiivsus. Endainduktsiooni elektromotoorne jõud . . . 71
3-19. Magnetvälja energia 72

Neljas peatükk

Vahelduvvool

4-1. Vahelduvvoolu periood ja sagedus 74
4-2. Vahelduva elektromotoorse jõu saamine 75
4-3. Faas ja faasinihe 78
4-4. Siinuseliste suuruste graafiline kujutamine 81
4-5. Voolu ja pinge efektiivväärtused 83
4-6. Takistus vahelduvvooluahelas 85
4-7. Induktiivsus vahelduvvooluahelas 87
4-8. Aktiivtakistus ja induktiivsus vahelduvvooluahelas . . . 90
4-9. Aktiiv- ja induktiivtakistus mittehargnevas ahelas . . . 95
4-10. Aktiiv- ja induktiivtakistus hargnevas ahelas 97
4-11. Mahtuvus 100
4-12. Mahtuvus vahelduvvooluahelas 103
4-13. Pingeresonants 106
4-14. Vooluresonants 108
4-15. Võimsustegur ja selle osatähtsus 110
4-16. Laboratoorne töö. Aktiivtakistuse, induktiivsuse ja mahtuvusega vahelduvvooluahel 112
4-17. Laboratoorne töö. Pooli ja kondensaatori paralleelühendus. Võimsusteguri parandamine 114

Viies peatükk

Kolmefaasiline vool

5-1. Kolmefaasilise voolu saamine 115
5-2. Generaatori mähiste tähtühendus 117
5-3. Generaatori mähiste kolmnurkühendus 119
5-4. Tarbijate tähtühendus 120
5-5. Tarbijate kolmnurkühendus 124
5-6. Laboratoorne töö. Neljajuhtmeline kolmefaasiline ahel . . 128
5-7. Laboratoorne töö. Kolmejuhtmeline kolmefaasiline ahel . . 129

Kuues peatükk

Elektrimõõtmised ja mõõteriistad

6-1. Põhimõisted 130
6-2. Elektrimõõteriistade liigitus 131
6-3. Mõõteriistade mõõtemehhanismid 134
6-4. Voolu mõõtmine 141
6-5. Pinge mõõtmine 146
6-6. Võimsuse mõõtmine 150
6-7. Ühefaasilise ja kolmefaasilise süsteemi energia mõõtmine . 155
6-8. Takistuse mõõtmine 158
6-9. Mitteelektriliste suuruste mõõtmine elektrilisel teel . . . 165
6-10. Laboratoorne töö. Isolatsioonitakistuse mõõtmine 169
6-11. Laboratoorne töö. Induktsioonarvesti kontrollimine . . . 170
6-12. Laboratoorne töö. Võimsuse mõõtmine kolmefaasilises ahelas 171
6-13. Laboratoorne töö. Termoelektrilise püromeetri gradueerimine ja selle kasutamine temperatuuri mõõtmiseks 172

Seitsmes peatükk

Alalisvoolumasinad

7-1. Üldmõisted 174
7-2. Alalisvoolumasina ehitus ja tööpõhimõte 174
7-3. Alalisvoolumasina põhiosad 177
7-4. Ankrumähis 180
7-5. Ankrumähises indutseeritav elektromotoorne jõud . . . 181
7-6. Masina pöördemoment ja võimsus 182
7-7. Ankrureaktsioon 183
7-8. Kommuteerimine 185
7-9. Alalisvoolugeneraatorite tüübid 188
7-10. Võõrergutusega generaator 189
7-11. Haruvoolugeneraator 192
7-12. Peavoolugeneraator 193
7-13. Kompaundgeneraator 194
7-14. Generaatorite paralleeltöö 195
7-15. Alalisvoolumootorid 196
7-16. Haruvoolumootor 199
7-17. Peavoolumootor 201
7-18. Kompaundmootor 202
7-19. Kaod ja kasutegur 203
7-20. Laboratoorne töö. Haruvoolumootor 205
7-21. Laboratoorne töö. Haruvooluergutusega generaator . . . 206

Kaheksas peatükk

Transformaatorid

8-1. Üldmõisted 207
8-2. Trafo ehitus 209
8-3. Trafo tühijooks 210
8-4. Trafo koormamine 212
8-5. Trafo võimsus ja kasutegur 213

8-6. Kolmefaasiline trafo 215
8-7. Paralleeltöö 216
8-8. Trafo pinge reguleerimine. Autotrafod 217
8-9. Mõõtetrafod 219
8-10. Mitme mähisega trafod 221
8-11. Laboratoorne töö. Ühefaasiline trafo 222

Üheksas peatükk

Vahelduvvoolumasinad

A. Asünkroonmootorid

9-1. Üldmõisted 223
9-2. Asünkroonmootori ehitus 223
9-3. Pöörlev magnetvoog 225
9-4. Asünkroonmootori tööpõhimõte 227
9-5. Rootori libistus 228
9-6. Rootori elektromotoorse jõu ja voolu sagedus 229
9-7. Staatori- ja rootorimähistes indutseeritavad elektromotoorsed jõud 229
9-8. Rootoriahela takistus 230
9-9. Rootori vool 230
9-10. Asünkroonmootori tööprotsess 231
9-11. Pöördemoment 232
9-12. Pöördemomendi sõltuvus läbistusest 233
9-13. Lühisrootoriga mootorite käivitamine 235
9-14. Faasirootoriga asünkroonmootori käivitamine 237
9-15. Lühisrootoriga asünkroonmootorite eritüübid 238
9-16. Asünkroonmootori pöörlemiskiiruse reguleerimine 240
9-17. Ühefaasiline asünkroonmootor 242
9-18. Asünkroonmootoreid toitva võrgu võimsusteguri parandamise viise 244
9-19. Asünkroonmootori kaod ja kasutegur 244

B. Sünkroonmasinad

9-20. Üldmõisted 245
9-21. Sünkroonmasina tööpõhimõte ja põhiosad 245
9-22. Sünkroongeneraatori töörežiim 248
9-23. Sünkroongeneraatorite lülitamine paralleeltööle 250
9-24. Sünkroongeneraatorite paralleeltöö 252
9-25. Elektrimasinate hooldamine 254
9-26. Laboratoorne töö. Kolmefaasiline asünkroonmootor . . . 258

Kümnes peatükk

Tööstuslik elektroonika

10-1. Elektronseadiste klassifikatsioon ja nende otstarve . . . 259
10-2. Väikse võimsusega alaldajad. Filtrid 259
10-3. Elektrivool gaasides 264
10-4. Keskmise võimsusega alaldajad 265
10-5. Suure võimsusega alaldajad 270
10-6. Kolme elektroodiga lamp 274

10-7. Elektronlampvõimendajad 275
10-8. Lampgeneraator 279
10-9. Elektronkiiretoru 282
10-10. Fotoelemendid ja fotoreleed 284
10-11. Laboratoorne töö. Pooljuhtalaldajad 285

Üheteistkümnes peatükk

Elektriajamid ja juhtimisaparatuur

11-1. Üldmõisted 287
11-2. Mootori võimsuse valik püsiva töörežiimi korral . . . 288
11-3. Mootori võimsuse valik lühiajalise töörežiimi korral . . . 290
11-4. Mootori võimsuse valik vaheajalise töörežiimi korral . . . 290
11-5. Mootori soojenemine ja jahtumine 292
11-6. Elektrimasinate juhtimisaparatuur 295
11-7. Vinnaklülitid 295
11-8. Käivitus- ja reguleerimisreostaadid 296
11-9. Kontrollerid 297
11-10. Sulavkaitsmed ja automaatlülitid 299
11-11. Kontaktorid 301
11-12. Õlilülitid 302
11-13. Releed 303
11-14. Tootmisoperatsioonide automatiseerimine 305
11-15. Kaitsemaandamine ja nullimine 308
11-16. Laboratoorne töö. ЭТ-tüüpi elektromagnetiline relee . . 310

Kaheteistkümnes peatükk

Elektrikeevitus. Elektrotermia

12-1. Elektrikeevitus 311
12-2. Elektrotermia 317
12-3. Kaudse küttega takistusahjud 318
12-4. Induktsioonahjud 318
12-5. Kaarleekahjud 322

Kolmeteistkümnes peatükk

Elektrivalgustus

13-1. Põhimõisted 322
13-2. Valgusallikad 325
13-3. Valgustusseadised 328
13-4. Elektrivalgustuse arvutus 331

Neljateistkümnes peatükk

Elektrienergia tootmine, ülekandmine ja jaotamine

14-1. Üldmõisted elektrienergia tootmisest ja ülekandmisest . . 333
14-2. Joonistel ja skeemidel kasutatavad tingmärgid 343
14-3. Sisevõrkude ehitus 346
14-4. Valgustusseadmete hooldamine 357

Lisa

Organisatsioonilisi ja metoodilisi juhiseid laboratoorsete tööde läbiviimiseks 359

Попов Виктор Степанович,
Мансуров Николай Николаевич,
Николаев Сергей Александрович.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

На эстонском языке

Эстонское Государственное Издательство
Таллин, Пярнуское шоссе, 10.

*

Toimetaja L. Abo

Tehniline toimetaja I. Vahtre

Korrektorid M. Sepp ja P. Hiie

Ladumisele antud 21. II 1957. Trükkimisele antud 4. III 1958. Paber 54×84, 1/16. Trükipoognaid 23. Formaadile 60×92 kohaldatud trükipoognaid 18,86. Arvutuspoognaid 18,76. Trükiarv 5000. Tellimise nr. 903. Trükikoda «Tartu Kommunist», Tartu, Ülikooli 17/19.

Hind rbl. 7.60

3—5

Rbl. 7.60

A-21978

TÜ RAAMATUKOGU
1 0300 00386021 2