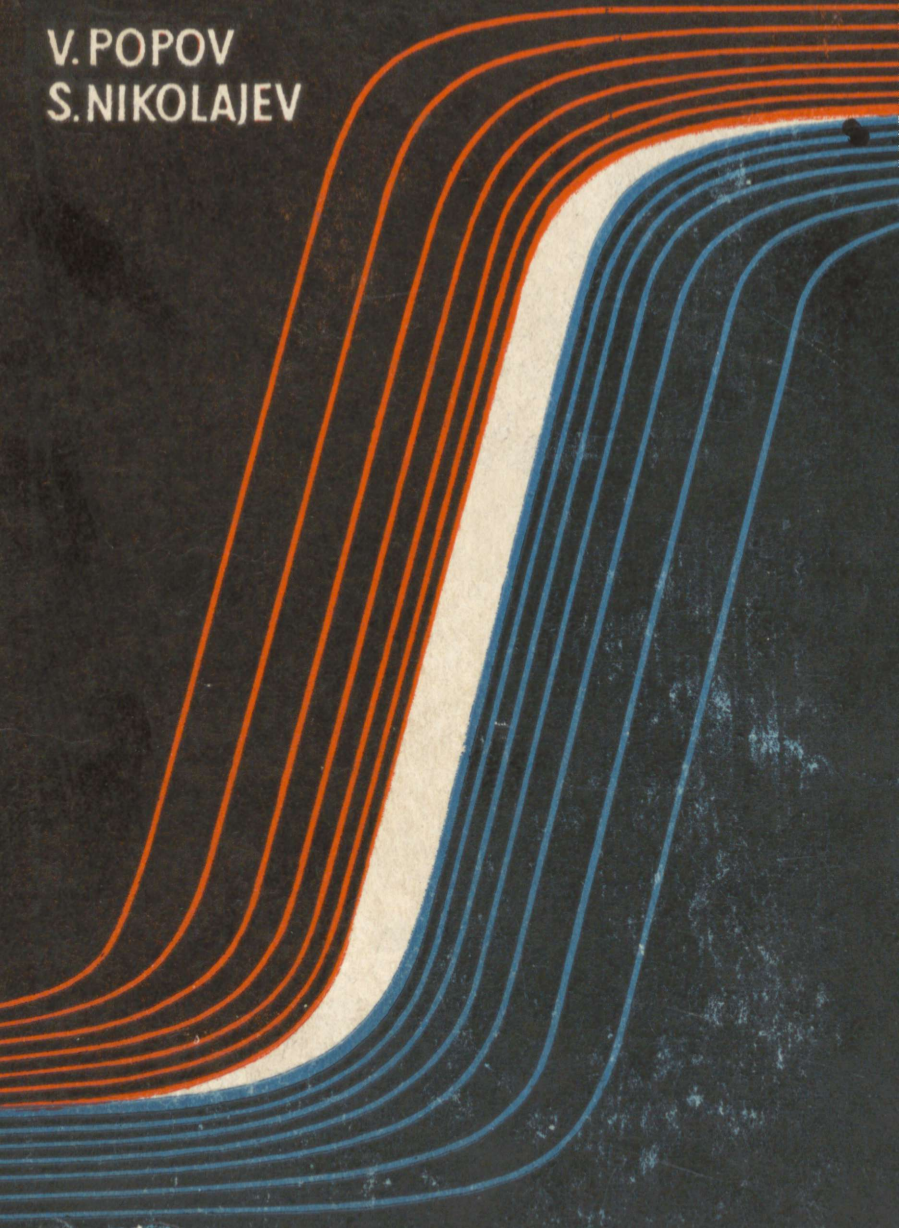
V. POPOV
S. NIKOLAJEV



Elektrotehnika

A-30433

V. S. POPOV JA S. A. NIKOLAJEV

ELEKTROTEHNIKA

KIRJASTUS «VALGUS» · TALLINN 1970

6T2.1
P 69

Originaali tiitel:
В. С. Попов и С. А. Николаев
Электротехника
Издательство «Энергия»
Москва 1965 Ленинград

Kaane kujundanud O. Mellov

УДК 621.3(07)
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
В. С. Попов и С. А. Николаев
Электротехника
1969

Содержание книги соответствует программе курса электротехники для техникумов неэлектротехнических специальностей.

В книге рассматриваются основные вопросы расчета цепей постоянного и переменного токов, краткая теория измерения электрических и неэлектрических величин, нормальные электрические машины и трансформаторы, электрические машины, применяемые в схемах автоматического контроля и регулирования. Излагаются основные вопросы электропривода, автоматики, электрического освещения, передачи и распределения электрической энергии. Приведены сведения по вычислительным устройствам и электротехнологии.

Книга предназначена для студентов техникумов неэлектротехнических специальностей.

619 илл., 17. табл.

Tõlkinud vene keelest A. Ronk

Raamatu sisu vastab niisuguste tehnikumide elektrotehnika kursuse programmile, kus elektrotehnika pole põhiaineks.

Raamatus käsitletakse alalis- ja vahelduvvooluringide arvutamise põhilisi küsimusi, lühidalt elektriliste ja mitteelektriliste suuruste mõõtmise teooriat, normaalseid elektrimasinaid ja transformaatoreid ning automaatsetes kontroll- ja reguleerimisseadmetes kasutatavaid elektrimasinaid. Selgitatakse elektriajamite, automaatika, elektrivalgustuse, elektrienergia ülekande ja jaotuse põhilisi probleeme. On toodud andmeid arvutusseadmetest ja elektrotehnoloogiast.

Retsenseerinud U. Agur

2
Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu
76336

3—3—3
41—69

EESSÕNA

Käesolev raamat on elektrotehnika õpik neile tehnikumidele, kus elektrotehnika pole põhiaineks.

Raamatu neli esimest peatükki sisaldavad peamiselt füüsika kursuse materjali, mida peavad teadma õpilased, kes hakkavad õppima elektrotehnikat, ja mis on küllalt hästi esitatud tehnikumide füüsikaõpikuis, eriti L. S. Ždanovi ja H. L. Hlebnikovi raamatus (1961. a. väljaanne). Erandiks on paragrahvid 1-9, 1-18, 1-19, 3-6, 3-13, 3-14, 4-6 ja 4-7.

Autorid peavad siiski otstarbekaks ja kasulikuks esitada nende peatükkide sisu väga kokkuvõtlikult, et anda õpilastele võimalus korrata seda materjali enne elektrotehnika õppimist või värskendada teadmisi ühest või teisest füüsika küsimusest õppimise käigus.

Materjali küllus ja vajadus käsitleda raamatus uue tehnika alaseid küsimusi — elektroonikat, automaatseadmete elektrimasinaid, elektroautomaatika aluseid, arvutusseadmeid, elektrotehnoloogiat jne. — nõudsid raamatu vägagi piiratud mahu tõttu materjali kompaktset esitamist.

Raamatu autorid valgustavad lühidalt elektrotehniliste materjalidega seotud küsimusi, eriti elektriisolatsiooni probleeme, mis on varem väljaantud õpikutest põhjendamatult välja jäetud.

Autorid arvavad, et mitteelektrotehniliste erialade jaoks ei ole elektrienergia tootmise küsimustel tähtsust, mistõttu pole ka õpikus käsitletud elektrijaamu.

Autorid avaldavad tänu A. D. Smirnovile suure töö eest õpiku redigeerimisel.

Autorid.

SISSEJUHATUS

Nõukogude Liidu Kommunistliku Partei programm annab elektrifitseerimisele kui põhilisele tootlike jõudude arengu tingimusele esmajärgulise tähtsuse.

Käesoleval ajal on NSV Liit elektrienergia toodangult ja elektrijaamade installeeritud võimsuselt maailmas teisel ja Euroopas esikohal. Lähema aastakümne jooksul peab tootmises kasutatav elektrienergia hulk kasvama kolm korda.

NLKP programmiga ette nähtud elektrienergia tootmise kasv on järgmine: 1970. aastal 900 ... 1000 miljardit kWh, 1980. aastal aga 2700 ... 3000 miljardit kWh. Elektrijaamades ülesseatud generaatorite koguvõimsus peab 1980. aastaks olema 540 ... 600 miljonit kW 1960. aasta 66,7 miljoni kW vastu.

Nõukogude Liidu Kommunistliku Partei juhtimisel viiakse järjekindlalt ellu V. I. Lenini poolt 1920. aastal väljendatud mõtet: «Kommunism — see on nõukogude võim pluss kogu maa elektrifitseerimine.»

Odava elektrienergia küllus lubab hoopis uut moodi asetada tootmise tehnoloogia ja eesrindliku teaduse saavutuste ellurakendamise küsimusi.

Looduse ammendamatusele ja lõpmatusele viidanud V. I. Lenini geniaalne ettenägelikkus leiab kinnitust kõigis elektrotehnika harudes: pooljuht-, molekulaar-, kvant- ja plasmaelektroonikas.

Kaasaegne tehnika lubab tänapäeva keerulistes elektriseadmetes kasutada sadu tuhandeid transistore, dioode, takisteid, poole, kondensaatoreid jms., mis on valmistatud kiledest mikrolülitustena. Mikrolülituste tootmiseks kasutatakse elektronkiir- ja lasertehnikat. Tänu elektrontehnoloogiale saadakse selliseid materjale nagu volframit, mo-

lübdeeni, tantaali, nioobiumi jt. ülipuhtal kujul, milleta on võimatu kaasaegne tehnika.

Elektrienergia vahetu rakendamine metallide töötlemisel sai uue tehnoloogiaharu — elektrotehnoloogia aluseks.

Elektronarvutustehnika kiire areng lubab mitte ainult täiustada automaatika- ja telemehhaanikaseadmeid, vaid ka lahendada suure rahvamajandusliku tähtsusega majandusalaseid probleeme.

Et tutvuda vaid põgusalt kaasaegse tehnikaga, tuleb kindlasti tunda rakenduslike teaduste, eriti aga tänapäeva tööstusele väga tähtsa elektrotehnika aluseid.

1. ALALISVOOLURING

1-1. Põhimõisted

Igas materiaalses kehas on suur hulk elektriliselt laetud aineosakesi — elektrilaenguid. Elektriliselt neutraalses kehas on võrdne hulk positiivseid ja negatiivseid osakesi. Laetud kehas on ülekaal kas positiivsetel või negatiivsetel laengutel.

Elektrilaengu mõõtühikuks on kulon (C). Vähima aineosakese, elektroni laeng on $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C.

Erinimeliselt laetud kehad tõmbuvad teineteise poole, ühenimeliselt laetud kehad aga tõukuvad. Laengute vastastikust mõju seletatakse sellega, et iga laengut ümbritseb pidevalt elektriväli. Laengud on üksteisega seotud elektrivälja vahendusel. Elektriväljal on energia — elektrienergia.

Laetud kehade ümberpaiknemisel elektrivälja jõudude toimel tehakse välja energia arvel tööd.

Elektriliselt laetud aineosakesed ja elektriväli on kaks lahutamatult seotud mateeria vormi.

Liikumatute laengute välja nimetatakse elektrostaatiliseks.

Üheks elektrivälja iseloomustavaks suuruseks igas väljapunktis on elektrivälja tugevus ($\mathcal{E}$).

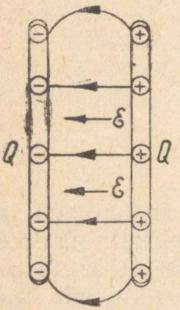
Väljatugevus avaldub välja poolt antud punktis asuvale punktikujulisele proovilaengule q mõjuva jõu F ja sellesama laengu q suhtena. Seega väljatugevus

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

Kui proovilaeng q on võrdne ühega, siis on väljatuge-

vus arvuliselt võrdne jõuga F. Seega on elektrivälja tugevus arvuliselt võrdne välja poolt ühiklaengule mõjuva jõuga.

Väljatugevus on vektoriaalne suurus. Väljatugevuse vektori suund ühtib antud punktis asuvale positiivsele laengule mõjuva välja jõu suunaga.



Joon. 1-1. Elektriväli kahe rööpse erinimeliselt laetud plaadi vahel.

Joonisel 1-1 on kujutatud kahe rööpse plaadi (laengutega $+Q$ ja $-Q$) vahelise elektrivälja tugevuse vektor $\bar{\mathcal{E}}$.

Elektrivälja kujutatakse graafiliselt väljatugevuse joonte abil. Väljatugevuse joon tõmmatakse nii, et väljatugevuse vektor oleks igas punktis talle puutujaks. Elektrivälja tugevuse joon algab positiivselt laengult ja lõpeb negatiivsel. Ta ei ole suletud.

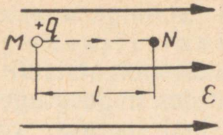
Kui panna läbi iga väljatugevuse joontega risti oleva ühikulise pinnatüki selle piirkonna väljatugevusega võrdne või võrdeline arv väljatugevuse jooni, siis saab viimaseid kasutada elektrivälja tugevuse hindamiseks.

Elektrivälja nimetatakse ühtlikuks e. homogeenseks, kui tema kõigis punktides on väljatugevuse vektorid üksteisega võrdsed. Selline on näiteks kahe rööpse plaadi (joon. 1-1) vahelise välja see osa, mis on küllalt kaugel plaatide servadest.

1-2. Elektripinge

Kui positiivne proovilaeng q (joon. 1-2) läbib homogeenses elektriväljas välja jõudude mõjul vahemaa l punktist M punktini N nende jõudude suunas, siis välja jõud teevad töö

$$A = Fl.$$



Joon. 1-2. Elektrilaengu $+q$ ümberpaigutamine homogeenses elektriväljas.

Seose (1-1) abil saame, et töö

$$A = Fl = \mathcal{E}ql. \tag{1-2}$$

Suurust, mis määratakse laengu q paigutamisel punktist M punkti N tehtud töö ja ümberpaigutatud laengu suhtega, nimetatakse elektripingeks ehk lihtsalt pingeks välja punktide M ja N vahel.

Seega pinge

$$U = \frac{A}{q}.$$

Järelikult on pinge kahe punkti vahel arvuliselt võrdne tööga, mida teevad välja jõud, paigutades positiivset ühiklaengut ühest punktist teise.

Valemit (1-2) kasutades võime kirjutada:

$$U = \frac{A}{q} = \frac{\mathcal{E}ql}{q} = \mathcal{E}l. \tag{1-3}$$

Kooskõlas riikliku standardiga ГОСТ 9867-61 kehtib NSV Liidus alates 1. jaanuarist 1963. a. rahvusvaheline mõõtühikute süsteem SI. Selles kasutatakse meetrit (m) pikkuse, kilogrammi (kg) massi, sekundit (s) aja, njuutonit (N) jõu, džauli (J) töö, kulonit (C) elektrilaengu ja volti (V) elektripinge mõõtühikuna.

Avaldisest (1-3) järeldub, et

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

Avaldisest (1-3) saame elektrivälja tugevuse

$$\mathcal{E} = \frac{U}{l}, \tag{1-4}$$

millest väljatugevuse ühik on V/m. Niisiis mõõdetakse elektrivälja tugevust voltides meetri kohta.

Pinget mingi elektrivälja punkti M ja mingi maapinna punkti vahel nimetatakse punkti M elektriliseks potentsiaaliks maa suhtes. Elektrilist potentsiaali tähistatakse tähega φ ja mõõdetakse voltides nagu pingetki.

Maapinna mistahes punkti potentsiaal loetakse võrdseks nulliga.

Suvalise väljapunkti potentsiaal on arvuliselt võrdne tööga, mida teevad elektrivälja jõud positiivse ühiklaengu viimisel antud väljapunktist mingisse maapinna punkti.

Kui näiteks kahe väljapunkti M ja N potentsiaalid on vastavalt φ_M ja φ_N, siis on välja jõudude poolt tehtav töö positiivse ühiklaengu viimisel esimesest punktist teise, s. o. pinge punktide M ja N vahel, võrdne potentsiaalide vahega, s. t.

$$U_{MN} = \varphi_M - \varphi_N. \qquad (1\text{-}5)$$

Sama laengu viimisel punktist N edasi maapinnale võib välja jõudude tööd φ_N ja tööd, mis tehakse välja jõudude poolt ühiklaengu viimisel punktist M maapinnani, avaldada kujul

$$U_{MN} + \varphi_N$$

või, kasutades seost (1-5), kujul

$$U_{MN} + \varphi_N = \varphi_M - \varphi_N + \varphi_N = \varphi_M.$$

1-3. Elektrivool

Metalljuhtme vabad elektronid ja elektrolüüdi ioonid on korrapäratus liikumises. Elektrihulk, mis seejuures läbib mingit juhtme ristlõiget, on keskmiselt null.

Kui rakendada juhtme otstele elektripinge, siis hakkavad laetud osakestele mõjuma elektrivälja jõud, mis on suunatud piki juhet. Laengute korrapäratu liikumise kiirusele liitub väljasuunaline komponent. Sel juhul läbib juhtme mistahes ristlõiget kindel elektrihulk, s. t. juhtmes tekib elektrivool.

Laetud osakeste suunatud liikumise intensiivsust näitab elektrivoolu tugevus, mida mõõdetakse ühes sekundis juhtme ristlõiget läbiva elektrihulgaga (laenguga).

Kui vool mõne aja jooksul suuruselt ega suunalt ei

muutu, nimetatakse teda alalisvooluks. Voolu tähistatakse I-ga.

Kui aja t jooksul läbib juhtme ristlõiget elektrihulk Q, siis vool

$$I = \frac{Q}{t}. \tag{1-6}$$

Rahvusvahelises mõõtühikute süsteemis SI on voolu tugevuse ühikuks amper:

$$1 \text{ amper} = \frac{1 \text{ kulon}}{1 \text{ sekund}} \quad \text{ehk} \quad 1 \text{ A} = 1 \frac{\text{C}}{\text{s}}.$$

Seega on vool võrdne 1 ampriga siis, kui juhtme ristlõiget läbib 1 sekundis laeng 1 kulon.

Voolu suunaks on positiivsete laengute liikumise suund, s. o. elektronide liikumisele vastupidine suund.

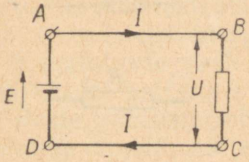
Voolu ja juhtme ristlõike pindala (S) suhet nimetatakse voolutiheduseks.

Seega voolutihedus

$$\delta = \frac{I}{S}. \tag{1-7}$$

1-4. Vooluring ja tema elemendid

Elektrivoolu saamiseks on vaja luua vooluring. Lihtsaimal juhul koosneb vooluring kolmest põhilisest elemendist: toiteallikast, elektrienergia vastuvõtjast või tarbijast ja ühendusjuhtmetest.



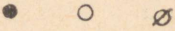
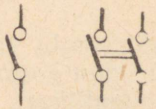
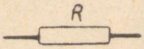
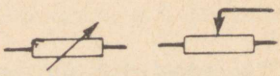
Joon. 1-3. Vooluringi skeem.

Joonisel 1-3 on antud vooluringi skeem, s. o. tema graafiline kujutis. Toiteallikat (AD) loetakse vooluringi sisemiseks, ülejäänud osa ($ABCD$) aga välimiseks osaks.

Elektrilistes lülitusskeemides kasutatavad tingmärgid on toodud tabelis 1-1 (ГОСТ 7624-62 järgi).

Tabel 1-1

Elektrilistes lülitusskeemides kasutatavad tingmärgid (ГОСТ 7624-62)

1	Galvaanielement (primaarelement) või akumulaator	
2	Alalisvoolugeneraator	
3	Alalisvoolumootor	
4	Elektrilamp	
5	Juhe, kaabel, kogumislatt	
6	Elektriline ühendus Katkestatav või alaline ühendus Lahtivõetav ühendus	
7	Ühepooluseline ja kahepooluseline lüliti	
8	Sulavkaitse	
9	Takisti (tarbija)	
10	Reostaat	
11	Ampermeeter, voltmeeter	

Ühe või teise energialiigi muundamisel elektrienergiaks tekib toiteallikas elektromotoorjõud, lühendatult emj. (E).

Elektromotoorjõud on arvuliselt võrdne energiaga, mille saab ühiklaeng, liikudes väliste jõudude mõjul ühelt vooluallika klemmilt teisele. Elektromotoorjõudu võib määrata kui koormamata toiteallika (temaga pole ühendatud tarbijaid) klemmipinget.

Elektrienergia muundub tarbijais mehhaaniliseks, soojus- või mõnd muud liiki energiaks. Seejuures on tarbija klemmipinge U arvuliselt võrdne energiaga, mis kulub (muundub) ühiklaengu liikumisel läbi tarbija.

Elektromotoorjõu E ja pinge U vahe kujutab endast seda osa energiast, mis kulub (muundub) ühiklaengu liikumisel toiteallikas, ja teda nimetatakse sisemiseks pingelaenguks (U_0). Niisiis võime kirjutada:

$$E = U + U_0. \qquad (1\text{-}8)$$

Energiat kantakse üle toiteallikast tarbijasse juhtmete kaudu. Energiakao juhtmetes, kui need on lühikesed, jätame sageli arvestamata selle väiksuse tõttu.

Toiteallikatena kasutatakse enamasti elektrigeneraatoreid, mis muundavad mehhaanilist energiat elektriliseks, ning akumulaatoreid ja galvaanielemente (primaarelemente), mis muundavad keemilist energiat elektriliseks.

Elektrienergia tarbijaiks on elektromootorid, mis muundavad elektrilist energiat mehhaaniliseks energiaks, hõõglambid, ahjud ja soojendusriistad, mis muundavad elektrienergiat soojusenergiaks, ning puhta metalli saamiseks kasutatavad elektrolüüsivannid, kus elektrienergia muundub keemiliseks energiaks.

Kasutatakse vask- ja alumiiniumjuhtmeid, nii isoleerituid kui ka paljaid, s. t. ilma isolatsioonita.

Peale põhiliste elementide kasutatakse vooluringides lülitusseadmeid, näiteks vinnaklüliteid, kontaktoreid, kaitseseadmeid, automaate (kaitselüliteid), ning lõpuks kontrollmõõteriistu: ampermeetreid, voltmeetreid, elektrienergia arvesteid jne.

1-5. Ohmi seadus

Voolutihedus juhis δ on võrdeline elektrivälja tugevusega $\mathcal{E}$, s. t.

$$\delta = \gamma \mathcal{E}.$$

Suurust γ nimetatakse elektriliseks erijuhtivuseks. Ta sõltub juhtme materjalist ja temperatuurist.

Homogeense elektrivälja puhul väljatugevus

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

millest

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

Teades, et $\delta = \frac{I}{S}$, võime kirjutada:

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

või

$$I = \frac{U}{\frac{l}{\gamma S}} = \frac{U}{R}. \qquad (1\text{-}9)$$

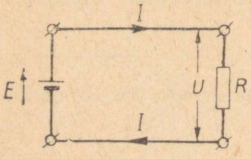
Suurust

$$R = \frac{l}{\gamma S} \qquad (1\text{-}10)$$

nimetatakse elektriliseks takistuseks ehk lihtsalt takistuseks.

Seega on vool juhtmes võrdeline pingega tema otstel ja pöördvõrdeline juhtme takistusega.

Avaldist (1-9) nimetatakse Ohmi seaduseks.



Joon. 1-4. Vooluring.

Tähistame tarbija (joon. 1-4) takistuse tähega R ja toiteallika sisetakistuse R_0. Ohmi seaduse järgi võime joonisel 1-4 kujutatud vooluringi kohta kirjutada:

$U = IR$ ja $U_0 = IR_0$.

Valemist (1-8) saame, et

$$E = U + U_0 = IR + IR_0 = I(R + R_0), \tag{1-11}$$

millest vool

$$I = \frac{E}{R + R_0}. \tag{1-12}$$

See suhe väljendab Ohmi seadust vooluringi kohta.

Suletud vooluringi puhul toiteallika klemmipinge

$$U = E - U_0 = E - IR_0. \tag{1-13}$$

Sama toiteallika klemmipinge on katkestatud vooluringi korral (kui vooluringis voolu ei ole) võrdne tema elektromotoorjõuga, sest $IR_0 = 0$:

$U = E$.

1-6. Elektriline takistus ja juhtivus

Avaldisest (1-9) järeldub, et takistus

$$R = \frac{U}{I}. \tag{1-14}$$

Võttes $U = 1$ V ja $I = 1$ A, saame takistuse mõõtühikuks

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

Takistuse mõõtühikuks on oom. Takistus 1 Ω on sellise juhtme takistus, mida läbib vool 1 A, kui pinge tema otstel on 1 V.

Lülitusskeemides kasutatava takisti tingmärk on toodud tabelis 1-1.

Takistuse pöördväärtusega võrdset suurust

$$G = \frac{1}{R} = \frac{\gamma S}{l} = \frac{I}{U} \tag{1-15}$$

nimetatakse e l e k t r i l i s e k s j u h t i v u s e k s ehk liht-

Tabel 1-2

Mõnede elektrotehniliste materjalide iseloomulikke suurusi

Materjal	Tihedus g/cm³	Sulamis-temperatuur °C	Tõmbetugevus MN/m²	Tõmbetugevus kG/mm²	Elektriline eritakistus 20 °C juures Ω · mm²/m	Temperatuuri-teguri keskväärtus (0 . . . . . 100 °C) 1/deg
Alumiinium	2,7	657	137 . . . 215	14 . . . 22	0,029	0,004
Pronks	8,8 . . . 8,9	900	490 . . . 588	50 . . . 60	0,021 . . . 0,4	0,004
Volfram	18,7	3370	4070	415	0,056	0,00464
Konstantaan	8,8	1200	392	40	0,4 . . . 0,51	0,000005
Messing	8,1	900	392	40	0,07 . . . 0,08	0,002
Manganiin	8,1	960	540	55	0,42	0,000006
Vask	8,8	1083	245 . . . 392	25 . . . 40	0,0175	0,004
Nikroom	8,2	1360	687	70	1,1	0,00015
Teras	7,8	1400	785 . . . 1435	80 . . . 150	0,13 . . . 0,25	0,0006
Fekraal	7,6	1450	—	—	1,4	0,00028
Kromaal	7,1	1500	785	80	1,3	0,00004

salt *juhtivuseks*. Viimane iseloomustab juhtme võimet juhtida temas elektrivälja tulemusena tekkivat voolu.

Juhtivuse mõõtühikuks on oomi pöördväärtus, s. o. $\frac{1}{\Omega}$ ja seda nimetatakse *siimensiks* (S).

Erijuhtivuse pöördväärtusega võrdset suurust

$$\varrho = \frac{1}{\gamma} \tag{1-16}$$

nimetatakse *elektriliseks eritakistuseks* ehk lihtsalt *eritakistuseks*.

Niisiis võib takistust avaldada kujul

$$R = \frac{l}{\gamma S} = \varrho \frac{l}{S} \tag{1-17}$$

ja eritakistust kujul

$$\varrho = \frac{RS}{l}. \tag{1-18}$$

Eritakistus kui erijuhtivuse pöördväärtusega võrdne suurus sõltub samadest suurustest kui erijuhtivuski

(§ 1-5), s. o. materjali omadustest ja temperatuurist. Juhtme takistus aga sõltub lisaks eeltoodule veel juhtme pikkusest ja ristlõike pindalast.

Juhtme takistust mõõdetakse tavaliselt oomides, ristlõiget ruutmillimeetrites ja pikkust meetrites. Järelikult on seose (1-18) kohaselt eritakistuse mõõtühikuks $\Omega \cdot mm^2/m$, erijuhtivusel kui eritakistuse pöördväärtusel aga $m/\Omega \cdot mm^2$.

Rea materjalide eritakistused ja -juhtivused on antud tabelis 1-2.

Tuleb pöörata tähelepanu mõistete takistus ja takisti erinevale sisule.

Nagu võib järeldada paragrahvidest 1-5 ja 1-6, on takistus üheks juhtme, vooluringi lõigu või tarbija parameetriks, mis iseloomustab ühte selle elektrilistest omadustest. Selles mõttes võibki öelda, et tarbija takistus on 30 Ω või et juhtme takistus on 0,1 Ω.

Takistiks nimetatakse seadist, mille iseloomulikuks parameetriks on takistus ja mis lülitatakse vooluringi eesmärgiga piirata või vähendada selles voolu.

Muudetava takistusega takisti ehk r e o s t a a t on mõeldud voolu reguleerimiseks vooluringis.

Takistid jaotatakse traat- ja masstakistiteks.

Reostaadid jaotatakse traat-, vedelik- ja massreostaatideks. Traatreostaate valmistatakse sujuvalt ja astmeliselt muudetava takistusega.

Sujuvalt muudetava takistusega reostaat kujutab endast tihedat takistustraadist spiraali, mis on keritud tulekindlast isoleermaterjalist alusele. Takistust vooluringi lülitud reostaadi spiraali ühe otsa ja liugkontakti vahel saab muuta liugkontakti nihutamise abil.

Näide 1-1. Võrku, pingega $U = 110$ V, on lülitatud hõõglamp takistusega $R = 220$ Ω. Määrata vool lambis.

Vool

$$I = \frac{U}{R} = \frac{110}{220} = 0{,}5 \text{ A}.$$

Näide 1-2. Määrata pinge soojendusriista klemmidel, kui tema takistus $R = 45$ Ω ja teda läbib vool $I = 5$ A.

Klemmipinge

$$U = IR = 5 \cdot 45 = 225 \text{ V}.$$

1-7. Elektrilise takistuse sõltuvus temperatuurist

Metalljuhtme temperatuuri tõus põhjustab vabade elektronide ja aatomite kokkupõrgete arvu suurenemise, mille tulemusena väheneb elektronide suunatud liikumise keskmine kiirus. See vastab takistuse suurenemisele. Seega sõltub temperatuuri muutumisest tingitud juhtme takistuse muutus materjali struktuurist.

Suhteline takistuse suurenemine temperatuuri muutumisel 0° kuni 100° piires on paljudel metalljuhtmetel võrdeline temperatuuri tõusuga.

Seega

$$\frac{\Delta R}{R_1} = \frac{R_2 - R_1}{R_1} = \alpha(\Theta_2 - \Theta_1), \tag{1-19}$$

millest

$$R_2 = R_1 + R_1\alpha(\Theta_2 - \Theta_1).$$

Lõplikul kujul

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(\Theta_2 - \Theta_1)], \tag{1-20}$$

kus R_1 ja R_2 on takistused temperatuuridel Θ_1 ja Θ_2 ning α on takistuse temperatuuritegur, mis kujutab endast temperatuuri tõusule 1 °C võrra vastavat suhtelist takistuse muutust.

Vase temperatuuritegur $\alpha = 0{,}004$ 1/deg. See tähendab, et vaskjuhtme temperatuuri muutumisel 1 °C võrra muutub tema takistus 0,4%.

Temperatuuriteguri väärtusi on toodud tabelis 1-2.

Valemit (1-19) võib kasutada juhtme (elektrimasina mähise) temperatuuri Θ_2 mõõtmiseks. Selleks peavad teada olema R_1, α ja Θ_1. Siis tuleb meil mõõta vaid takistus R_2 ja leida määratav temperatuur valemist

$$\Theta_2 = \frac{R_2 - R_1}{\alpha R_1} + \Theta_1. \tag{1-21}$$

Valem (1-21) on saadud lihtsate teisenduste abil valemist (1-19).

Näide 1-3. Määrata õhuliini juhtmete takistus temperatuuridel +20° ja −10 °C, kui vaskjuhtme ristlõige $S = 10$ mm² ja liini pikkus on 200 m.

Liini kahe juhtme takistus temperatuuril +20 °C.

$$R_1 = \varrho \frac{l}{S} = 0{,}0175 \frac{2 \cdot 200}{10} = 0{,}7\ \Omega.$$

Samade juhtmete takistus temperatuuril —10 °C.

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(\Theta_2 - \Theta_1)] = 0{,}7[1 + 0{,}004(-30)] = 0{,}616\ \Omega.$$

Näide 1-4. Temperatuuril $\Theta_1 = 20$ °C on elektrimootori vasktraadist mähise takistus $R_1 = 2{,}4\ \Omega$. Kui mootor on kaks tundi töötanud, on sama mähise takistus $R_2 = 2{,}8\ \Omega$. Leida elektrimootori mähise temperatuur pärast kahetunnist töötamist.

$$\Theta_2 = \frac{R_2 - R_1}{\alpha R_1} + \Theta_1 = \frac{2{,}8 - 2{,}4}{0{,}004 \cdot 2{,}4} + 20 \approx 62\ °C.$$

1-8. Elektriline juhtivus

Mistahes aine koosseisu kuuluvate keemiliste elementide aatomid koosnevad positiivselt laetud tuumast ja selle ümber liikuvatest negatiivselt laetud elektronidest.

Aatomid on tavaliselt elektriliselt neutraalsed, sest iga tuuma laeng on võrdne elektronide laengute summaga.

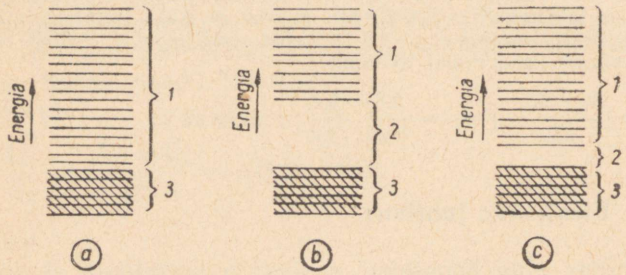
Kui elektriliselt neutraalsest aatomist (molekulist) eraldub elektron, muutub aatom (molekul) positiivseks iooniks. Temast eraldunud elektron võib jääda vabaks või ühineda mõne teise neutraalse aatomiga, moodustades negatiivse iooni. Selliseid elektrone nimetatakse *juhtivuselektronideks* ja seda protsessi — *ionisatsiooniks*. Vabade elektronide või ioonide arv ruumalaühikus määrab laetud osakeste (+ ja —) kontsentratsiooni.

Aatomi iga elektroni energia omab vaid kindlaid väärtusi, s. t. elektron võib olla ainult lubatud kvantolekutele vastavatel energianivoodel, sest tema energia võib muutuda vaid kindlate koguste, kvantide kaupa. Elektroni üleminekuks kõrgemale nivoole tuleb aatomile anda täiendavat energiat. Elektroni üleminekul madalamale nivoole kiirgab aatom liigse energia välja.

Ainetes, mis kujutavad endast aatomite kogumeid, muutuvad energianivood naaberaatomite mõju tõttu ja moodustavad energiavööndid. Nende vööndite vahele jäävad alad, kus elektron ei saa asuda. Neid alasid nimetatakse *keeluvöönditeks*. Energiavööndid, mis vasta-

vad lubatud nivoodele, jaotatakse valents- ja juhtivusvööndiks.

Elektrijuhtivuse tekkimiseks on vajalik, et osa elektrone läheks valentsvööndist juhtivusvööndisse. Sellise üleminekuks võimalikkuse määrab vahepealse keeluvööndi laius, mis on võrdeline energiaga, mille peame andma elektronidele selleks üleminekuks.



Joon. 1-5. Energianivood:
a — juht; *b* — dielektrik; *c* — pooljuht; *1* — juhtivusvöönd; *2* — keeluvöönd; *3* — valentsvöönd.

Juhtide, pooljuhtide ja dielektrikute erineva elektrijuhtivuse põhjuseks on nende struktuuri iseärasused. Tahke keha teooria kohaselt on metalljuhtide hea elektrijuhtivus tingitud sellest, et valentsvöönd on väga lähedal juhtivusvööndile (joon. 1-5, *a*), vahel isegi osaliselt katab viimast. Selle tulemusena võivad elektronid metallis minna valentsvööndi nivoodelt juhtivusvööndi nivoodele. Teisiti öeldes, elektronid võivad tuumalähedastelt orbiitidelt minna kaugematele või isegi väljuda tuuma mõjupiirkonnast, muutudes vabaks, ja rännata juhtme otstele rakendatud pingest tingitud elektrivälja jõudude mõjul ühe aatomi juurest teise juurde.

Kui antud ainel on juhtivusvöönd valentsvööndist eraldatud küllalt laia keeluvööndiga (joon. 1-5, *b*), siis on aine elektrijuhtivus tühine ja ta on d i e l e k t r i k.

Pooljuhtidel on keeluvööndi laius tunduvalt väiksem kui dielektrikul (joon. 1-5, *c*) ja seega piisab elektronide üleminekuks juhtivusvööndisse väikesest ergastamisest. Näiteks muudab pooljuhi juhtivaks temperatuuri tõusul tekkiv soojusliikumise tugevnemine. Elektrijuhtivuse poo-

lest kuulub pooljuhtidele koht juhtide ja dielektrikute vahel.

Juhid jaotatakse kahte liiki. Esimest liiki juhtides, millede hulka kuuluvad peamiselt metallid ja nende sulamid, tekib vool vaid elektronide liikumisena (elektronjuhtivus).

Teist liiki juhtides, elektrolüütides, millede hulka kuuluvad hapete ja soolade vesilahused, tekib vool negatiivsete ja positiivsete ioonide liikumisena (ioonjuhtivus). Ioonid tekivad lahustaja toimel aine molekulide lagunemisel.

1-9. Elektrijuhid

Elektrijuhid, mida kasutatakse elektrotehnikas, võib jagada kahte rühma. Ühte kuuluvad suure erijuhtivusega, teise — suure eritakistusega materjalid.

Esimese rühma materjalidel peab olema peale suure erijuhtivuse väike takistuse temperatuuritegur, piisav mehhaaniline tugevus ja korrosioonikindlus.

Sõltuvalt materjali kasutamise otstarbest esitatakse ühtedele nimetatud omadustest suuremaid nõudeid, nõudeid teiste suhtes aga vähendatakse. Nii võib näiteks elektrimasina mähiste mehhaaniline tugevus olla palju väiksem kui kontaktjuhtmetel, milledele tööolukorras mõjuvad hõõrdejõud ja elektrikaar.

Puhastel metallidel on juhtivus suurem, sest mistahes lisandid vähendavad seda.

Vask. Väikese eritakistuse ($\varrho = 0{,}0175\ \Omega \cdot mm^2/m$), küllaldase mehhaanilise tugevuse, hea töödeldavuse ja piisava korrosioonikindluse tõttu on vask levinuim juhtmematerjal.

Valtsimisel ja tõmbamisel võime vasest saada traati, latt- ja ribamaterjali, näiteks kiilukujulise ristlõikega materjali kollektoriplaatide tarvis, jms.

Tavaliselt kasutatakse elektrolüütilist vaske, milles on lisandeid alla 0,1%. Eristatakse kõva lõõmutamata vaske margiga MT ja pehmet lõõmutatud vaske margiga MM.

Kõva vaske kasutatakse näiteks kontaktjuhtmete (elektritranspordis), kommutaatorilestade (elektrimasinais) jne. tarvis. Pehmet vaske kasutatakse laialdaselt mähisetraadi valmistamiseks, millest keritakse elektrimasinate ning mitmesuguste elektromagnetiliste aparaatide ja seadmete mähised (poolid).

Puhta vase kõrval kasutatakse tema ja teiste metallide sulameid: messingit, pronkse.

Kõikidel pronksidel on suurem mehhaaniline tugevus ja eritakistus kui vasel.

Kaadmiumpronksi (0,9% Cd) kasutatakse kommutaatorilestade ja trollijuhtmete valmistamiseks.

Berülliumpronksi (2,2% Be) kasutatakse voolu juhtivate vedrude, liugkontaktide, harjahoidjate valmistamiseks.

Messingit (30% Zn) kasutatakse laialdaselt mitmesuguste elektriaparaatide ja -seadmete detailide valmistamiseks.

Alumiinium. Kasutamise ulatuse poolest on alumiinium vase järel teisel kohal, olles halvemate elektriliste ($\varrho = 0{,}0295\ \Omega \cdot mm^2/m$) ja mehhaaniliste omadustega. Puhas alumiinium on pehme, väikese mehhaanilise tugevusega. Kõvaduse järgi eristatakse pehmet lõõmutatud alumiiniumi margiga AM ja kõva lõõmutamata alumiiniumi AT.

Alumiiniumjuhtmete kasutamisel vaskjuhtmete asemel on juhtmete ühesuguse takistuse ja pikkuse korral alumiiniumjuhtmete ristlõige 60% võrra suurem, kuid nende mass moodustab vaid 48% vaskjuhtmete massist.

Elektrienergia ülekandeliinide juhtmete jaoks kasutatakse alumiiniumi sulameid, näiteks aldreid, milles on 1 ... 1,5% Mg, Si ja Fe ning mis on küllaldase mehhanilise tugevusega ja hea juhtivusega ($\varrho = 0{,}032\ \Omega \cdot mm^2/m$).

Kasutatakse ka terasalumiiniumjuhtmeid, millede terastraatidest südamik on ümbritsetud alumiiniumtraatidest väliskihiga.

Teras. Tal on küllaltki suur eritakistus ($\varrho = 0{,}13\ \Omega \cdot mm^2/m$) ja väike korrosioonikindlus. Sellepärast kasutatakse terast õhuliinide juhtmeteks vaid väikeste ülekantavate võimsuste puhul, sest sel juhul määratakse juhtme ristlõige mitte takistuse vaid mehhaanilise tugevuse järgi. Kaitseks korrosiooni vastu kasutatakse tsingitud või vasetatud terasjuhtmeid.

Teise juhtide rühma kuuluvad suure eritakistusega materjalid. Need on peamiselt sulamid, näiteks niklist, kroomist ja rauast (kroomnikkel); rauast, kroomist ja alumiiniumist (fekraal) jne. Neid kasutatakse soojendusseadmete, -aparaatide ja reostaatide mähiste valmistamiseks. Neid võib kuumutada küllaltki kõrge temperatuu-

rini (suurusjärgus 1000 °C). Tänu materjali suurele eritakistusele võime saada lühikesi ja kompaktseid mähiseid.

Manganiin on sulam 86% vasest, 12% mangaanist ja 2% niklist. Tal on suur eritakistus ja väike temperatuuritegur (suurusjärgus $1 \cdot 10^{-5}$ 1/deg), mistõttu teda kasutatakse šuntide, lisatakistite ja taateltakistite (etalonitakistite) valmistamiseks.

Joodised ja räbustid. Joodis on jootmiseks kasutatav sulam, mida kasutatakse väikese takistusega elektrilise ühenduse saamiseks.

Joodise sulamistemperatuur peab olema tunduvalt madalam kui ühendatavate detailide (juhtmete) materjalidel. Sel juhul joodis sulab kuumenemisel, ühendatavate detailide metall jääb aga tahkeks. Joodis katab detailide pinnad ja täidab pilud nende vahel, difundeerudes metalli. Selle tulemusena moodustavad vahekiht ja detailid pärast jahtumist ühtse terviku.

Kasutatakse pehmeid tinapliijoodiseid, milles on tina 18 kuni 90% ja kõvu vasktsinkjoodiseid, kus on 36 kuni 55% vaske.

Alumiiniumjuhtmete jootmiseks kasutatakse tsinktinajoodist, milles on 56% tsinki, 42% tina ja 2% vaske või tsinkalumiiniumjoodist, milles on 80% tsinki, 12% alumiiniumi ja 8% vaske.

Ühendatavate detailide materjali ja joodise tugeva ning kindla ühenduse saamiseks kasutatakse lisaaineid — räbusteid. Nende peamine ülesanne on kahustada ja eemaldada jootekohalt oksiidid ning muud kõrvalised ained.

Räbustina kasutatakse peamiselt kampolit.

Alumiiniumjuhtmete jootmisel kasutatakse räbustit, mis koosneb 100 kaaluosast denatureeritud piiritusest ja 20 kaaluosast kampolist.

Elektrotehniline süsi. Selle peamised koostisosad on süsiniku modifikatsioonid, grafiit ja kivisüsi. Viimased peenestatakse ja seotakse täiendavate komponentidega (näiteks vasepulbriga) kivisõetõrva või -pigi abil. Järgneb segu termiline töötlemine vajalikus kujus.

Elektrotehnilist sütt kasutatakse elektrimasinate harjade, ahjude, elektrolüüsivannide ja keevitamise süsielektroodide, masstakistite, elektrovaakuumseadiste detailide, galvaanielementide jne. valmistamiseks.

1-10. Töö ja võimsus

Toiteallikast ja tarbijast koosnevas suletud vooluringis (joon. 1-3) toimub toiteallika emj. mõjul positiivsete ja negatiivsete laengute eraldumine.

Varem käsitletust (§ 1-2) järgneb, et töö, mida teevad välisjõud aja t jooksul elektrilaengu q ümberpaigutamisel toiteallikas, või elektrienergia, mille saame mõne teise energialiigi muundamisel,

$$A_g = W_g = Eq = EIt. \tag{1-22}$$

Kooskõlas energia jäävuse seadusega muundub see elektrienergia sama aja vältel kõigis ahela osades, antud juhul tarbijas ja toiteallikas, teisteks energialiikideks (energia muundumise juhtmetes jätame arvestamata).

Töö A_t, mida tehakse laengu ümberpaigutamisel tarbijas, ja temaga võrdne energia W_t, mis muudetakse tarbijas teiseks energialiigiks, avalduvad järgmiselt:

$$A_t = W_t = U_t q = U_t It, \tag{1-23}$$

kus U_t on tarbija klemmipinge.

Energiate vahe

$$W_g - W_t = W_0$$

on energia, mis muundub toiteallikas soojuseks.

Seoste (1-22) ja (1-23) abil võime seda energiat avaldada kujul

$$(E - U_t)It = W_0 = U_0 It,$$

kus

$$U_0 = E - U_t$$

kujutab endast sisemist pingelangu, millest oli juttu paragrahvis 1-4.

Töö ja selle sooritamiseks kulunud aja suhet

$$P = \frac{A}{t} \tag{1-24}$$

nimetatakse v õ i m s u s e k s. Seega võimsus on energia muundumise kiirus.

Mingi energialiigi muundumise kiirust toiteallikas

elektrienergiaks nimetatakse toiteallika (generaatori) võimsuseks

$$P_g = \frac{EIt}{t} = EI. \tag{1-25}$$

Elektrienergia muundumise kiirust tarbijas teisteks energialiikideks nimetatakse tarbija võimsuseks

$$P_t = \frac{U_t I t}{t} = U_t I. \tag{1-26}$$

Mittetootlikku elektrienergia kulu toiteallikas nimetatakse võimsuskaoks

$$P_0 = U_0 I. \tag{1-27}$$

Kooskõlas energia jäävuse seadusega on toiteallika (generaatori) võimsus võrdne tarbija võimsuse ja generaatori võimsuskao summaga:

$$P_g = P_t + P_0. \tag{1-28}$$

Rahvusvahelises mõõtühikute süsteemis SI on võimsuse ühikuks vatt (W), s. o. võimsus, mille puhul igas sekundis tehakse tööd 1 J, ehk võimsus, mille puhul igas sekundis muundub 1 J elektrienergiat mõneks teiseks energialiigiks. Seega

$$1\ \mathrm{W} = \frac{1\ \mathrm{J}}{1\ \mathrm{s}},$$

millest

$$1\ \mathrm{J} = 1\ \mathrm{W} \cdot 1\ \mathrm{s} = 1\ \mathrm{W} \cdot \mathrm{s}.$$

Järelikult on 1 džaul võrdne 1 vattsekundiga.

Paragrahvist 1-2 teame, et

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

seega

$$1\ \mathrm{W} = \frac{1\ \mathrm{J}}{1\ \mathrm{s}} = \frac{1\ \mathrm{V} \cdot 1\ \mathrm{C}}{1\ \mathrm{s}} = 1\ \mathrm{V} \cdot 1\ \mathrm{A},$$

s. t. 1 vatt on 1-amprise voolu võimsus 1-voldise pinge puhul.

Näide 1-5. Võrku pingega $U = 220$ V on lülitatud elektrimootor võimsusega $P = 5$ kW. Määrata vool elektrimootoris.

Vastavalt seosele (1-26)

$$P = UI,$$

millest

$$I = \frac{P}{U} = \frac{5000}{220} \approx 23\ \mathrm{A}.$$

Näide 1-6. Võrku pingega $U = 225$ V on lülitatud soojendusriist nimivooluga $I = 4$ A. Leida soojendusriista võimsus ja 2 tunni vältel tarbitud energia maksumus. Ühe kWh elektrienergia hind on 4 kopikat.

Soojendusriista võimsus $P = UI = 225 \cdot 4 = 900$ W.

Soojendusriista poolt 2 töötunni jooksul tarbitud energia $W = Pt = 900 \cdot 2 = 1800$ W · h = 1,8 kWh.

Kulutatud energia maksumus on $4 \cdot 1{,}8 = 7{,}2$ kopikat.

1-11. Elektrienergia muundumine soojusenergiaks

Elektrivool kujutab endast elektriliselt laetud osakeste suunatud liikumist. Kokkupõrgetel ioonidega või aine molekulidega annavad liikuvad osakesed neile osa oma kineetilisest energiast, mille tulemusena juhe kuumeneb. Seega muundub elektrienergia soojusenergiaks, mis kulub juhtme soojendamiseks ja osalt hajub ümbritsevasse keskkonda.

Elektrienergia soojusenergiaks muundumise kiirus on määratud võimsusega (1-26)

$$P = UI.$$

Pidades silmas, et $U = IR$, saame:

$$P = UI = I^2R. \qquad (1\text{-}29)$$

Soojuseks muunduv elektrienergia

$$W = Pt = I^2Rt.$$

Kuna 1 J = 0,24 cal, siis takistis eralduv soojus kalorites

$$Q = 0{,}24\ I^2Rt. \qquad (1\text{-}30)$$



H. F. E. Lenz (1804—1865).

Saadud avaldise, mis annab seose eraldunud soojushulga, voolu, takistuse ja aja vahel, leidis katsete tulemusena 1884. aastal vene akadeemik H. F. E. Lenz ja temaga samaaegselt ka inglise teadlane I. Pr. Joule. Tänapäeval on ta tuntud Joule-Lenzi seaduse nime all: *voolu mõjul juhtmes eralduv soojushulk on võrdeline voolu ruuduga, juhtme takistusega ja voolu kulgemise ajaga.*

Elektrienergia muundamine soojuseks leiab kasulikku rakendamist mitmesugustes soojendus- ja valgustusseadmetes.

Ülejäänud aparaatides ja seadmetes on elektrienergia muundumine soojuseks mittetootlik energiakadu (-kulu), mis vähendab kasutegurit. Peale selle põhjustab eralduv soojus nende seadmete kuumenemist ja piirab nende koormamist. Ülekoormusel võib aga temperatuuri tõus põhjustada isolatsiooni riknemist ja seadme tööaja lühenemist.

Näide 1-7. Leida soojushulk, mis eraldub soojendusriistas 15 minuti jooksul, kui riista takistus on 22 Ω ja võrgu pinge on 110 V.

Vool

$$I = \frac{U}{R} = \frac{110}{22} = 5 \text{ A}.$$

Seadmes eralduv soojushulk

$$Q = I^2Rt = 5^2 \cdot 22 \cdot 15 \cdot 60 = 495\,000 \text{ J}.$$

1-12. Juhtmes lubatav vool. Kaitse ülekoormuse eest

Juhtme soojenemisel sõltub temperatuuri tõus juhtme massist ja temas tekkivast soojushulgast. Soojuse ümbritsevasse keskkonda siirdumise kiirus on võrdeline juhtme ja ümbruse temperatuuride vahega. Algul, kui laseme voolu juhtmesse, on juhtme ja keskkonna temperatuurid võrdsed ja seega on soojusülekanne tähtsusetu. Praktiliselt läheb kogu eraldunud soojushulk juhtme kuumendamiseks, mille temperatuur tõuseb kiiresti. Temperatuuri tõusuga kasvab juhtme ja keskkonna temperatuuride vahe, soojusülekanne intensiivistub ning juhtme temperatuuri tõus aeglustub. Teatud temperatuuri juures osutub juhtmes tekkiv soojushulk võrdseks temast ümbrusesse siirduva soojushulgaga (saabub soojuslik tasakaal). Juhtme temperatuur saavutab püsiväärtuse. Niisuguse temperatuurini jõudmiseks kuluv aeg on erinevatel seadmetel erinev ja ulatub

hõõglambi mõnest murdosast sekundist mitmete tundideni suure võimsusega masinate puhul.

Juhtmete kuumenemine on lubatud teatud piirini. Isoleeritud juhtmetel on see määratud isolatsiooni liigi ja omadustega. Vähimat voolu, mis kuumendab juhet lubatava temperatuurini, nimetatakse *juhtme lubatavaks vooluks*. Isoleeritud vaskjuhtmete mõnedele ristlõigetele vastavad lubatavad voolud on antud tabelis 1-3.

Tabel 1-3

Isoleeritud juhtmetele lubatavad voolud

Vaskjuhtme ristlõige mm²	0,7	0,75	1	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50
Maksimaalne lubatav vool A	11	15	17	23	30	41	50	80	100	140	170	215

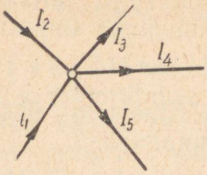
Üksikuid vooluringi osi kaitstakse ülekoormuse või lühise puhul tekkiva lubatavast suurema voolu soojusliku toime eest *sulavkaitsmetega* (§ 14-11) või *releedega* (§ 14-14). Sulavkaitsme põhiosaks on sulavpanus e. sulavelement, mis on lühike, kergesti sulavast metallist traadike või riba. Ülekoormuse puhul ta kuumeneb ja sulab, katkestades vooluringi ja lülitades välja kaitstava lõigu.

Lühiseks nimetatakse kahe erineva potentsiaaliga juhtme (klemmi) vahetut ühendust või nende ühendust läbi tähtsusetult väikese takistuse. Lühisvool ületab lubatava voolu kümneid või sadu kordi ja võib põhjustada mehhaanilisi ja kuumusest tingitud kahjustusi või koguni seadme mõningate osade purunemist.

1-13. Kirchhoffi esimene seadus

Kui vooluringi mingis punktis ühineb mitu juhet, siis seda punkti nimetatakse *hargnemispunktiks* ehk *sõlmeks*. *Hargnemispunkti suunduvate voolude summa on võrdne sealt väljuvate voolude summaga. See on Kirchhoffi esimene seadus* (joon. 1-6 põhjal):

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



Joon. 1-6. Vooluringi hargnemispunkt.

või, tuues kõik voolud võrrandi ühele poolele,

$I_1 + I_2 - I_3 - I_4 - I_5 = 0.$

Üldkujul

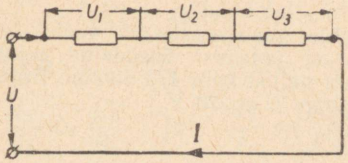
$$\sum I = 0, \tag{1-31}$$

s. t. *voolude algebraline summa sõlmes on võrdne nulliga.* Kahes viimases avaldises loetakse sõlme suunduvad voolud positiivseteks, väljuvad negatiivseteks.

1-14. Tarbijate (takistite) ühendamine

a) *Jadaühendus*

Kui mitu tarbijat või takistit on ühendatud üksteise järel ilma hargnemiseta, nagu on näidatud joonisel 1-7, ja nad on ühendatud ka vooluallikaga, siis kõiki neid läbib üks ja sama vool. Sellist ühendust nimetatakse järjestik- ehk jadaühenduseks.



Joon. 1-7. Takistite jadaühendus.

Pinged takistitel (1-9) on järgmised:

$U_1 = IR_1; \quad U_2 = IR_2; \quad U_3 = IR_3.$

Kuna vool on kõigis vooluringi osades ühesugune, siis on pinged nendel osadel võrdelised vastavate takistustega:

$$U_1 : U_2 = R_1 : R_2 \quad \text{ja} \quad U_2 : U_3 = R_2 : R_3. \tag{1-32}$$

Vooluringi osade võimsused

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

Energia jäävuse seaduse kohaselt on kogu välisahela võimsus võrdne tema üksikute osade võimsuste summaga:

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

Seega on välisahela klemmipinge võrdne tema üksikutel osadel esinevate pingelangude summaga:

$$U = U_1 + U_2 + U_3. \qquad (1\text{-}33)$$

Jagades viimase avaldise mõlemat poolt vooluga saame:

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

ehk

$$R = R_1 + R_2 + R_3. \qquad (1\text{-}34)$$

Takistust R nimetatakse **välisahela kogu- ehk ekvivalentseks takistuseks**. Rakendades sellele takistusele ja tegelikule ahelale sama pinge, saame ühesuguse voolu.

Seega on jadaühenduse puhul välisahela kogutakistus võrdne kõigi tema osade takistuste summaga. Jadaühenduse näitena võiks nimetada juhtmete ja tarbija ühendust või juhtu, kus trammivõrku pingega $U_v = 600$ V lülitatakse viiekaupa jadamisi hõõglambid nimipingega $U_L = 120$ V ($U_v : U_L = 600$ V : 120 V $= 5$).

Näide 1-8. Leida, millistes piirides saab reguleerida voolu elektrimootori ergutusmähises, millega on jadamisi ühendatud reostaat. Reostaadi takistust R_2 saame muuta nullist kuni 176 oomini. Ergutusmähise takistus $R_1 = 44\ \Omega$, võrgupinge $U = 220$ V.

Vooluringi kogutakistus

$$R = R_1 + R_2.$$

Kui $R_2 = 0$, siis vool

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2} = \frac{220}{44 + 0} = 5 \text{ A}.$$

Kui $R_2 = 176\ \Omega$, siis vool

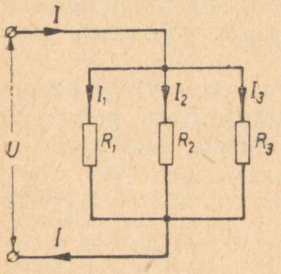
$$I = \frac{U}{R_1 + R_2} = \frac{220}{44 + 176} = 1 \text{ A}.$$

b) Rööpühendus

Takistite paralleel- ehk rööpühenduseks nimetatakse lülitust (joon. 1-8), kus ahela kahe punkti vahele on ühendatud mitu takistit, mis muudavad need punktid sõlmedeks, millest väljuvad rööpharud. Seega ühendatakse rööpühenduse korral kõigi takistite üks klemm ühte ja teine teise sõlme.

Kuna pingelang igal takistil on võrdne sõlmedevahelise pingega U, siis on kõigi harude pinged võrdsed:

$$U = U_1 = U_2 = U_3. \tag{1-35}$$



Joon. 1-8. Takistite rööpühendus.

Väljendades pinged vastavate voolude ja takistuste korrutiste abil saame:

$$U = I_1R_1 = I_2R_2 = I_3R_3,$$

millest

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad \text{ja} \quad \frac{I_2}{I_3} = \frac{R_3}{R_2}, \tag{1-36}$$

s. t. *voolud rööpharudes on pöördvõrdelised nende harude takistustega.*

Vastavalt Kirchhoffi esimesele seadusele

$$I = I_1 + I_2 + I_3,$$

väljendades voolud aga vastavate pingete ja takistuste suhetena, saame:

$$\frac{U}{R} = \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3}.$$

Lihtsustamisel saame seose

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \tag{1-37}$$

ehk

$$G = G_1 + G_2 + G_3.$$

Takistust R nimetatakse **välisahela kogu- ehk ekvivalentseks takistuseks** ja juhtivust G **välisahela kogu- ehk ekvivalentseks juhtivuseks.**

Valemist (1-37) järeldub, et *takistite rööpühenduse korral on välisahela kogujuhtivus võrdne üksikute harude juhtivuste summaga.*

Valem (1-37) võimaldab määrata vooluringi hargneva osa kogutakistust. Kui näiteks kolme haru puhul viime võrrandi (1-37) parema poole ühisele nimetajale, siis saame:

$$\frac{1}{R} = \frac{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}{R_1R_2R_3},$$

millest vooluringi hargneva osa kogutakistus

$$R = \frac{R_1R_2R_3}{R_1R_2 + R_1R_3 + R_2R_3}. \tag{1-38}$$

Kui harude takistused on võrdsed, siis

$$R = \frac{R_1^3}{3R_1^2} = \frac{R_1}{3}.$$

Kui hargnemispunktist väljub n rööpset haru võrdse takistusega R_1, siis vooluringi hargneva osa kogutakistus

$$R = \frac{R_1}{n}. \tag{1-39}$$

Kahe rööpse haru kogutakistuse leiame valemist (1-37) järelduvast seosest:

$$R = \frac{R_1R_2}{R_1 + R_2}. \tag{1-40}$$

Enamik elektrienergia tarbijaid, nende hulgas hõõglambid, soojendusriistad ja mootorid, on mõeldud tööks

muutumatul nimipingel. Seetõttu ühendatakse nad enamasti rööbiti, sest sel juhul on neil kõigil ühesugune pinge ja nende töörežiimid praktiliselt ei sõltu üksteisest.

Näide 1-9. Liinile pingega $U = 115$ V on lülitatud rööbiti elektrimootor võimsusega $P_1 = 3{,}5$ kW ja elektriahi võimsusega $P_2 = 2{,}3$ kW. Leida vool liinis.

Vool mootoris

$$I_1 = \frac{P_1}{U} = \frac{3500}{115} \approx 30 \text{ A}.$$

Vool elektriahjus

$$I_2 = \frac{P_2}{U} = \frac{2300}{115} = 20 \text{ A}.$$

Vool liinis

$$I = I_1 + I_2 = 30 + 20 = 50 \text{ A}.$$

Näide 1-10. Leida takistus hõõglambil, mille võimsus $P_L = 100$ W ja nimipinge $U = 220$ V. Leida kahekümne sellise lambi kogutakistus rööpühenduse puhul.

Kuna võimsus $P = UI = U^2/R$,
siis hõõglambi takistus

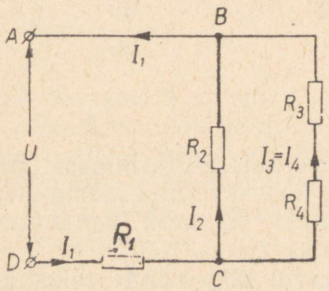
$$R_L = \frac{U^2}{P_L} = \frac{220^2}{100} = 484 \ \Omega.$$

Kahekümne rööbiti ühendatud lambi kogutakistus

$$R = \frac{R_L}{20} = \frac{484}{20} = 24{,}2 \ \Omega.$$

c) Segaühendus

Segaühenduseks nimetatakse sellist takistite (vooluringi osade) ühendusviisi, kus esineb nii elementide jada kui ka rööpühendus.



Joon. 1-9. Takistite segaühendus.

Segaühenduse näiteks on joonisel 1-9 kujutatud skeem. Seal on jadamisi ühendatud osad BC, mis koosneb kahest rööpharust (R_2 ja $R_3 + R_4$) ja CD, mille takistus on R_1.

Ahela hargnenud osa takistuse leiame valemi (1-40) abil:

$$R_{BC} = \frac{R_2(R_3 + R_4)}{R_2 + (R_3 + R_4)}.$$

Ahela kogutakistus

$$R = R_1 + R_{BC} = R_1 + \frac{R_2(R_3 + R_4)}{R_2 + (R_3 + R_4)}.$$

Näide 1-11. Leida voolud kõigis joonisel 1-9 kujutatud ahela osades ja pingelangud neil osadel. Pinge ahela klemmidel $U_{AD} = 210$ V. Takistused $R_1 = 0{,}6$ Ω; $R_2 = 4$ Ω; $R_3 = 3{,}5$ Ω; $R_4 = 2{,}5$ Ω.

Ahela kogutakistus

$$R = R_1 + \frac{R_2(R_3 + R_4)}{R_2 + R_3 + R_4} = 0{,}6 + \frac{4(3{,}5 + 2{,}5)}{4 + 3{,}5 + 2{,}5} = 3 \text{ Ω}.$$

Vool esimeses takistis

$$I_1 = \frac{U_{AD}}{R} = \frac{210}{3} = 70 \text{ A}.$$

Pinge esimesel takistil

$U_1 = I_1 R_1 = 70 \cdot 0{,}6 = 42$ V.

Pinge ahela hargnenud osal

$U_{BC} = U_{AD} - U_1 = 210 - 42 = 168$ V.

Voolud harudes

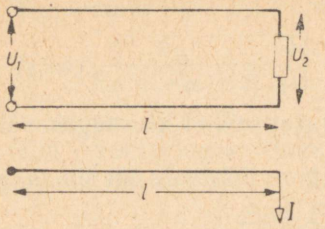
$$I_2 = \frac{U_{BC}}{R_2} = \frac{168}{4} = 42 \text{ A};$$

$$I_3 = \frac{U_{BC}}{R_3 + R_4} = \frac{168}{3{,}5 + 2{,}5} = 28 \text{ A}.$$

1-15. Kahejuhtmeline liin

Elektrienergia suunatakse generaatorist tarbijasse juhtmete kaudu. Seadet, mis koosneb kahest tarbija klemmidele suunduvast juhtmest, isolaatoritest ja neid kandvatest tugedest, nimetatakse elektriliiniks (joon. 1-10).

Juhtmete väikese pikkuse korral võib nende takistuse



Joon. 1-10. Kahejuhtmeline liin koormusega lõpus.

jätta arvestamata. Juhtmete suurema pikkuse korral (kümneid meetreid ja rohkem) tuleb nende takistust arvestada, sest vool I põhjustab neis pingelangu

$$\Delta U = IR = I\frac{2l}{\gamma S}, \tag{1-41}$$

kus $2l$ on liini kahe juhtme kogupikkus.

Pingete vahet liini otstel $U_1 - U_2$, mis on võrdne pingelanguga liinijuhtmeil, nimetatakse p i n g e k a o k s, s. t.

$$U_1 - U_2 = \Delta U = IR. \tag{1-42}$$

Koormuse (voolu) muutmisel nullist nimiväärtuseni muutub pingekadu vooluga võrdeliselt. Kui liini alguses on pinge muutumatu, siis liini lõpus, s. o. tarbija klemmidel muutub pinge väärtuselt $U'_2 = U_1$ voolu puudumisel kuni väärtuseni $U''_2 = U_1 - \Delta U$ nimikoormusel.

Seega on lubatav pingekadu võrdne tarbija pinge lubatava muutusega, mis on hõõglampidel 1 ... 2%, elektrimootoritel aga 2 ... 5% nimipingest.

Kui lubatav pingekadu on teada, siis liinijuhtmete vajaliku ristlõike arvutame valemist

$$S = \frac{2lI}{\gamma \Delta U}, \tag{1-43}$$

mis on saadud valemi (1-41) teisendamisel.

Seejärel tuleb kontrollida lubatava pingekao alusel leitud ristlõike vastavust lubatavale voolule, mis on määratud juhtmele lubatava temperatuuriga (vt. tabel 1-3).

Korrutades lubatava pingekao vooluga, saame võimsuskao liinis

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

Liini kasutegur

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta U}{U_1}.$$

Seega koormuse (voolu) suurenemisel kasutegur väheneb.

Kui lubatav pingekadu on 2 ... 5%, siis on kasutegur vastavalt 98 ... 95%.

Näide 1-12. Valida 70 m pikkuse liini juhtmete ristlõige, kui liini koormatakse elektrimootoriga, mille nimivool $I = 45$ A. Pinge on 110 V, lubatav pingekadu 5%. Juhtmed on vasest (erijuhtivus $\gamma = 57$ m/Ω · mm²).

Juhtmete ristlõike leiame valemist (1-43):

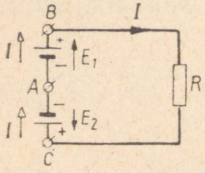
$$S = \frac{2Il}{\gamma \Delta U} = \frac{2 \cdot 45 \cdot 70}{57 \cdot 110 \cdot 0{,}05} \approx 20 \text{ mm}^2.$$

Valime lähima suurema standardse ristlõike $S' = 25$ mm².

Kontrollime, kas valitud ristlõikele lubatav vool (§ 1-12) rahuldab meie tingimusi. Tabelist 1-3 näeme, et ristlõikele $S' = 25$ mm² lubatav vool on 125 A, seega on antud vool $I = 45$ A lubatud.

1-16. Toiteallika kaks tööreżiimi

Kahe toiteallikaga vooluringis (joon. 1-11) saame voolu leida ülestusprintsiibi alusel, mis seisneb selles, et vool mistahes vooluringi osas on määratav teineteisest sõltumatult toimivatest toiteallikatest tingitud ja selles vooluringi osas kulgevate voolude algebralise summana.



Joon. 1-11. Elektromotoorjõud ja vool kahe toiteallikaga vooluringis, kus $E_1 > E_2$.

Kui vooluringis on vaid esimene toiteallikas, siis

$$I_1 = \frac{E_1}{R_{01} + R_{02} + R}$$

ja voolu suund ühtib emj. E_1 suunaga.

Kui vooluringis on vaid teine toiteallikas, siis

$$I_2 = \frac{E_2}{R_{01} + R_{02} + R}$$

ja voolu suund ühtib emj. E_2 suunaga.

Kui vooluringis toimivad korraga kahe toiteallika samasuunalised elektromotoorjõud, siis tegelik vool

$$I = I_1 + I_2 = \frac{E_1 + E_2}{R_{01} + R_{02} + R}. \qquad (1\text{-}44)$$

Kui need elektromootorjõud on aga vastassuunalised, siis vool

$$I = I_1 - I_2 = \frac{E_1 - E_2}{R_{01} + R_{02} + R} \qquad (1\text{-}45)$$

on nullist erinev vaid siis, kui $E_1 \neq E_2$.

Oletame, et $E_1 > E_2$. Sel juhul on vool vooluringis samasuunaline suurema elektromootorjõuga E_1 ja vastassuunaline E_2-ga (joon. 1-11). Voolule vastupidiselt suunatud elektromootorjõudu nimetatakse vastassuunaliseks elektromotoorjõuks e. vastuelektromotoorjõuks.

Valemile (1-45) võime anda kuju

$$E_1 - E_2 = IR_{01} + IR_{02} + IR, \qquad (1\text{-}46)$$

millest esimese toiteallika emj.

$$E_1 = E_2 + IR_{01} + IR_{02} + IR.$$

Pinge U_{AB} esimese toiteallika klemmidel

$$U_1 = E_1 - IR_{01} = E_2 + IR_{02} + IR \qquad (1\text{-}47)$$

ja pinge U_{CA} teise toiteallika klemmidel

$$U_2 = E_2 + IR_{02}.$$

Korrutades võrrandi (1-47) kõiki liikmeid vooluga I, saame:

$$U_1 I = E_1 I - I^2 R_{01} = E_2 I + I^2 R_{02} + I^2 R. \qquad (1\text{-}48)$$

Viimane võrrand annab meile vaadeldavas vooluringis sekundis tarbitava energia.

Esimese toiteallika võimsus $E_1 I$, millest on lahutatud temas soojusena eralduv võimsus $I^2 R_{01}$, on võrdne võimsusega $U_1 I$, mida esimene toiteallikas annab ahelasse.

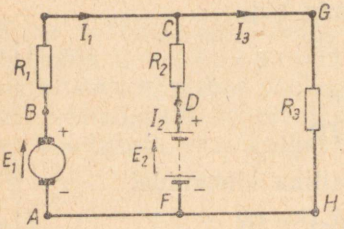
Selle võimsuse tarbivad teine toiteallikas ja takisti R. Esimese toiteallika koguvõimsusest muundub takistil R soojuseks osa I^2R, võimsus I^2R_{02} muundub aga soojuseks teises toiteallikas. Võimsus E_2I, mida teine toiteallikas saab esimeselt, muundub keemiliseks või mehhaaniliseks energiaks, mis sõltub loomulikult teise toiteallika liigist (akumulaator laadub, alalisvoolumasin töötab elektrimootorina).

Seega võivad toiteallikad töötada kas generaatoritena või elektrienergia tarbijatena.

Kui toiteallikas töötab tarbijana, siis on pingelang temal suurem kui ta emj. ($U > E$), mis on voolule vastassuunaline.

1-17. Kirchhoffi teine seadus

Joonisel 1-12 kujutatud elektriahel koosneb kahest generaatorina töötavast toiteallikast ja kolmest takistist. Takistusi R_1 ja R_2 võime vaadelda toiteallikate sisetakistustena ja vastavate ahelaosade juhtmete takistustena.



Joon. 1-12. Kahe toiteallikaga liitahela skeem.

Vastavalt seosele (1-13) pinge ahela sõlmede C ja F vahel

$$U_{CE} = E_1 - I_1R_1 = E_2 - I_2R_2,$$

millest

$$E_1 - E_2 = I_1R_1 - I_2R_2. \qquad (1\text{-}49)$$

Üldkujul

$$\sum E = \sum IR. \qquad (1\text{-}50)$$

Viimane võrrand on tuntud Kirchhoffi teise seaduse nime all, mis kõlab nii: *elektriahela mistahes*

kinnises kontuuris toimivate elektromotoorjõudude algebraline summa on võrdne kõigi selle kontuuri takistustel esinevate pingelangude (IR) algebralise summaga.

Kirchhoffi teise seaduse järgi võrrandeid koostades loeme emj. positiivseks, kui ta suund ühtib antud kontuuri jaoks vabalt võetud ringkäigu suunaga, ja negatiivseks, kui ta suund on vastupidine sellele valitud suunale.

Pingelangu *IR* loeme positiivseks, kui voolu suund takistis ühtib kontuuri ringkäigu suunaga, ja negatiivseks, kui ta suund on vastupidine.

1-18. Liitahelate arvutamine

Liitahelate arvutamiseks on terve rida meetodeid. Ühega neist, mis põhineb ülestusprintsiibil, tutvusime paragrahvis 1-16. Teisena tutvume meetodiga, mille järgi koostame Kirchhoffi seaduste põhjal sõlmede ja kontuuride kohta käivad võrrandid ja lahendame need.

Liitahela arvutamiseks antakse ette liitahela lülitusskeem, toiteallikate polaarsus, nende elektromotoorjõud ning kõigi liitahela osade takistused. Tuleb leida voolude suunad ja suurused kõigis liitahela osades (harudes).

Koostades Kirchhoffi seaduste alusel võrrandeid, peame peale antud suuruste teadma voolude suundi kõigis liitahela osades. Need võime valida vabalt, märkides nad skeemile noolekestega vastavate liitahela osade juures. Kui me lõpuks võrrandi lahendamisel saame mõne voolu miinusmärgiga, siis tähendab see, et voolu tegelik suund on vastupidine meie poolt eeldatule.

Koostatud võrrandite arv peab võrduma tundmatute voolude arvuga. Sõlmede kohta koostatud võrrandite arv peab olema ühe võrra väiksem liitahela sõlmede koguarvust. Kontuuride võrrandite koostamisel tuleb valida lihtsamad kontuurid, milledest iga järgnev peab haarama mõnda uut liitahela osa, mis teistes võrrandites veel ei esine.

Näide 1-13. Leida voolud I_1, I_2 ja I_3 (joon. 1-12), kui $E_1 = 123$ V; $E_2 = 115$ V; $R_1 = 0{,}15$ Ω; $R_2 = 0{,}5$ Ω; $R_3 = 12$ Ω. Valime vabalt voolude suunad kõigis liitahela osades ja kanname nad skeemile (vt. joon. 1-12).

Koostame kolm võrrandit, ühe Kirchhoffi esimese ja kaks Kirchhoffi teise seaduse järgi.

Esimese võrrandi koostame sõlme C kohta:

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0. \tag{1-51}$$

Teise võrrandi koostame kontuuri ABCGHFA kohta:

$$E_1 = I_1R_1 + I_3R_3 \tag{1-52}$$

ja kolmanda võrrandi kontuuri FDCGHF kohta:

$$E_2 = I_2R_2 + I_3R_3. \tag{1-53}$$

Asetades viimasesse kahesse võrrandisse arvväärtused, saame:

$$123 = 0{,}15I_1 + 12I_3; \tag{1-54}$$
$$115 = 0{,}5I_2 + 12I_3. \tag{1-55}$$

Asendades viimases võrrandis voolu $I_2 = I_3 - I_1$, saame:

$$115 = 0{,}5I_3 - 0{,}5I_1 + 12I_3 = -0{,}5I_1 + 12{,}5I_3. \tag{1-56}$$

Korrutades võrrandit (1-56) 0,3-ga ja liites talle seejärel võrrandi (1-54), saame:

$$\begin{aligned} 34{,}5 &= -0{,}15I_1 + 3{,}75I_3 \\ 123{,}0 &= 0{,}15I_1 + 12{,}0I_3 \\ \hline 157{,}5 &= 15{,}75I_3 \end{aligned}, \tag{1-57}$$

millest

$$I_3 = \frac{157{,}5}{15{,}75} = 10 \text{ A}.$$

Pinge punktide G ja H vahel

$$U_{GH} = I_3R_3 = 10 \cdot 12 = 120 \text{ V};$$

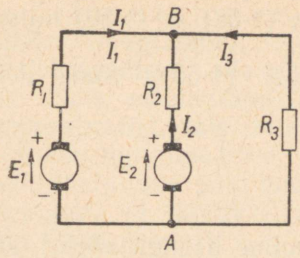
$$I_1 = \frac{E_1 - U_{GH}}{R_1} = \frac{123 - 120}{0{,}15} = 20 \text{ A};$$

$$I_2 = \frac{E_2 - U_{GH}}{R_2} = \frac{115 - 120}{0{,}5} = -10 \text{ A};$$

Miinusmärk näitab, et voolu I_2 tegelik suund on vastupidine joonisel 1-12 märgitule ja et teine toiteallikas töötab tarbijana.

Kolmas meetod liitahelate arvutamiseks on *sõlmepingemeetod*. Seda kasutame kahe sõlmega ahelate (joon. 1-13) arvutamiseks. Loeme harude voolud positiivseteks, kui nad suunduvad sõlmest A sõlme B. Pinge sõlmede B ja A vahel, mida nimetatakse *sõlmepingeks*, on võrdne potentsiaalide vahega:

$$U = \varphi_B - \varphi_A.$$



Joon. 1-13. Kahe sõlmega liitahela skeem.

Ohmi seaduse kohaselt vool esimeses harus

$$I_1 = \frac{E_1 - U}{R_1} = (E_1 - U)\,G_1, \tag{1-58}$$

kus R_1 ja G_1 on esimese haru (millesse kuulub ka generaator) takistus ja juhtivus.

Teises harus

$$I_2 = \frac{E_2 - U}{R_2} = (E_2 - U)\,G_2.$$

Kolmandas harus

$$I_3 = (0 - U)\,G_3 = -UG_3.$$

Kirchhoffi esimese seaduse kohaselt võime kirjutada sõlme B kohta:

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

Asendades viimasesse võrrandisse voolude avaldised, saame:

$$(E_1 - U)\,G_1 + (E_2 - U)\,G_2 + (-U)\,G_3 = 0.$$

Avame sulud ja leiame sõlmepinge:

$$U = \frac{E_1G_1 + E_2G_2}{G_1 + G_2 + G_3}.$$

Üldkujul

$$U = \frac{\Sigma\, EG}{\Sigma\, G}. \tag{1-59}$$

Seega on sõlmepinge võrdne vastavate harude elektromotoorjõudude ja juhtivuste korrutiste algebralise summa ja kõigi harude juhtivuse suhtega.

Kui mõni elektromotoorjõud on suunatud sõlmest B

sõlme A, siis viime ta valemeisse (1-58) ja (1-59) miinusmärgiga.

Määranud sõlmepinge valemist (1-59), võime leida voolud harudes, sest

$$I_1 = (E_1 - U)\,G_1$$

ja

$$I_2 = (E_2 - U)\,G_2.$$

Lihtsuse mõttes vaatlesime kolme haruga ahelat, kuid analoogiliselt võime arvutada mistahes harude arvuga ahelat.

Näide 1-14. Kahe sõlmega ahelas (joon. 1-13) $E_1 = 225$ V; $E_2 = 226$ V; $R_{01} = R_{02} = 0{,}5$ Ω; $R_3 = 10$ Ω. Leida voolud ahela osades.

Arvutame sõlmepinge:

$$U = \frac{E_1G_1 + E_2G_2}{G_1 + G_2 + G_3} = \frac{225 \cdot 2 + 226 \cdot 2}{2 + 2 + 0{,}1} = 220 \text{ V}.$$

Voolud ahela osades:

$$I_1 = (E_1 - U)\,G_1 = (225 - 220) \cdot 2 = 10 \text{ A};$$
$$I_2 = (E_2 - U)\,G_2 = (226 - 220) \cdot 2 = 12 \text{ A};$$
$$I_3 = -UG_3 = -220 \cdot 0{,}1 = -22 \text{ A}.$$

Kontrollime lahenduse õigsust:

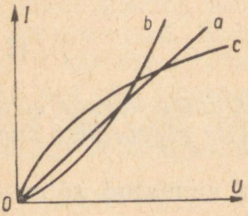
$$I_1 + I_2 + I_3 = 10 + 12 - 22 = 0.$$

Seega on ülesanne lahendatud õigesti.

1-19. Mittelineaarsed elektriahelad

Elektriahelat, mille takistus on teda läbivast voolust või tema klemmipingest sõltumatu, nimetatakse *lineaarseks*. Siiani vaatlesime selliseid ahelaid.

Elektriahelat, milles on kas või üks osa (element), mille takistus sõltub voolust või pingest, nimetatakse



Joon. 1-14. Pinge-voolu karakteristikud.

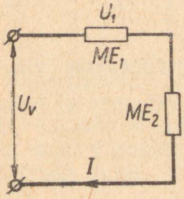
mittelineaarseks. Mittelineaarsed elemendid on näiteks hõõglambid, elektronlambid ja mitmesugused pooljuhtseadised, mis on tänapäeva tehnikas laialt levinud. Neis elementides sõltub takistus otseselt näiteks temperatuurist, mis omakorda sõltub voolust.

Kuna mittelineaarse ahela takistus (juhtivus) ei ole muutumatu, siis pole vool sellises ahelas võrdeline klemmipingega ja järelikult ei saa tema arvutamiseks kasutada Ohmi seadust.

Mittelineaarseid ahelaid arvutatakse tavaliselt graafiliste meetodite abil, kusjuures kasutatakse nn. pinge-voolu karakteristikuid, s. o. graafikuid $I = f(U)$ (U on klemmipinge).

Sirge (joon. 1-14), mis kujutab voolu sõltuvust pingest $I = f(U)$, on lineaarse ahela pinge-voolu karakteristik, sest mistahes voolu (pinge) väärtuse korral on ahela juhtivust väljendav suhe I/U muutumatu.

Kõverad *ob* ja *oc* on ahela mittelineaarsete osade pinge-voolu karakteristikud.

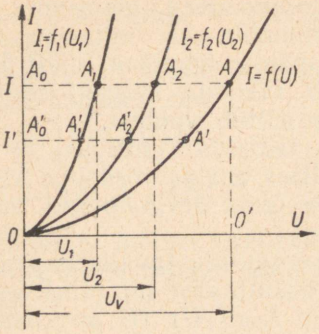


Joon. 1-15. Kahe mittelineaarse elemendi jadaühendus.

Kahest jadamisi ühendatud mittelineaarsest elemendist koosneva ahela (joon. 1-15) arvutamiseks konstrueerime ühes koordinaatteljestikus mõlema elemendi pinge-voolu karakteristikud $I_1 = f_1(U_1)$ ja $I_2 = f_2(U_2)$.

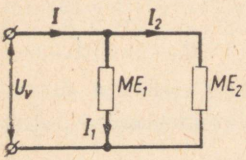
Kuna jadaühenduse puhul on klemmipinge võrdne erinevatel ahela osadel esinevate pingelangude summaga, siis liidame pinged U_1 ja U_2, mis vastavad ühele ja samale voolule, ja saame ahela pinge-voolu karakteristiku $I = f(U)$ punktid (joon. 1-16). Näiteks on ahela pinge-voolu karakteristiku punkt A', mis vastab mingile vooluväärtusele I', saadud abstsisside $A'_0A'_1$ ja $A'_0A'_2$ liitmisel.

Kui tuleb leida antud pingele vastav vool ahelas, siis võtame abstsissteljel võrgupingele U_v vastava lõigu OO', tõmbame sellele punktist O' ristjoone, mille lõikamisel



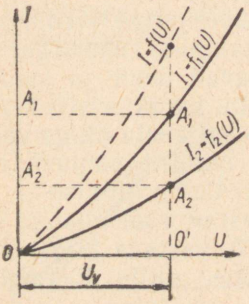
Joon. 1-16. Pinge-voolu karakteristikud jadaühenduse korral.

ahela pinge-voolu karakteristikuga $I = f(U)$ saame punkti A. Selle punkti ordinaat väljendabki antud klemmipingele vastavat voolu I. Nüüd tõmbame läbi punkti A abstsissteljega rööpse sirge, millel saame lõigud A_0A_1 ja A_0A_2, mis annavad meile pinged U_1 ja U_2 vastavatel ahela osadel.



Joon. 1-17. Kahe mittelineaarse elemendi rööpühendus.

Kahe mittelineaarse elemendi rööpühenduse (joon. 1-17) puhul võime mingi võrgupinge U_v korral leida voolud elementides viimaste pinge-voolu karakteristikute järgi (joon. 1-18). Kuna pinged rööpharudel on võrdsed,



Joon. 1-18. Pinge-voolu karakteristikud rööpühenduse korral.

võtame pingele U_v vastava lõigu OO' ja leiame voolud I_1 ja I_2 (lõigud OA'_1 ja OA'_2). Kui meil tuleb leida voolud I_1 ja I_2 koguvoolu I järgi, siis peame konstrueerima ahela pinge-voolu karakteristiku $I = f(U)$, liites rööpharude pinge-voolu karakteristikute ordinaadid, mis vastavad samadele pinge väärtustele.

Näide 1-15. Leida vool I ja pinged U_1 ja U_2 kahel jadamisi ühendatud mittelineaarsel elemendil, kui ahela klemmipinge $U_v = 130$ V.

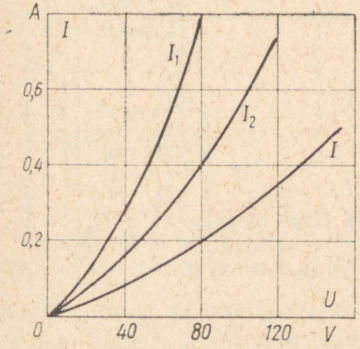
Pinge-voolu karakteristikud konstrueerida tabeli 1-4 andmete alusel.

Tabel 1-4

Näite 1-15 juurde

U	V	0	20	40	60	80	100
I_1	A	0	0,11	0,27	0,50	0,80	—
I_2	A	0	0,07	0,16	0,28	0,40	0,56

Konstrueerime pinge-voolu karakteristikud. Leiame ja liidame ühtedele ja samadele voolu väärtustele (0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5 A) vastavad karakteristikute abstsissid ning kanname need koordinaadistikku, saades punktid ahela pinge-voolu karakteristiku konstrueerimiseks (joon. 1-19).



Joon. 1-19. Näite 1-15 juurde.

Selle karakteristiku järgi leiame antud võrgupingele $U_v = 130$ V vastava voolu ahelas $I = 0{,}4$ A. Tõmbame läbi vastava punkti abstsisteljega rööpse sirge ja leiame pinged $U_1 = 52$ V ja $U_2 = 78$ V.

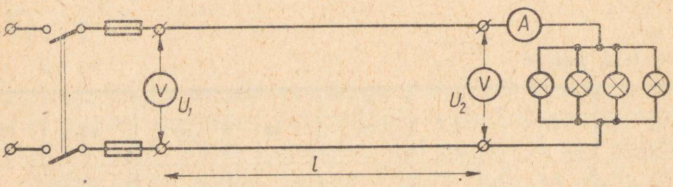
1-20. Laboratoorne töö

Pingekadu liinis

(Enne töö tegemist tutvuda paragrahviga 1-15 ja leheküljel 635 toodud lisaga.)

Tööplaan

1. Märkida üles mõõteriistade põhilised tehnilised andmed.
2. Kasutades kahest vaskjuhtmest liini, koostada lülitus (joon. 1-20) ja näidata seda juhendajale.



Joon. 1-20. Laboratoorse töö «Pingekadu liinis» juurde.

3. Kolme või nelja koormuse väärtuse puhul märkida tabelisse 1-5 ampermeetri ja voltmeetri näidud.

Tabel 1-5

Jrk. nr.	Juhtme-materjal	U_1	U_2	I	l	S	γ	$\Delta U'$	$\Delta U''$	ΔP	η
		V	V	A	m	mm²	m/Ω · mm²	V	V	W	%

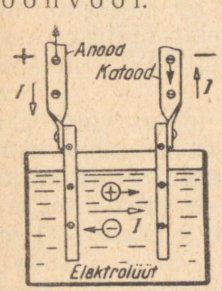
4. Määrata voltmeetrite näitude järgi pingekadu ($\Delta U'$).
5. Leida sama pingekadu ($\Delta U''$), kasutades Ohmi seadust.
6. Leida liini võimsuskadu (ΔP) ja kasutegur (η) iga koormuse väärtuse puhul.
7. Korrata samas järjekorras kõiki mõõtmisi ja arvutusi, kasutades nüüd terasest liinijuhtmeid.
8. Arvutustulemused märkida tabelisse 1-5.

2. VOOLU KEEMILINE TOIME

2-1. Elektrivool elektrolüütides

Teist liiki ja nimelt ioonjuhtivusega juhtide hulka kuuluvad hapete, soolade ja leeliste vesilahused ning mõned soolad sulas olekus. Vedelaid aineid ja ainete lahuseid, mis koosnevad osaliselt või täielikult ioonidest, nimetatakse elektrolüütideks. Metallide ja vesiniku aatomid annavad positiivseid ioone, elektrolüüdi mittemetalliline jääk aga negatiivseid ioone.

Rakendame toiteallika pinge kahele elektrolüüti viidud elektroodile (joon. 2-1). Anoodilt katoodile suunatud elektrivälja mõjul hakkavad positiivsed ioonid liikuma välja suunas katoodi poole, negatiivsed ioonid aga vastassuunas anoodile. See ioonide liikumine elektrolüüdis ongi ioonvool.



Joon. 2-1. Vool elektrolüüdis.

Kui elektrolüüdi negatiivsed ioonid on jõudnud anoodile, annavad nad viimasele oma liigsed elektronid, mis liiguvad sealt edasi vooluringi. Katoodile jõudnud positiivsed ioonid ühinevad vabade elektronidega, mis tulevad

sinna vooluringist. Nende protsessidega kaasnevad keemilised muutused, kusjuures elektroodidel eralduvad elektrolüüdi koostisosad.

Vastavalt Faraday seadusele on katoodil eralduva aine hulk G võrdeline elektrihulgaga, mis läbib elektrolüüti, s. o.

$$G = cQ = cIt. \qquad (2\text{-}1)$$

Valemis (2-1) esinev võrdetegur c, mida nimetatakse elektrokeemiliseks ekvivalendiks, on arvuliselt võrdne aine hulgaga milligrammides, mille eraldab katoodil üks kulon elektrit.

Aine elektrokeemiline ekvivalent

$$c = \frac{10^3}{96\,500}\frac{A}{n} \approx 0{,}0104\frac{A}{n},$$

kus A on aatomimass ja n on aine valents.

Erinevatel ainetel on elektrokeemilise ekvivalendi väärtused erinevad, näiteks on see vasel 0,329 mg/C, hõbedal 1,118 mg/C.

Protsessi, mille puhul elektrolüüdist voolu läbijuhtimisel eralduvad elektroodidel elektrolüüdi koostisosad, nimetatakse elektrolüüsiks.

Elektrolüüsi kasutatakse laialdaselt puhaste metallide, eriti vase saamiseks.

Vase elektrolüütiliseks puhastamiseks (rafineerimiseks) lastakse väävelhappega hapustatud vasevitrioliga täidetud vannidesse õhukesed vaskplaadid. Need on katoodid, milledele elektrolüüsi protsessis sadestub elektrolüütiline vask. Elektrolüüdis lahustuva anoodina kasutatakse maagist sulatatud toorvasest valmistatud plaate.

Galvanoplastika, mille alused töötas välja akadeemik M. H. Jacobi 1840. aastal, kujutab endast protsessi, kus metall sadestub metallist või mittemetallist toodetele ja mida kasutatakse reljeefsete jäljendite saamiseks, trükiklišeede valmistamiseks ja joonistuste trükkimiseks (vt. ptk. 17).

Galvanosteegia on protsess, kus metallist toode kaetakse mingi teise metalli kihiga. Seda tehakse kaitseks korrosiooni eest või tootele ilusa välimuse andmiseks (kroomimine, nikeldamine).

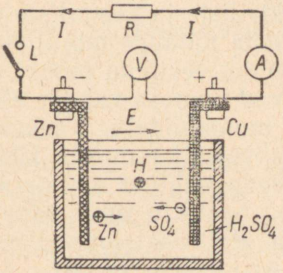
Elektrokeemiline poleerimine on üks uudsemaid metalli pinna töötlemise meetodeid. Ta seisneb selles, et kõik metalli pinnast väljaulatuvad osad lahus-

tatakse, mille tulemusena pind muutub peegelsiledaks (vt. ptk. 17).

Elektriraudteede rööpad on tavaliselt üheks voolujuhtmeks. Juhul, kui nende mingis osas tekib küllalt suur pingelang, võib vool seal hargneda ja kulgeda mööda rööpseid teid, näiteks mööda raudtee lähedal maasse paigutatud torustikku. Kohti, kus vool väljub torustikust, suundudes läbi maapinna rööbastesse, võib vaadelda kui elektrolüüsivanni anoode. Neis kohtades võib toru kiiresti laguneda ja puruneda.

2-2. Galvaani- ehk primaarelemendid

Keemilisi voolu- ehk toiteallikaid, milledes toimuvad pöördumatud keemilise energia elektriliseks muundumise protsessid, nimetatakse galvaani- ehk primaarelementideks.



Joon. 2-2. Volta element ja selle lülitusskeem.

Lihtsaim Volta galvaanielement (joon. 2-2) koosneb tsink- ja vaskelektroodist, mis asetsevad väävelhappe vesilahuses. Osa happe molekulidest laguneb vee toimel positiivseteks ($2H^+$) ja negatiivseteks (SO_4^{2-}) ioonideks. Tsinkelektrood lahustub elektrolüüdis keemiliste jõudude mõjul. Tsingi positiivsed ioonid suunduvad lahusesse, ühinevad negatiivsete ioonidega (SO_4^{2-}) ja moodustavad nõnda neutraalsed tsinksulfaadi ($ZnSO_4$) molekulid. Vesiniku positiivsed ioonid laevad elektrolüüdi positiivselt. Tsinkelektrood laadub negatiivselt. Selle tulemusena tekib tsingi ja elektrolüüdi piirikihis potentsiaalide vahe. Tekib elektriväli, mis on suunatud elektrolüüdist tsink-

elektroodile. Elektrivälja jõud ei lase tsingi positiivsetel ioonidel elektrolüüti tungida. Keemiliste ja elektriliste jõudude tasakaalu saabumisel lõpeb tsingi lahustumine elektrolüüdis. Osa positiivseid ioone ($2H^+$) neutraliseerub, kohtudes vaskelektroodi vabade elektronidega. Vask peaaegu ei lahustu elektrolüüdis. Seetõttu on vaskelektroodil positiivne potentsiaal, mis erineb vähe elektrolüüdi omast.

Elemendi emj. on võrdne vask- ja tsinkelektroodide potentsiaalide vahega, s. t. elektroodidevahelise pingega, juhul kui elemendi vooluring pole suletud. Volta elemendi emj. on ligikaudu 1,1 V. Elektromotoorjõud elemendis on suunatud negatiivselt elektroodilt (klemmilt) positiivsele ja on samasuunaline elementi läbiva vooluga.

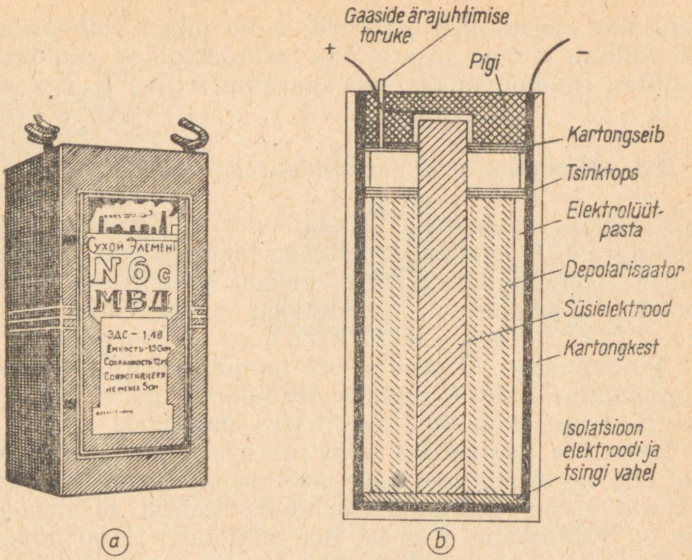
Ühendame elemendi klemmidega elektriahela, sulgedes lüliti *L* (joon. 2-2). Emj. toimel tekib ahelas vool, kusjuures elektronid liiguvad seal negatiivselt klemmilt positiivsele.

Vool põhjustab laengute vähenemise elektroodidel, elektrivälja nõrgenemise ning elektriliste ja keemiliste jõudude tasakaalu rikkumise. Keemiliste jõudude mõjul suunduvad elektrolüüti uued tsingi ioonid, vesiniku ioonid aga lähevad vaskelektroodile ja ühinevad viimase vabade elektronidega neutraalseteks vesiniku molekulideks. Vaskelektrood kattub halvasti mittejuhtiva vesinikumullide kihiga, mis eraldab teda elektrolüüdist. Seda nähtust nimetatakse elemendi polarisatsiooniks. Seetõttu emj. väheneb ja elemendi sisetakistus suureneb. Polarisatsiooni kõrvaldamiseks kasutatakse depolarisaatoreid, s. o. aineid, mis eraldavad kergesti hapnikku, näiteks mangaanperoksiidi. Depolarisaatori hapnik ühineb vesinikuga ja moodustab vee, vabastades elektroodi halvasti juhtivast vesiniku kihist.

Elektrotehnikatööstuse ettevõtete poolt toodetavatest väga mitmesugustest primaarelementidest on käesoleval ajal laiemalt levinud mangaantsinkelemendid (МЦЭ).

Neid valmistatakse kuiv- ja täidetavate elementidena. Viimased täidetakse elektrolüüdiga ja viiakse töökorda vahetult enne kasutamist. Neid nimetatakse ka tagavaraelementideks, sest nad võivad enne elektrolüüdiga täitmist säilida pikka aega. Mangaantsinkelemente valmistatakse topsikujuliste ja galettelementidena.

Topsikujulisel mangaantsinkelemendil (joon. 2-3) on



Joon. 2-3. Topsikujuline mangaantsinkelement (МЦЭ).

negatiivseks elektroodiks tema tsingist kest, millel on silindri või risttahuka kuju.

Positiivseks elektroodiks on kesta keskele paigutatud söepulk. Süsielektroodi ümber on pressitud depolarisaator (mangaandioksiidi, grafiidi ja tahma segu). Depolarisaatori ja tsinkkesta vaheline ruum täidetakse elektrolüüdiga, mis kujutab endast ammooniumkloriidi (salmiaagi) vesilahust, millesse on lisatud mõningaid sooli ning tihendajana jahu.

Mangaantsinkelemendi emj. on ligikaudu 1,5 V. Elemendi kasutamisel lubatavat suurimat voolu nimetatakse tühjenemise nimivooluks. Elektrihulka, mida võib saada elemendilt kogu tema tööaja jooksul, nimetatakse elemendi mahutavuseks. Seda mõõdetakse ampertundides:

$$1\ A \cdot h = 3600\ A \cdot s = 3600\ C.$$

Mangaantsinkelemente toodetakse massiga mõnest grammist kuni kilogrammini ja isegi raskemaid. Üksikutest ele-

TRÜ Raamatukogu

mentidest koostatakse patareid, mille pinge võib ulatuda 160 voldini, ja neid kasutatakse taskulampides, kuuldeaparaatides, raadiotehnikas, sideaparatuuris jne.

2-3. Akumulaatorid (sekundaarelemendid)

Keemilisi voolu- ehk toiteallikaid, millede töövõimet saab pärast tühjendamist taastada laadimisega, s. o. neist sellise voolu läbilaskmisega, mis on suunalt vastupidine voolule tühjendamisel, nimetatakse akumulaatoriteks (akudeks) ehk sekundaarelementideks.

Akumulaatori tühjendamisel toimub keemilise energia muundumine elektrienergiaks, laadimisel aga vastupidi — elektrienergia muundub keemiliseks energiaks.

Keemilise vooluallika konstruktiivsed lahendused võivad olla mitmesugused, kuid põhiliselt koosnevad akumulaatorid nagu galvaanielemendidki kahest elektroodist, mis on valmistatud esimest liiki juhtidest, ja on teineteisest eraldatud elektrolüüdi kihiga, s. o. teist liiki juhiga.

Tänapäeval kasutatakse laialdaselt plii- ehk happeakumulaatoreid, kaadmiumnikkel- ja raudnikkelakumulaatoreid ehk leelisakumulaatoreid.

a) Pliiakumulaatorid

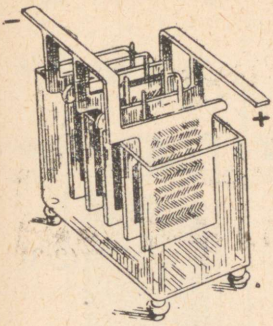
Pliiaku koosneb kahest seatinaplaatide komplektist, mis on asetatud elektrolüüdiga täidetud anumasse (joon. 2-4). Ühe komplekti moodustavad positiivsed plaadid, mis on joodetud ühise pliiriba külge. Teine komplekt koosneb negatiivsetest plaatidest, mis asetsevad esimese komplekti plaatide vahel ja on samuti omavahel ühendatud.

Positiivsed plaadid valmistatakse metallilisest pliist ja selleks, et suurendada nende kokkupuutepinda elektrolüüdiga, tehakse nad ribilised (joon. 2-5).

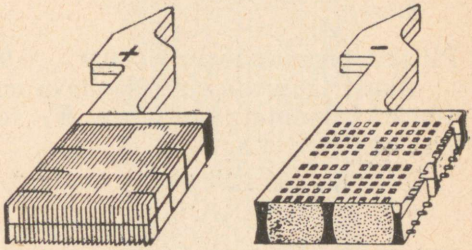
Negatiivsed plaadid koosnevad pliikarkassist, millesse on pressitud aktiivmass. Neid töödeldakse spetsiaalsel elektrolüütilisel menetlusel, n.-ö. formeeritakse.

Elektrolüüdiks on 25 ... 35%-line väävelhappe (H_2SO_4) vesilahus.

Laetud aku positiivse plaadi (anoodi) aktiivmass koosneb plii(IV)oksiidist (PbO_2), negatiivse plaadi (katoodi) aktiivmassiks on aga urbne plii (Pb).



Joon. 2-4. Pliiaku.



Joon. 2-5. Pliiaku plaadid.

Tarbijaga ühendatud laetud aku on toiteallikaks. Sellist töörežiimi nimetatakse aku t ü h j e n d a m i s e k s.

Tühjendamisel tekivad elektroodide plii(IV)oksiidist ja metallilisest pliist väävelhappe ja plii ühendid ($PbSO_4$), kusjuures vesi eraldub. See põhjustab elektrolüüdi kontsentratsiooni, tema juhtivuse ja aku emj. vähenemist.

Laadimisel toimuvad vastupidised protsessid.

Laetud aku emj. on 2,2 V.

Tühjendamisel langeb pinge aku klemmidel algul kiiresti 2,2 voldilt 2 voldile, siis aga aeglaselt 1,8 voldini. Pinge edasisel vähenemisel tuleb aku tühjendamine lõpetada, et vältida tema kahjustamist.

Laadimisel tuleb akust läbi juhtida vool, mis on vastassuunaline tühjendamisvoolule. Seetõttu tuleb aku laadimiseks ühendada toiteallika positiivne klemm (pluss) aku plussiga ja toiteallika miinus aku miinusega. Laadimisel kasvab aku klemmipinge kiiresti 2,2 voldini, seejärel aga aeglaselt 2,3 voldini. Kui aku on piisavalt laetud, hakkab eralduma vesinik, mis tõuseb mullidena elektrolüüdi pinnale (aku «keemine»). Sel ajal ulatub pinge 2,6—2,7 voldini. Siis tuleb laadimine lõpetada ja aku lahti ühendada.

Elektrihulka Q, mida võib saada laetud akust, nimetatakse viimase m a h u t a v u s e k s ja seda mõõdetakse ampertundides.

Akust tühjendamisel saadava ja temale laadimisel

antava elektrihulga suhet nimetatakse tagastustegu-riks:

$$\eta_t = \frac{Q_t}{Q_l}. \qquad (2\text{-}2)$$

Pliiaku tagastustegur on 0,9 ... 0,95.

Akust tühjendamisel saadava energia W_t ja tema laadimiseks kulutatud energia W_l suhet nimetatakse aku kasuteguriks:

$$\eta = \frac{W_t}{W_l}. \qquad (2\text{-}3)$$

Pliiaku kasutegur on 0,75 ... 0,8.

Pliiaku väär kasutamine põhjustab mahutavuse vähenemist ja aku riknemist. Akut tuleb hoida puhtana, tema klemmid peavad olema kaetud tehnilise vaseliini õhukese kihiga, et vältida oksüdeerumist. Vähemalt kord kümne päeva jooksul tuleb kontrollida elektrolüüdi taset ja seda, kas aku on laetud. Akut tuleb laadida perioodiliselt, sest teda ei tohi hoida tühjana.

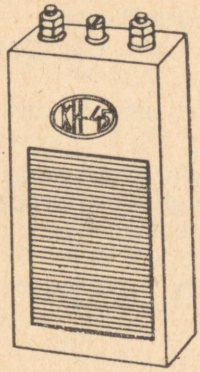
Aku vale ühendamine laadimiseks, poolik laadimine ja laadimata hoidmine põhjustavad elektrolüüdi taseme alanemist, kusjuures aku sulfateerub elektrolüüdi suure tiheduse tõttu. See kahjustab akut, sest peenekristalliline pliisulfaat läheb mittelahustuvate keemiliste ühendite koosseisu, mis ei võta osa aku tööst.

b) Leelisakumulaatorid

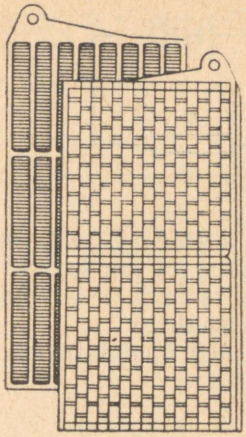
Leelisakud koosnevad kahest plaatide komplektist, mis on asetatud elektrolüüdiga täidetud suletud terasanumasse (joon. 2-6).

Leelisakude elektroodid kujutavad endast terasraame, milledesse on asetatud perforeeritud teraslindist pressitud ristkülikulised lamedad karbikesed. Karbikesed on täidetud aktiivmassiga. Kaadmiumnikkelelemendis koosneb positiivsete plaatide aktiivmass nikkel(III)hüdroksiidist $Ni(OH)_3$, negatiivsete plaatide aktiivmass aga urbsest kaadmiumist. Ka raudnikkelelementidel on positiivsete plaatide aktiivmassiks nikkel(III)hüdroksiid, negatiivsetel plaatidel aga urbne raud.

Elektrolüüdina kasutatakse 21%-list kaaliumhüdroksiidi (KOH) või naatriumhüdroksiidi (NaOH) vesilahust.



ⓐ



ⓑ

Joon. 2-6. Leelisaku:
a — väliskuju; *b* — plaadid.

Aku tühjendamisel muutub nikkel(III)hüdroksiid nikkel(II)hüdroksiidiks, urbne raud aga raud(II)hüdroksiidiks ja kaadmium kaadmium(II)hüdroksiidiks. Laadimisel kulgevad reaktsioonid vastupidiselt. Laetud aku emj. on 1,4 V.

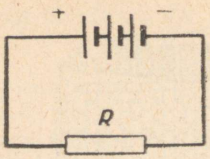
Aku tühjendamisel langeb pinge algul kiiresti 1,4 voldilt 1,3 voldile, seejärel aga aeglaselt 1,15 voldini, mil tühjendamine tuleb lõpetada. Laadimisel tõuseb pinge kiiresti 1,15 voldilt 1,75 voldini, siis langeb pisut ja tõuseb aeglaselt 1,85 voldini.

Leelisakude sisetakistus on tunduvalt suurem kui happeakudel, mistõttu neil on palju väiksem kasutegur — 0,5 . . . 0,6. Nende eeliseks on aga väiksem tundlikkus lühiste suhtes.

Leelisakud on pliiakudest tugevamad ja kergemad. Samuti on nad vähem nõudlikud hooldamise suhtes.

2-4. Toiteallikate ühendamine

Kui tarbija nimipinge ja -vool on suuremad kui toiteallika vastavad parameetrid, siis ühendatakse rida toiteallikaid jadamisi, rööbiti või rühmiti, moodustades elementide patarei.



Joon. 2-7. Toiteallikate jadaühendus.

Jadaühendust (joon. 2-7) kasutatakse juhul, kui tarbija pinge U on suurem üksiku elemendi elektromotoorjõust E_0 ja tarbija nimivool ei ole suurem elemendi tühjendamisvoolust.

Jadamisi ühendatavate elementide arv n on määratud järgmiselt:

$$n \geqslant \frac{U}{E_0}.$$

Elementide elektromotoorjõud peavad olema võrdsed ja samasuunalised. Viimase saavutamiseks ühendatakse esimese elemendi negatiivne klemm teise positiivsega jne.

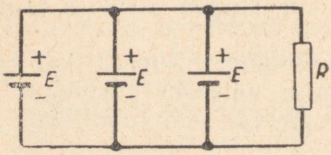
Sel juhul patarei emj.

$$E = nE_0, \tag{2-4}$$

tema sisetakistus

$$R = nR_0 \tag{2-5}$$

ja tühjendamisvool on võrdne ühe elemendi tühjendamisvooluga.



Joon. 2-8. Toiteallikate rööpühendus.

Rööpühendust (joon. 2-8) kasutatakse juhul, kui tarbija vool I on suurem elemendi tühjendamisvoolust I_t ja tarbija pinge on võrdne elemendi pingega. Rööpühenduse korral ühendatakse elementide positiivsed klemmid ühte ja negatiivsed teise sõlme.

Ühendatavate elementide elektromotoorjõud ja sisetakistused peavad olema võrdsed.

Rööbiti ühendatavate elementide arv m määratakse järgmiselt:

$$m \geqslant \frac{I}{I_t}.$$

Patarei emj. on sel juhul võrdne elemendi elektromotoorjõuga:

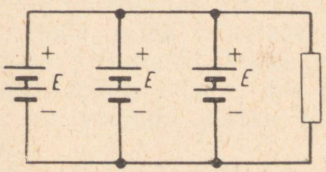
$$E = E_0, \tag{2-6}$$

patarei sisetakistus

$$R = \frac{R_0}{m}, \tag{2-7}$$

tema tühjendamisvool võrdub aga elementide arvu ja ühe elemendi tühjendamisvoolu korrutisega:

$$I = I_t m. \tag{2-8}$$



Joon. 2-9. Toiteallikate rühmühendus.

Rühmühendus on elementide jada- ja rööpühenduse kombinatsioon (joon. 2-9). Seda kasutatakse siis, kui tarbija nimipinge ja -vool on suuremad elemendi pingest ja tühjendamisvoolust. Rühmas jadamisi ühendatud elementide arv n ja rööbiti ühendatud rühmade arv m määratakse eespool toodud valemitest.

Näide 2-1. Määrata akude arv ja ühendusviis, mis on vajalik 1,75-kilovatise võimsusega avariivalgustusvõrgu toiteks, kui pinge on 110 V. Aku emj. $E = 2$ V, tema tühjendamisvool $I_t = 6$ A.
Tarbija vool

$$I = \frac{P}{U} = \frac{1750}{110} \approx 16 \text{ A}.$$

Kuna tarbija vool ja pinge ületavad elemendi tühjendamisvoolu ja pinge, siis kasutame rühmühendust.

Rühma jadamisi ühendatavate elementide arv

$$n \geqslant \frac{U}{E_0} = \frac{110}{2} = 55;$$

rööpsete rühmade arv

$$m \geqslant \frac{I}{I_t} = \frac{16}{6} = 2{,}5,$$

seega võtame $m = 3$.

Akude koguarv $nm = 55 \cdot 3 = 165$.

3. ELEKTROMAGNETISM

3-1. Magnetvoo tihedus. Magnetvoog

Magnetväli on nagu elektriväligi elektromagnetilise välja üks külg, mateeria eksisteerimise vorm. Ta tekib elektrilaengute liikumisel, näiteks vooluga juhtmete ümber. Magnetväljas on salvestatud tema loomisel teatud hulk tööd, mida nimetatakse magnetvälja energiaks. Viimane ilmneb mitmeti, näiteks ühe vooluga juhtme mõjus teisele, mis asetseb esimese magnetväljas, või siis vooluga juhtme magnetvälja mõjus magnetnõelale.

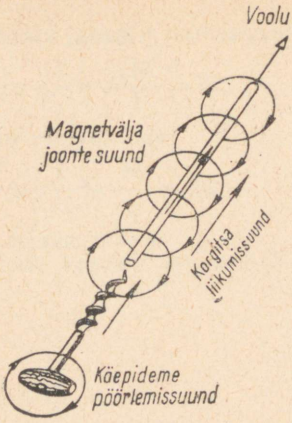
Suunda, mida näitab magnetnõela põhjapoolus magnetvälja jõudude mõjul, loetakse magnetvälja suunaks.

Magnetvälja kujutatakse magnetvälja joonte abil. Nende joonte mistahes punktis on joone puutuja magnetvälja suunaline.

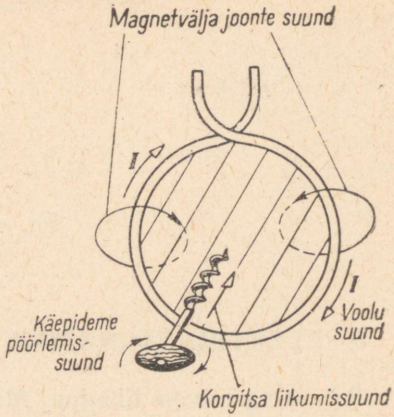
Magnetvälja ja voolu suuna vahelist seost väljendab nn. korgitsa juhis: *kui korgitsa kulgev liikumine toimub voolu suunas* (joon. 3-1), *siis tema käepide pöörleb magnetvälja joonte suunas.* Vahel on parem kasutada seda juhist teisel kujul: *kui korgitsa käepideme pöörlemise suund ühtib voolu suunaga vooluringis* (joon. 3-2), *siis korgitsa kulgev liikumine näitab vooluringiga piiratud pinda läbivate magnetvälja joonte suunda.*

Asetame magnetvälja risti väljajoontega sirge juhtmelõigu pikkusega l, mida läbib vool I (joon. 3-3).

Katse põhjal võime veenduda, et juhtmele mõjub jõud F, mis on suuruselt võrdeline vooluga, juhtmelõigu pikkusega ja magnetvälja intensiivsusega, mille iseloomusta-



Joon. 3-1. Korgitsa juhis.



Joon. 3-2. Korgitsa juhis ringvoolu korral.

vaks suuruseks on magnetvoo tihedus ehk vootihedus B.

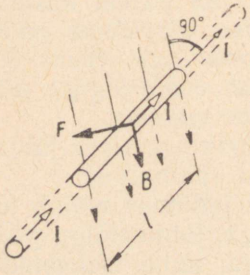
Seega jõud

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

Eeltoodust järeldub, et

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

s. t. vootihedust mõõdetakse vooluga juhtmelõigule mõjuva mehhaanilise jõu ja voolu ning juhtmelõigu pikkuse korrutise suhtega, kusjuures juhe peab asetsema risti magnetvälja suunaga.



Joon. 3-3. Vooluga juhe magnetväljas.

Rahvusvahelises mõõtühikute süsteemis SI mõõdetakse jõudu njuutonites, voolu amprites ja pikkust meetrites; seega magnetvoo tiheduse mõõtühik

$$[B]=\left[\frac{F}{Il}\right]=\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A}\cdot\mathrm{m}}=\frac{\mathrm{J/m}}{\mathrm{A}\cdot\mathrm{m}}=\frac{\mathrm{V}\cdot\mathrm{C}}{\mathrm{A}\cdot\mathrm{m}^2}=$$

$$=\frac{\mathrm{V}\cdot\mathrm{A}\cdot\mathrm{s}}{\mathrm{A}\cdot\mathrm{m}^2}=\frac{\mathrm{V}\cdot\mathrm{s}}{\mathrm{m}^2}.$$

Ühikut voltsekund nimetatakse veebriks (Wb), veebrit ruutmeetrile aga teslaks (T). Seega

$$[B]=\frac{\mathrm{Wb}}{\mathrm{m}^2}=\mathrm{T}.$$

Peale tesla kasutatakse magnetvoo tiheduse ühikuna veel gaussi (G), mis ei kuulu SI süsteemi, kusjuures

$1\ \mathrm{G}=10^{-4}\ \mathrm{T}$ ehk $1\ \mathrm{T}=10^{4}\ \mathrm{G}$.

Magnetvoo tihedus on vektoriaalne suurus. Magnetvoo tiheduse vektori suund langeb ühte magnetvälja suunaga antud punktis.

Magnetvälja, kus magnetvoo tiheduse vektorid on kõigis punktides omavahel rööpsed ja suuruselt võrdsed, nimetatakse homogeenseks ehk ühtlikuks.

Magnetvälja jooni võib kasutada mitte ainult välja suuna, vaid ka tema intensiivsuse iseloomustamiseks. Selleks pannakse tinglikult läbi välja suunaga risti oleva üheruutsentimeetrise pinna teatud hulk magnetjooni. Nende arv on võrdne või võrdeline magnetvoo tihedusega antud välja osas.

Magnetvoo tiheduse B ja tema vektoriga risti oleva pinnatüki pindala S korrutist nimetatakse magnetvooks:

$$\Phi=BS. \tag{3-3}$$

Kuna magnetvoo tihedust mõõdetakse teslades (T) ja pindala ruutmeetrites, siis, pidades silmas, et $1\ \mathrm{T}=\frac{1\ \mathrm{Wb}}{1\ \mathrm{m}^2}$, saame, et magnetvoogu mõõdetakse veebrites:

$$[\Phi]=\mathrm{T}\cdot\mathrm{m}^2=\frac{\mathrm{Wb}}{\mathrm{m}^2}\cdot\mathrm{m}^2=\mathrm{Wb}.$$

Magnetvoo vananenud ühikuks on maksvell:

$1\ \mathrm{Mx}=10^{-8}\ \mathrm{Wb}=1\ \mathrm{G}\cdot\mathrm{cm}^2$.

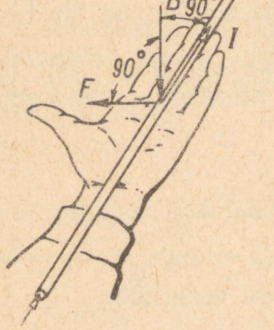
Magnetvoo tihedust iseloomustatakse välja suunaga risti olevat ühikulise (cm^2) pindalaga pinnatükki läbivate magnetvälja joonte arvuga. Järelikult iseloomustab magnetvoogu pinda S läbivate magnetvälja joonte arv.

3-2. Elektromagnetiline jõud

a) Sirgjuhe magnetväljas

Jõudu, millega magnetväli mõjub temasse asetatud vooluga juhtmele, nimetatakse elektromagnetiliseks jõuks.

Nagu eelmises paragrahvis nägime, sõltub elektromagnetiline jõud voolust I, magnetvoo tihedusest B ja aktiivse juhtmeosa pikkusest l, s. o. sellise juhtmeosa pikkusest, mis paikneb magnetväljas. Jõud on suurim siis, kui juhe ja magnetvoo tiheduse vektor on teineteisega risti. Siis on jõud leitav valemi (3-1) abil. Elektromagnetilise jõu suund määratakse vasaku käe juhise järgi: *asetame vasaku käe nii, et magnetvoo tiheduse vektor suundub peopessa ja neli sirutatud sõrme näitavad voolu suunda, siis näitab täisnurga all kõrvale sirutatud pöial elektromagnetilise jõu suunda* (joon. 3-4). Kui juhtme ja magnetvoo



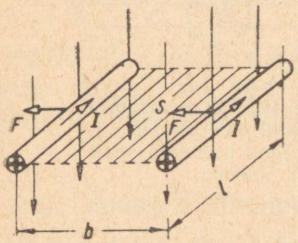
Joon. 3-4. Vasaku käe juhis.

tiheduse vektori B vaheline nurk α ei ole 90°, siis on elektromagnetiline jõud võrdeline $\sin\alpha$-ga. Sel juhul

$$F = BIl \sin\alpha. \qquad (3\text{-}4)$$

Näide 3-1. Homogeenses magnetväljas magnetvoo tihedusega 1,2 T asub juhe, mille aktiivse osa pikkus on 30 cm. Vool juhtmes on 500 A. Leida juhtmele mõjuv elektromagnetiline jõud, kui juhe on risti magnetvoo tiheduse vektoriga.

$F = BIl = 1{,}2 \cdot 500 \cdot 0{,}3 = 180$ N.



Joon. 3-5. Juhtme nihkumine magnetväljas kaugusele *b*.

Kui vooluga sirgjuhe (joon. 3-5) nihkub iseendaga rööbiti elektromagnetilise jõu mõjul algasendist kaugusele *b* ja kui see liikumine toimub homogeenses magnetväljas magnetvälja joontega risti asetsevas tasapinnas, siis teevad need jõud mehhaanilise töö

$$A = Fb = IBlb = IBS = I\Phi; \qquad (3\text{-}5)$$

$S = lb$ on siin juhtme liikumisega kirjeldatud pinna suurus.

Seega on töö, mida elektromagnetiline jõud teeb vooluga juhtme ümberpaigutamisel magnetväljas, võrdne voolu ja juhtmega lõikunud magnetvoo korrutisega.

Näide 3-2. Leida töö, mis tehakse 200-amprise vooluga 40 cm pikkuse juhtme ümberpaigutamisel homogeenses magnetväljas vootihedusega 1,5 T. Juhe liigub magnetjoontega risti asetsevas tasapinnas 25 cm võrra.

Juhe lõikab magnetvoogu

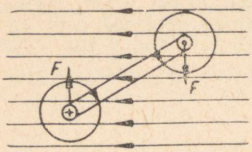
$\Phi = BS = 1{,}5 \cdot 0{,}4 \cdot 0{,}25 = 0{,}15$ Wb.

Juhtme nihutamisel tehtud töö

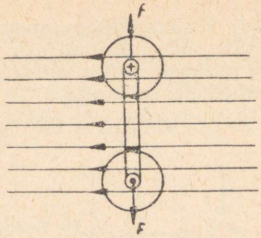
$A = \Phi I = 0{,}15 \cdot 200 = 30$ J.

b) Vooluring magnetväljas

Joonisel 3-6 on näidatud ristkülikukujuline pool (juhe), mida läbib vool. Pooli küljed, mis on risti joonise tasapinnaga, asuvad homogeenses magnetväljas. Neile mõjuvad



Joon. 3-6. Magnetväljas vooluringile mõjuv pöördemoment.



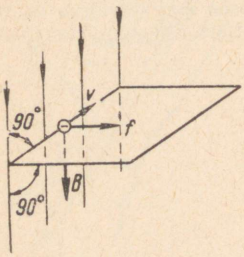
Joon. 3-7. Vooluringile mõjuvad elektromagnetilised jõud püüavad pooli laiali suruda.

sel juhul elektromagnetilised jõud F, mis tekitavad pöördemomendi. Viimase mõjul püüab vooluga pool võtta asendit, milles need jõud on tasakaalus (joon. 3-7). Siis on pooliga piiratud pinda läbiv magnetvoog maksimaalne. Siit järeldub juhis: *magnetvälja asetatud vooluring püüab elektromagnetiliste jõudude mõjul võtta asendit, milles teda läbiv magnetvoog on maksimaalne.*

c) Liikuv elektron magnetväljas

Vool juhtmes on elektronide suunatud liikumine. Juhtmele, mille pikkus on l, mõjub elektromagnetiline jõud (3-1)

$$F = IBl.$$



Joon. 3-8. Liikuvale elektronile mõjuva elektromagnetilise jõu suund.

Kui vabade elektronide arv selles juhtmes tähistada N-ga, siis ühele elektronile mõjuv elektromagnetiline jõud

$$f = \frac{F}{N}.$$

Kui elektronide summaarne laeng $Q = Nq$ ja keskmine kiirus $v = l/t$, siis võime magnetvälja joontega risti liikuvale elektronile mõjuva elektromagnetilise jõu avaldada järgmiselt:

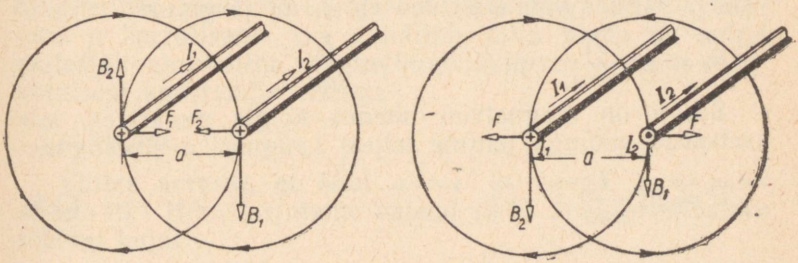
$$f = \frac{F}{N} = \frac{Q}{t} Bl \frac{1}{N} = \frac{Nq}{t} Bl \frac{1}{N} = Bqv. \qquad (3\text{-}6)$$

Selle jõu (joon. 3-8) suund määratakse vasaku käe juhise järgi, kuid siin peavad sõrmed olema sirutatud elektroni liikumisele vastassuunas.

3-3. Vooluga juhtmete vastastikune mõju

Kahte rööpset sirgjuhet, millede vahemaa on a, läbivad voolud I_1 ja I_2 (joon. 3-9).

Iga vooluga juhtme ümber tekib magnetväli. Voolu I_2 magnetväljas asetsevale juhtmele vooluga I_1 mõjub seega elektromagnetiline jõud F_1 ja voolu I_1 magnetväljas asuvale juhtmele, mida läbib vool I_2, mõjub jõud F_2.



Joon. 3-9. Kahe vooluga juhtme vahel mõjuvad elektromagnetilised jõud.

Katseliselt on kindlaks tehtud, et juhtmetele mõjuvad jõud F_1 ja F_2 on kui mõju ja vastumõju alati teineteisega võrdsed, s. o. $F_1 = F_2$.

Samasuunaliste vooludega juhtmed tõmbuvad teineteise poole, vastassuunaliste vooludega juhtmed aga tõukuvad teineteisest eemale. Selles on kerge veenduda, kui kasutame korgitsa ja vasaku käe juhist.

Kui juhtmete rööpsete lõikude pikkus l on tunduvalt suurem nendevahelisest kaugusest a, siis on jõud F võr-

deline voolude korrutisega ja rööpsete juhtmeosade pikkusega ning pöördvõrdeline nendevahelise kaugusega. See jõud sõltub ka keskkonnast, kus juhtmed asuvad. Seega

$$F_1 = F_2 = F = \mu_a \frac{I_1 I_2}{2\pi a} l. \qquad (3\text{-}7)$$

Absoluutne magnetiline läbitavus μ_a on suurus, mis iseloomustab selle keskkonna magnetilisi omadusi, milles magnetväli tekib.

Kui voolud juhtmetes on võrdsed, s. o. $I_1 = I_2 = I$, siis jõud

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

Eriti suured on vooluga juhtmete vahel mõjuvad jõud lühise puhul.

Vastavalt valemile (3-1) ja (3-7) mõjub vooluga juhtmeile jõud

$$F = B_1 I_2 l = B_2 I_1 l = \mu_a \frac{I_1 I_2}{2\pi a} l,$$

magnetvoo tihedus on aga juhtme teljest kaugusel a asuvais punktides vastavalt seosele (3-2) järgmine:

$$B_1 = \mu_a \frac{I_1}{2\pi a} \quad \text{ja} \quad B_2 = \mu_a \frac{I_2}{2\pi a}.$$

Seega on magnetvoo tihedus kõigis punktides, mis asetsevad vooluga juhtme teljest kaugusel a, ühesugune:

$$B = \mu_a \frac{I}{2\pi a}. \qquad (3\text{-}8)$$

3-4. Magnetiline läbitavus

Magnetvälja magnetvoo tihedus sõltub voolust, vooluga juhtme mõõtmetest ja kujust ning selle keskkonna omadustest, milles tekitatakse magnetväli. Võrreldes magnetvoo tihedust vaakuumis ja mitmesugustes keskkondades, kusjuures kõik ülejäänud tingimused on ühesugused, on kindlaks tehtud, et ühtedes keskkondades on magnetväli tugevam, teistes aga nõrgem kui vaakuumis. See seletub keskkondade erinevate magnetiliste omadustega. Nagu eespool öeldud, on keskkonna magnetilisi omadusi iseloomustavaks suuruseks absoluutne magnetiline läbitavus.

Võrrandist (3-8) saame:

$$\mu_a = B\frac{2\pi a}{I}.$$

Kuna magnetvoo tihedust mõõdetakse teslades ($T = V \cdot s/m^2$), kaugust meetrites ja voolu amprites, siis

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

Oomsekundit nimetatakse henriks (H) ja seega on absoluutse magnetilise läbitavuse ühikuks henri meetri kohta.

Katsetest on teada, et õhu ja teiste ainete, välja arvatud ferromagnetilised materjalid, absoluutsed magnetilised läbitavused on lähedased vaakuumi absoluutsele magnetilisele läbitavusele, mida nimetatakse magnetiliseks konstandiks:

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

Materjalide absoluutne magnetiline läbitavus avaldub magnetilise konstandi μ_0 ja suhtelise magnetilise läbitavuse μ korrutisena, kus μ näitab, mitu korda on antud materjali absoluutne magnetiline läbitavus suurem magnetilisest konstandist. Seega

$$\mu_a = \mu\mu_0.$$

Võttes arvesse, et õhul $\mu = 1$ ja seega $\mu_a = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m, kirjutame valemi (3-8) uuel, arvutusteks sobival kujul:

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

kus B on teslades, I amprites ja a meetrites.

Näide 3-3. Leida magnetvoo tihedus 5 cm kaugusel juhtme teljest, mida läbib vool 800 A.

$$B = \frac{2I}{a} \cdot 10^{-7} = \frac{2 \cdot 800}{0{,}05} \cdot 10^{-7} = 32 \cdot 10^{-4} \text{ T}.$$

Näide 3-4. Leida jõud, mis mõjub kummalegi kahest rööpsest juhtmest, kui nende pikkus on 2 m, vahemaa 10 cm ja neid läbib lähisvool $I_1 = I_2 = 10\,000$ A.

$$F = \mu_a\frac{I^2}{2\pi a}l = 4\pi \cdot 10^{-7}\frac{10\,000^2 \cdot 2}{2\pi \cdot 0{,}1} = 400 \text{ N}.$$

3-5. Magnetvälja tugevus. Magneetimisosaergutus

Magnetväljade arvutamisel kasutatakse sageli suurust, mida nimetatakse magnetvälja tugevuseks. Viimane avaldub antud välja punkti magnetvoo tiheduse ja absoluutse magnetilise läbitavuse jagatisena.

Seega magnetvälja tugevus

$$H = \frac{B}{\mu_a} = \frac{B}{\mu\mu_0}. \tag{3-11}$$

Rahvusvahelises mõõtühikute süsteemis mõõdetakse magnetvoo tihedust teslades (1 T = 1 V · s/m²), absoluutset magnetilist läbitavust henrides meetri kohta, magnetvälja tugevust aga amprites meetri kohta:

$$[H] = \frac{\mathrm{T}}{\mathrm{H/m}} = \frac{\mathrm{V \cdot s}}{\mathrm{m^2}} \cdot \frac{\mathrm{m}}{\Omega \cdot \mathrm{s}} = \frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}}.$$

Teine, varem kasutatud magnetvälja tugevuse ühik on örsted (Oe):

$$1\ \mathrm{Oe} \approx 80\ \mathrm{A/m}. \tag{3-12}$$

Magnetvälja tugevus, nagu magnetvoo tihedus, on vektor, mille suund ühtib välja suunaga antud punktis.

Kuna magnetvoo tihedus on võrdeline μ_a-ga ja magnetvälja tugevus on võrdne magnetvoo tiheduse ning μ_a suhtega (3-11), siis ei sõltu magnetvälja tugevus homogeenses keskkonnas magnetilisest läbitavusest, s. t. keskkonna omadustest.

Magnetvälja tugevuse ja magnetvälja joone lõigu pikkuse korrutist nimetatakse magneetimisosaergutuseks:

$$U_M = Hl. \tag{3-13}$$

Magneetimisosaergutust mõõdetakse amprites, sest

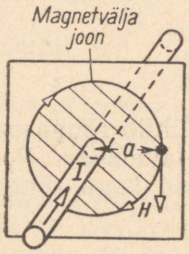
$$[U_M] = \frac{\mathrm{A}}{\mathrm{m}} \cdot \mathrm{m} = \mathrm{A}.$$

Üle kogu suletud magnetvälja joone pikkuse võetud summaarset magneetimisosaergutust nimetatakse magneetimisergutuseks ehk magnetomotoorjõuks ja tema tähis on F_M.

3-6. Koguvoolu seadus

Punktis, mis asetseb vooluga juhtme (joon. 3-10) teljest kaugusel a, avaldub magnetvoo tihedus vastavalt valemile (3-8) järgmiselt:

$$B = \mu_a \frac{I}{2\pi a}.$$



Joon. 3-10. Vooluga juhe, mis läbib oma teljega risti olevat tasapinda.

Jagades selle avaldise mõlemaid pooli absoluutse magnetilise läbitavusega, saame magnetvälja tugevuse (väljatugevuse) kaugusel a vooluga juhtmest:

$$H = \frac{B}{\mu_a} = \frac{I}{2\pi a}, \tag{3-14}$$

millest

$$I = H \cdot 2\pi a = Hl,$$

kus $l = 2\pi a$ on vastava ringjoone ehk vooluga sirgjuhtme ümber oleva väljajoone pikkus.

Magnetvälja tugevuse ja magnetvälja joone pikkuse korrutis on magneetimisergutus, järelikult

$$I = F_M.$$

Kui juhe koosneb mitmest soonest, siis loeme vooluks I kõigi voolude summat ehk soonte koguvoolu, s. t. $I = \sum I'$. Järelikult

$$\sum I' = F_M. \tag{3-15}$$

Eeltoodud valemit tõlgendame nii: magneetimisergutus on võrdne koguvooluga (voolude algebralise summaga), mis läbib antud väljajoonega piiratud pindala.

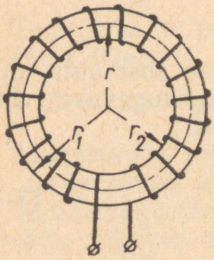
Seda nimetatakse koguvoolu seaduseks. Me vaatlesime teda lihtsaima näite alusel.

Juhul kui väljatugevus on magnetjoone eri lõikudel isesugune, siis

$$F_M = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + \ldots \qquad (3\text{-}16)$$

3-7. Vooluga pooli magnetväli

Võtame ringjoone raadiusega r, mis ühtib rõngaspooli (joon. 3-11) magnetvälja keskmise väljajoonega. Poolil olgu w keerdu, mis on ühtlaselt jaotatud kogu rõngale.



Joon. 3-11. Rõngaspool.

Koguvool, mis läbib keskmise magnetvälja joonega piiratud pindala, $\sum I = Iw$.

Sümmeetrilisuse tõttu on magnetvälja tugevus H kõigis keskmise magnetvälja joone punktides ühesugune. Magneetimisergutus

$$F_M = Hl = H \cdot 2\pi r.$$

Vastavalt koguvoolu seadusele

$$Iw = Hl.$$

Rõngaspooli keskmisel magnetvälja joonel (telgjoonel) magnetvälja tugevus

$$H = \frac{Iw}{l} \qquad (3\text{-}17)$$

ja magnetvoo tihedus

$$B = \mu_a H = \mu_a \frac{Iw}{l}. \tag{3-18}$$

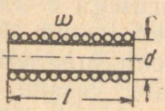
Võttes magnetvoo keskmiseks väärtuseks tema suuruse telgjoonel (mida võime teha, kui $r_1 - r_2 \ll r_1$), saame pooli magnetvoo avaldada kujul

$$\Phi = BS = \mu_a \frac{IwS}{l} \tag{3-19}$$

või kujul

$$\Phi = \frac{Iw}{\frac{l}{\mu_a S}} = \frac{F_M}{R_M}. \tag{3-20}$$

Seos (3-20) sarnaneb Ohmi seadusega elektriahela kohta ja seepärast nimetatakse teda magnetahela Ohmi seaduseks. Magnetvoog Φ on analoogiline vooluga, magneetimisergutus F_M elektromotoorjõuga, magnetahela takistus R_M aga elektriahela takistusega. Magnetahela all tuleb siin mõista magnetjuhet, s. o. südamikku, milles magneetimisergutuse mõjul sulgub magnetvoog.



Joon. 3-12. Silinderpool.

Silinderpooli (joon. 3-12) võib vaadelda lõpmatu suure raadiusega rõngaspooli osana, mille mähis asub vaid südamiku osal, mille pikkus on võrdne silinderpooli pikkusega. Magnetvälja tugevus ja magnetvoo tihedus pooli keskel asuvas telgjoone punktis leitakse nagu rõngaspooligi puhul valemite (3-17) ja (3-18) järgi. Silinderpooli puhul on need valemid ligikaudsed. Neid võib kasutada H ja B leidmiseks vaid sellistes poolides, millede pikkus on tunduvalt suurem läbimõõdust.

Näide 3-5. Leida magnetvoog silinderpoolis, mille pikkus on 40 cm, läbimõõt 5 cm ja keerdude arv $w = 1500$, kui teda läbib vool 4 A. Pooli südamik on mitteferromagnetilisest materjalist ($\mu = 1$).

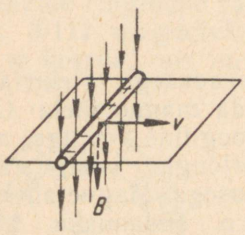
$$\Phi = \mu_0 \frac{IwS}{l} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 4 \cdot 1500 \cdot \pi \cdot 0{,}000625}{0{,}4} = 9{,}2 \cdot 10^{-6} \text{ Wb}.$$

3-8. Elektromagnetiline induktsioon

a) Juhtmes indutseeritav elektromotoorjõud

Igas juhtmes, mis magnetväljas liikudes lõikab väljajooni, indutseeritakse emj., mida on hakatud nimetama elektromagnetilise induktsiooni elektromotoorjõuks. Nähtust ennast nimetatakse elektromagnetiliseks induktsiooniks.

Joonisel 3-13 on kujutatud juhe, mis liigub homogeenses magnetväljas ühtlase kiirusega v, olles ise risti väljajoontega.



Joon. 3-13. Juhtme liikumine magnetväljas.

Juhtme liikumisel paiknevad sama kiirusega v ümber ka juhtme vabad elektronid ja positiivsed ioonid. Järelikult mõjub igale laetud osakesele elektromagnetiline jõud (§ 3-2), mille suunda saab määrata vasaku käe juhise järgi. Elektromagnetilised jõud põhjustavad elektronide liikumise ühte juhtme otsa, mis saab negatiivse laengu. Elektronide vähesuse tõttu omandab teine juhtme ots positiivse laengu. Laengute eraldumine lõpeb siis, kui eraldunud laengute elektrivälja jõud tasakaalustavad elektromagnetilised jõud. Magnetväljas liikuva juhtmelõigu otste potentsiaalide vahe on võrdne elektromagnetilise induktsiooni elektromotoorjõuga.

Vastavalt seosele (1-3) avaldub emj. juhtmes pikkusega l järgmiselt:

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

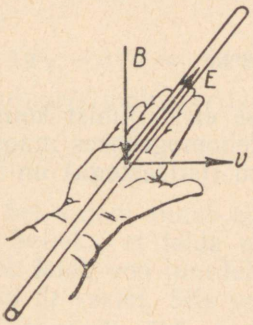
Et elektrivälja tugevus juhtmes

$$\mathcal{E} = \frac{f}{q}$$

ja elektronile mõjuv jõud (3-6) $f = Bvq$,
siis

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

Seega on juhtmes indutseeritav emj. võrdne magnetvoo tiheduse, juhtme pikkuse ja tema liikumiskiiruse korrutisega — seda tingimusel, et juhe liigub suunas, mis on risti väljajoontega ja juhtme endaga.



Joon. 3-14. Parema käe juhis.

Indutseeritava emj. suund määratakse parema käe juhise järgi: *parem käsi tuleb asetada nii, et magnetvälja jooned suunduksid peopessa ja täisnurga all kõrvale sirutatud pöial näitaks juhtme liikumise suunda; neli väljasirutatud sõrme näitavad siis indutseeriva emj. suunda* (joon. 3-14).

Kui määrame indutseeritava emj. suunda juhtmes, mis liigub magnetvoo tiheduse vektoriga nurga α all lõikuvas tasapinnas, siis peame kiiruse asemel võtma tema komponendi, mis on risti magnetvoo tiheduse vektoriga, s. t. $v_n = v \sin \alpha$.

Juhtme liikumisel piki väljajooni ($v \cos \alpha$) elektromagnetilisi jõude (3-4) ei teki.

Seega emj.

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

Kui juhe liigub väljajoontega risti olevas tasapinnas, siis tema nihkumisel Δb võrra aja Δt vältel indutseeritakse temas emj.

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

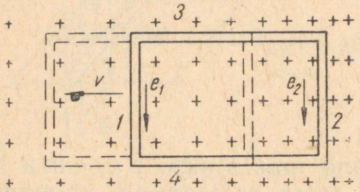
Kuna magnetvoo tiheduse B ja pindala $\Delta S = l\Delta b$ korrutis on võrdne magnetvooga $\Delta\Phi = B\Delta S$, mida juhe liikumisel lõikab, siis juhtmes indutseeritav emj.

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

Seega on juhtmes indutseeritav emj. võrdne kiirusega, millega juhe lõikab magnetvoogu.

b) Elektromotoorjõud juhtmekeerus

Leiame emj., mis indutseeritakse elektrijuhist kontuuris (joon. 3-15), kui see liigub mittehomogeenses magnetväljas, mille väljajooned (tähistatud ristikestega) on risti kontuuri tasapinnaga.



Joon. 3-15. Kontuuri liikumine magnetväljas.

Kui kontuur liigub noolega näidatud suunas, siis tema küljed *3* ja *4* ei lõika magnetjooni ja järelikult neis ei indutseerita elektromotoorjõudu. Külgedes *1* ja *2* indutseeritakse elektromotoorjõud e_1 ja e_2. Nende suunad, mis on leitud parema käe juhise järgi, on näidatud nooltega. Elektromotoorjõudude suurused (3-23) saame valemist

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

kus $\Delta\Phi_1$ ja $\Delta\Phi_2$ on magnetvood, mida aja Δt jooksul lõikavad kontuuri küljed *1* ja *2*. Külg *1* lõikab kontuuri tungivat voogu $\Delta\Phi_1$ ja külg *2* lõikab kontuurist väljuvat voogu $\Delta\Phi_2$. Antud magnetvoo suuna puhul on e_2 suund korgitsa juhise järgi positiivne ja e_1 suund negatiivne. Seega kontuuris indutseeritav emj.

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

Kui tähistame magnetvoo, mis läbib kontuuri enne liikumise algust, Φ_1-ga ja voo, mis läbib teda aja Δt võrra hiljem, Φ_2-ga (teine asend on näidatud punktiiriga), saame:

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

Kontuuri läbiva magnetvoo juurdekasv aja Δt jooksul

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

ehk

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

Kontuuris indutseeritav emj.

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

See valem annab emj. keskmise väärtuse ajavahemikus Δt. Selleks, et leida elektromotoorjõudu suvalisel hetkel, tuleb leida voo juurdekasv $d\Phi$ lõpmatult väikese ajavahemiku dt kestel. Siis saame:

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

Avaldised (3-24) ja (3-25) näitavad, et kontuuris emj. tekkimise vajalikuks tingimuseks on keerdu läbiva magnetvoo muutus.

Kui meil on jadamisi ühendatud w keerust koosneva kontuuriga ehk pooliga tegemist, siis on neis indutseeritav emj. w korda suurem kui ühes keerus indutseeritav emj.:

$$e = -w\frac{d\Phi}{dt}. \qquad (3\text{-}26)$$

Keerdude arvu ja neid läbiva magnetvoo korrutist nimetatakse *aheldusvooks* ja tähistatakse tähega Ψ:

$$\Psi = w\Phi. \qquad (3\text{-}27)$$

Seega emj.

$$e = -w\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d\Psi}{dt}, \qquad (3\text{-}28)$$

s. o. poolis indutseeritav emj. on võrdne aheldusvoo vähenemise kiirusega.

Kui kontuur liigub joonisel 3-15 näidatud suunas, siis

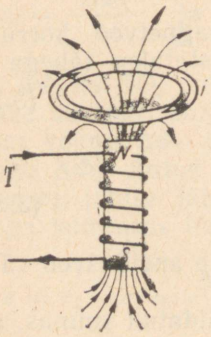
on teda läbiva magnetvoo juurdekasv $\Delta\Phi < 0$, sest $\Delta\Phi_2 > \Delta\Phi_1$. Seega kontuuri läbiv voog väheneb. Järelikult on emj. seose (3-25) kohaselt positiivne ja toimib kellaosuti liikumise suunas. Samuti on positiivne ja samasuunaline temast põhjustatud vool kontuuris. See vool tekitab magnetvoo, mis korgitsa juhise kohaselt on väheneva magnetvooga samasuunaline. Seega tekitab kontuuri läbiva magnetvoo vähenemine sellise suunaga emj. ja voolu, mis püüavad kompenseerida kontuuriga aheldunud voo vähenemist.

Kontuuri liikumisel vastupidises suunas on $\Delta\Phi > 0$. Emj. on vastavalt seosele (3-25) negatiivne ning toimib kellaosuti liikumisele vastupidises suunas. Selle emj. tekitatud vool on elektromotoorjõuga samamärgiline ja samasuunaline. Kontuuri voolu poolt tekitatud magnetvoo suund aga on vastupidine kontuuri kasvava magnetvoo suunale. Seega põhjustab kontuuri läbiva magnetvoo kasvamine emj. ja voolu, mis püüab oma magnetvooga kompenseerida kontuuri läbiva voo kasvu.

Vaadeldust võib teha järelduse: kui emj. tekke põhjuseks on kontuuri läbiva magnetvoo muutus, siis on indutseeritud emj. suunatud nii, et temast tingitud vool takistab kontuuri läbiva magnetvoo muutumist.

Selle seaduspärasuse avastas 1883. aastal vene akadeemik E. H. Lenz ja vastavat seadust nimetatakse L e n z i s e a d u s e k s: *indutseeritava emj. suund on selline, et emj. tekitab voolu, mille mõju on vastupidine emj. tekkimise põhjusele.*

Joonisel 3-16 on kujutatud südamikuga pool, mille kohal asub metallrõngas. Kui suurendada poolis voolu või

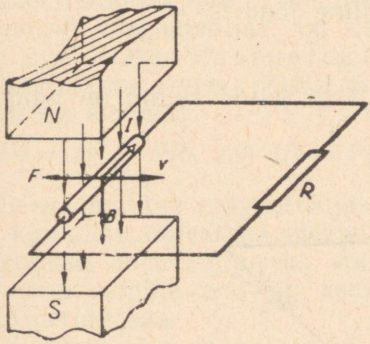


Joon. 3-16. Rõngas indutseeritav vool.

lähendada rõngast poolile, siis kasvab rõngast läbiv magnetvoog. Rõngas indutseeritakse emj. ja teda läbib vool. Lenzi seaduse kohaselt on rõngas kulgeva voolu i poolt tekitatava magnetvoo suund vastupidine silinderpooli magnetvoo suunale. Korgitsa juhist kasutades võib kergesti määrata indutseeritava voolu i suuna.

3-9. Elektrigeneraatori töötamispõhimõte.

Joonisel 3-17 on kujutatud homogeenses magnetväljas asuv juhe, mille otstega on ühendatud takisti R. Kui juhe liigub kiirusvektori v suunas magnetvälja joontega risti olevas tasapinnas, siis indutseeritakse temas emj. E, mille tulemusena tekib suletud vooluringis vool I. Vooluga juhtmele mõjub magnetväljas elektromagnetiline jõud $F = BIl$, mille suund, leitud vasaku käe juhise järgi, on näidatud joonisel 3-17. On ilmne, et elektromagnetiline jõud mõjub juhtme liikumise suunale vastassuunas ja on p i d u r d a v jõud.



Joon. 3-17. Elektrigeneraatori töötamispõhimõte.

Seega on juhtme liikumiseks vajalik nimetatud jõuga võrdne ja talle vastusuunaline välisjõud. Teisiti öeldes: on vaja primaarjõumasinat, mis arendaks mehhaanilist võimsust

$$P_M = Fv$$

ehk

$$P_M = Fv = BIlv = EI = P.$$

Juhtme liikumisel magnetväljas muundatakse primaarjõumasina mehhaaniline võimsus magnetvälja vahendusel suletud vooluringis kulgeva elektrivoolu võimsuseks. Järelikult võime magnetväljas asetsevat juhet vaadelda lihtsaima elektrigeneraatorina, milles toimub mehhaanilise energia muundumine elektriliseks energiaks.

Vastavalt seosele (1-11) generaatori emj.

$$E = U + U_0 = IR + IR_0,$$

millest

$$P_M = EI = I^2R + I^2R_0 = UI + P_0 = P_t + P_0.$$

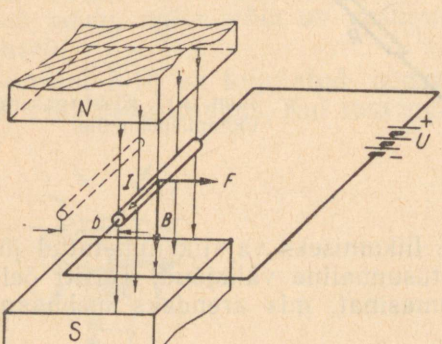
Seega on mehhaaniline võimsus P_M võrdne elektrilise võimsusega P, mis jaguneb tarbija võimsuseks $P_t = I^2R$ ja generaatori võimsuskaoks $P_0 = I^2R_0$.

3-10. Elektrimootori töötamispõhimõte

Homogeensesse magnetvälja asetatud juhtmes kulgeb kõrvalisest toiteallikast antav vool (joon. 3-18). Juhtmele mõjub siis elektromagnetiline jõud

$$F = BIl,$$

mille vasaku käe juhise järgi leitud suund on näidatud joonisel 3-18.



Joon. 3-18. Elektrimootori töötamispõhimõte.

Juhe liigub magnetväljas selle jõu mõjul, tehes mehhaanilist tööd. Kogu liikumise kestel indutseeritakse temas elektromotoorjõud E.

Kui juhe liigub magnetvälja joontega risti olevas tasapinnas teepikkuse b võrra, siis teeb ta mehhaanilise töö

$$A_M = Fb = BIlb.$$

Sama aja t vältel kulub juhtme soojenemiseks energia

$$W_S = I^2R_0t.$$

Toiteallika poolt aja t jooksul kulutatud energia

$$W = UIt = A_M + W_S = BIlb + I^2R_0t. \qquad (3\text{-}29)$$

Jagades viimase võrrandi mõlemaid pooli korrutisega It, saame avaldada toiteallika pinge U:

$$U = Bl\frac{b}{t} + IR_0 = Blv + IR_0 = E + IR_0.$$

Eeltoodust järeldub, et $U - E = IR_0$, millest vool

$$I = \frac{U-E}{R_0}. \qquad (3\text{-}30)$$

Elektromotoorjõud E, mis indutseeritakse juhtmes tema liikumisel magnetväljas, on vastassuunaline voolule ja teda nimetatakse vastuelektromotoorjõuks.

Korrutades pinge avaldist vooluga I, saame toiteallika võimsuse avaldise:

$$UI = EI + I^2R_0 \text{ ehk } UI = P_M + P_0.$$

Seega muutub magnetväljas liikuvasse juhtmesse antav kõrvalise toiteallika elektriline võimsus magnetvälja vahendusel mehhaaniliseks võimsuseks, kusjuures energia muundamine on siin seotud vastuelektromotoorjõu indutseerimisega.

Magnetväljas asuvat juhet, mida toidetakse vooluga kõrvalisest toiteallikast, võib vaadelda kui lihtsaimat elektrimootorit.

Näide 3-6. 0,6 meetri pikkune juhe liigub magnetväljas, mille vootihedus on 1,25 T, risti magnetvälja joontega kiirusega 15 m/s. Juhtme takistus on 0,03 Ω ja tema otstele on rakendatud pinge 12 V. Leida: 1) tarbitav koguvõimsus; 2) juhtme poolt arendatav mehhaaniline võimsus; 3) soojusvõimsus.

Juhtme liikumisel magnetväljas indutseeritakse tema vastuelektromotoorjõud

$$E = Blv = 1{,}25 \cdot 0{,}6 \cdot 15 = 11{,}25 \text{ V}.$$

Vool juhtmes

$$I = \frac{U - E}{R_0} = \frac{12 - 11{,}25}{0{,}03} = 25 \text{ A}.$$

Tarbitav koguvõimsus

$$P = UI = 12 \cdot 25 = 300 \text{ W}.$$

Mehhaaniline võimsus

$$P_M = EI = 11{,}25 \cdot 25 = 281{,}25 \text{ W}.$$

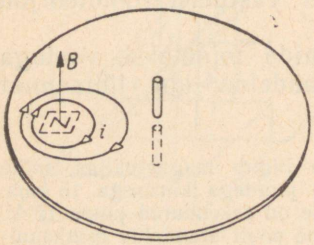
Soojusvõimsus

$$P_S = I^2 R_0 = 25^2 \cdot 0{,}03 = 18{,}75 \text{ W}.$$

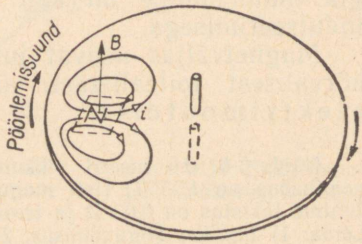
3-11. Pöörisvoolud

Paragrahvis 3-8 vaatlesime voolu teket kinnises kontuuris. Asetame südamikuga pooli kohale rõnga (kontuuri) asemel (joon. 3-16) metallketta. Joonisel 3-19 on kujutatud selline ketas ja ketta alla asetatud elektromagneti pooluse kontuurjoon. Voolu igasugusel muutumisel elektromagneti poolis muutub ketast läbiv magnetvoog. Nii nagu rõngas indutseeritakse ka kettas ring- ehk pööris-vool *i*. Pöörisvoolu suund määratakse nii nagu voolu suund rõngas (§ 3-8).

Joonisel 3-20 on kujutatud samasugune ketas ja tema alla asetatud püsimagneti pooluse kontuurjoon. Ketta pöörlemisel lõikavad magneti pooluse kohal asetsevad ketta osad magnetvälja jooni, mille tulemusena temas indutseeritakse emj. Viimase mõjul tekib pöörisvool *i* (joon. 3-20). Pooluse kohal asetsevas ketta osas indutsee-

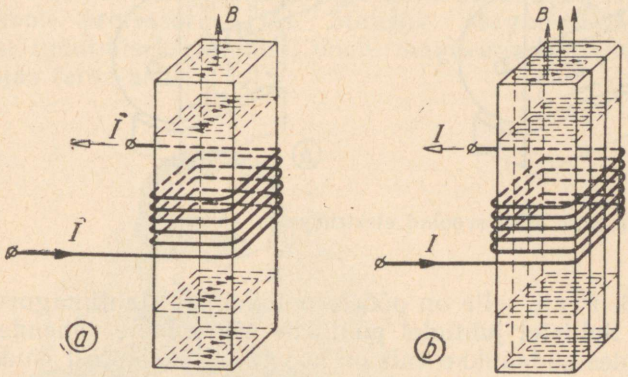


Joon. 3-19. Magnetvoo muutumisest tingitud pöörisvoolud kettas.



Joon. 3-20. Pöörisvoolud pöörlevas kettas konstantse magnetvoo korral.

ritava emj. ja temaga samasuunalise ning samas kohas tekkiva pöörisvoolu suund määratakse parema käe juhise järgi.



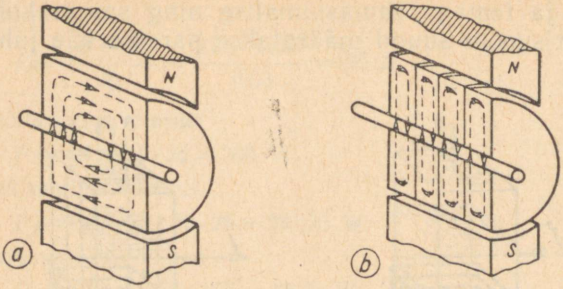
Joon. 3-21. Pöörisvoolud terassüdamikus.

Kuidas ka juhtivat keha või tema osa, mingit elektrimasina, aparaadi või seadme detaili läbiv magnetvoog ei muutuks — alati indutseeritakse selles emj., mille tulemusena tekivad pöörisvoolud (joon. 3-21, *a* ja 3-22, *a*). Pöörisvoolud, mis on indutseeritud voolude erijuhuks, alluvad üldistele voolude kohta käivatele juhistele ja seadustele.

Pöörisvoolud kuumendavad materjali, milles nad kulgevad, ja tekivad magnetvood, mis Lenzi seaduse kohaselt toimivad vastupidiselt pöörisvoole põhjustavale magnetvoole.

Loomulikult toimub pöörisvooludest põhjustatud kuumenemine elektrienergia soojusenergiaks muundumise tõttu. Seega on pöörisvoolud seotud energiakaoga, mida on hakatud nimetama p ö ö r i s v o o l u k a o k s.

Mõningatel juhtudel kasutatakse pöörisvoole mitmesugustes soojendus- ja pidurdusseadmetes (joon. 3-20) või siis pöördemomentide tekitamiseks (joon. 3-19) mitmesugustes automaatikaseadmetes ja mõõteriistades. Enamasti on pöörisvoolude tekkimine aga ebasoovitav, sest pöörisvoolukao tõttu vähenevad masinate ja mehhanismide kasu-



Joon. 3-22. Pöörisvoolud elektrimasina ankrus.

tegurid. Peale selle on pöörisvooludel veel lahtimagneetiv toime. Sellistel juhtudel püütakse pöörisvoole vähendada, kasutades südamikke, mis on koostatud üksikutest õhukestest (0,1 . . . 0,5 mm) üksteisest isoleeritud teraslehtidest (joon. 3-21, *b* ja 3-22, *b*). Kasutatakse ka suurema elektrilise eritakistusega teraseid, mis sisaldavad 0,5 . . . 4% räni. Terases esinevat pöörisvooludest tingitud võimsuskadu väljendatakse tavaliselt vattides kilogrammi kohta. See sõltub terase sordist, magnetvoo tiheduse maksimaalväärtusest (B_m), magnetvoo muutumise tsüklite arvust sekundis (f) ja teraspleki paksusest.

3-12. Ferromagnetiliste materjalide magneetimine

Suure magnetilise läbitavusega materjale, nagu terast, rauda, malmi, koobaltit ning rida sulameid, näiteks nikli ja alumiiniumi sulamit, nimetatakse ferromagnetilisteks materjalideks. Kui viime ferromagnetilisest materjalist südamiku magnetvälja, näiteks vooluga pooli magnetvälja, siis kasvab magnetvoo tihedus sadu või tuhandeid kordi. Ferromagnetiliste materjalide magnetilised omadused seletuvad sellega, et need materjalid koosnevad suvaliselt magneetunud mikroskoopilistest piirkondadest, mida lihtsuse mõttes võime vaadelda kui elementaarseid magnetikesi. Välise välja mõjul, näiteks vooluga pooli magnetvälja mõjul, pöörduvad need magnetikesed välja suunas, põhjustades nii magnetvoo tiheduse suurenemise. Magnetahelas, mis koosneb peamiselt ferromag-

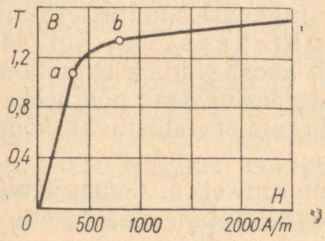
netilistest osadest, võib saada suhteliselt väikese magneetimisergutusega küllaltki suurt vootihedust.

Esimesena uuris terase magnetiliste omaduste muutumist sõltuvalt magnetvälja tugevusest 1872. aastal Moskva ülikooli professor A. G. Stoletov. Magnetvälja tugevuse muutmiseks muudeti voolu magneetimispoolis, mille väljas teras asus.



A. G. Stoletov (1839—1896).

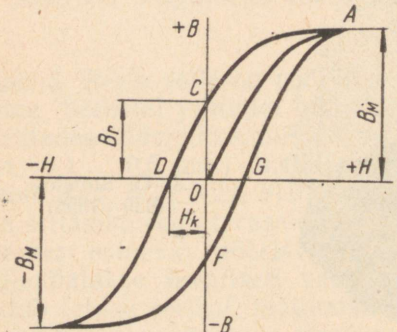
A. G. Stoletov leidis sõltuvuse magnetvoo tiheduse ja magnetvälja tugevuse vahel, s. o. $B = f(H)$, mida väljendab algmagneetimiskõver (joon. 3-23). Kõvera võime jagada kolmeks osaks: 1) sirgjooneline osa *Oa*, mis näitab, et vootihedus kasvab kiiresti ja peaaegu võrdeliselt väljatugevusega; 2) osa *ab* — kõvera põlv, mis iseloomustab vootiheduse kasvu aeglustumist; 3) magnetilisele



Joon. 3-23. Terase algmagneetimiskõver.

küllastumisele vastav osa, mis asetseb kõrgemal punktist *b* ja kus sõltuvus *B* ja *H* vahel on jälle lineaarne, kuid vootiheduse kasv on palju aeglasem kui esimeses osas. Viimasele kõvera osale vastab olukord, kus peaaegu kõik elementaarsed magnetikesed on orienteeritud välja suunas. Vaadeldud mittelineaarne sõltuvus viitab sellele, et ferromagnetiliste materjalide absoluutne magnetiline läbitavus $\mu_a = B/H$ ei ole konstantne ja sõltub magnetvälja tugevusest, järelikult ka magneetimispooli voolust.

Vaatleme ferromagnetiliste materjalide ümbermagneetimist nende töötamisel vahelduvvooluahelais.



Joon. 3-24. Hüstereesisilmus.

Magneetimisvoolu ja seega ka magnetvälja tugevuse *H* suurenemisel saavutab vootihedus maksimaalse väärtuse $+B_m$ (joon. 3-24). Seejärel väheneb väljatugevuse vähenemisel ka vootihedus, kuid tema väärtused on ühe ja sama väljatugevuse juures suuremad kui väljatugevuse suurenemise korral (kõvera osa *AC*). Kui magnetvälja tugevus on null, siis on magnetvoo tiheduse väärtuseks B_r, mida nimetatakse jääkvootiheduseks (lõik *OC*).

Magnetvoo tiheduse hilinemist ehk muutuse mahajäämust vastavatest magnetvälja tugevuse muutustest nimetatakse magnetiliseks hüstereesiks. Kui käsitleme ferromagnetilist materjali koosnevana elementaarsetest magnetikestest, võime hüstereesinähtuse põhjuseks lugeda nende magnetikeste pöördumist takistavat hõõrdejõudu.

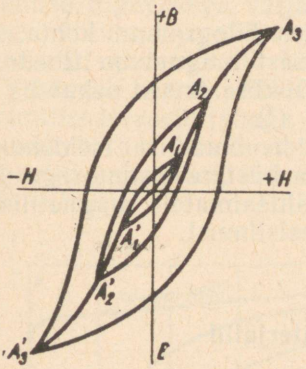
Magneetimisvoolu suuna muutmisel, s. t. magnetvälja tugevuse suuna muutmisel, jõuab viimane väärtuseni H_k,

mida nimetatakse koertsitiivjõuks (lõik *OD*), mille juures vootihedus $B = 0$.

Sellise suunaga voolu suurendamisel saavutab vootihedus väärtuse $-B_m$.

Edaspidisel voolu vähendamisel nullini saame jääkvootiheduse (lõik *OF*). Muutes uuesti voolu ja magnetvälja tugevuse suunda ning suurendades neid, saame jälle maksimaalse magnetvoo tiheduse $+B_m$.

Seega oleme jälginud magnetvälja tugevust ja magnetvoo tihedust nende muutumise ühe tsükli vältel. Ferromagnetilise materjali perioodilisel ümbermagneetimisel



Joon. 3-25. Terase kolm hüstereesisilmust ja põhimagneetimiskõver.

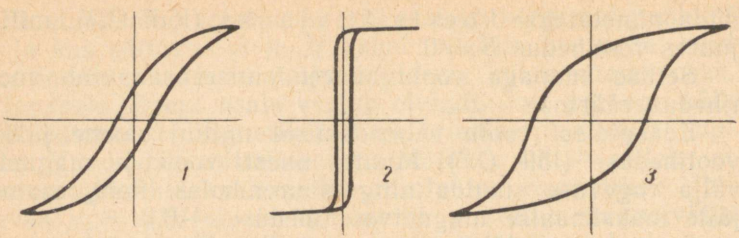
esinevat sõltuvust $B = f(H)$ kujutab graafiliselt kinnine kõverjoon *ACDEFGA*, mida nimetatakse sümmeetriliseks hüstereesisilmuseks. Suurimat silmust, mida võib saada antud materjali puhul, nimetatakse piirsilmuseks.

Kui leida antud ferromagnetilisele materjalile mitu sümmeetrilist hüstereesisilmust erinevate B_m-dega (joon. 3-25) ja ühendada silmuste tipud, saame kõvera, mida nimetatakse põhimagneetimiskõveraks ja mis on väga lähedane algmagneetimiskõverale.

Terase ümbermagneetimine on seotud energiakaoga, mis eraldub soojusena ja põhjustab terase kuumenemist.

Hüstereesisilmuse pindala on võrdeline energiaga, mis kulub ühe ümbermagneetimise tsükli vältel. Ümbermagneetimisest tingitud energiakadu nimetatakse hüstereesikaoks.

Võimsuskadu perioodilisel ümbermagneetimisel, mida



Joon. 3-26.
1 — pehme magnetmaterjal, elektrotehniline teras; *2* — pehme magnetmaterjal, permalloi; *3* — kõva magnetmaterjal.

väljendatakse tavaliselt vattides kilogrammi kohta, sõltub terase sordist, maksimaalsest magnetvoo tihedusest ja terase ümbermagneetimise tsüklite arvust sekundis ehk magneetimisvoolu sagedusest * (*f*).

Ferromagnetiliste materjalide omadusi iseloomustatakse põhimagneetimiskõvera ja hüstereesisilmusega. Joonisel 3-26 on näidatud kolm tähtsaimatele magnetilistele materjalidele tüüpilist hüstereesisilmust.

3-13. Ferromagnetilised materjalid

Ferromagnetilised materjalid jagunevad kahte rühma: pehmed ja kõvad magnetmaterjalid.

Pehmeid magnetmaterjale kasutatakse magnetahelates muutumatute ja vahelduvate magnetvoogude juhtimiseks. Neil on väike koertsitiivjõud (alla 400 A/m), suur magnetiline läbitavus ja väikesed kaod. Sellesse materjalide rühma kuuluvad tehniline raud ja väikese süsinikusisaldusega terased, elektrotehnilised lehtterased, suure magnetilise läbitavusega raudnikkelsulamid (permalloi) ning ferriidid ja oksiferid.

Tehnilist rauda, mille süsinikusisaldus ulatub 0,04 %-ni, süsinikteraseid ja malmi kasutatakse laialdaselt muutumatutes magnetväljades töötavates magnetjuhtmetes. Tehnilisel raual on suur küllastusvoo tihedus — kuni 2,2 T, suur magnetiline läbitavus ja väike koertsitiivjõud.

---

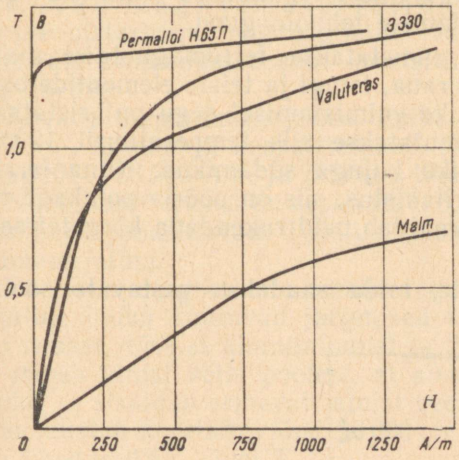
* Sagedus, vt. § 5-1.

Elektrotehnilised terased — need on terase ja räni (1...4%) sulamid. Ränisisalduse muutmisega ja mitmesuguste tehnoloogiliste võtete kasutamisega saadakse väga erinevate elektromagnetiliste omadustega teraseid.

Väikese ränisisaldusega terastel on väike magnetiline läbitavus, suur küllastusvoo tihedus ning suured erikaod. Neid kasutatakse alalisvoolu ja madalsagedusliku vahelduvvoolu puhul.

Suure ränisisaldusega teraseid kasutatakse juhul, kui on vaja saada suurt magnetilist läbitavust nõrkade ja keskmise tugevusega väljade puhul ning vähendada hüstereesinähtusest ja pöörisvooludest tingitud kadusid. Seega võivad nad töötada kõrgematel sagedustel.

Vastavalt standardile ГОСТ 802-58 tähistatakse elektrotehnilisi teraseid tähega Э ja numbritega. Esimene number näitab räni sisaldust protsentides, teine iseloomustab magnetilisi omadusi, kolmas — 0 näitab, et teras on külmalt valtsitud.



Joon. 3-27. Mõnede ferromagnetiliste materjalide magneetimiskõverad.

Mõnede ferromagnetiliste materjalide magneetimiskõverad on antud joonisel 3-27.

Permalloi kujutab endast raua ja nikli sulamit, mille vahekord võib olla mitmesugune. Mõned permalloi liigid sisaldavad veel molübdeeni, kroomi, koobaltit. Neil

sulameil on suur magnetiline läbitavus, 10...50 korda suurem kui elektrotehnilisel lehtterasel. Nendel sulamitel saabub küllastusvoo tihedus väikese, mõnekümnest kuni mõnesaja amprini meetri kohta ulatuva magnetvälja tugevuse korral.

Ühtedel neist on väike küllastusvoo tihedus suurusjärgus 0,6...0,8 T, teistel suhteliselt suur 1,3...1,6 T.

Esimesse rühma kuuluvad näiteks MO — permalloi, mis sisaldab 4...5% molübdeeni, ja kroompermalloi. Teise rühma kuuluvad näiteks permalloi 50, mis sisaldab 50% niklit; permalloi 65 П ja MO — perminvar П, mis sisaldab rauda, niklit ja koobaltit.

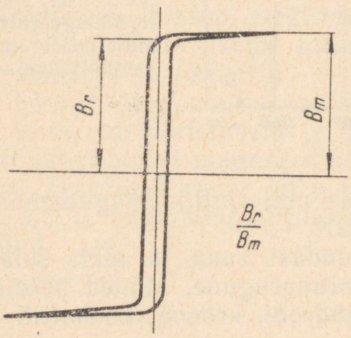
Täht П tähistab ristkülikulist hüstereesisilmust (joon. 3-28). Silmuse ristkülikulisuse astet iseloomustatakse antud silmusele vastava jääkvoo tiheduse B_r ja maksimaalse vootiheduse B_m suhtega. See suhe ulatub 0,95... 0,99-ni.

Permalloide koertsitiivjõud kõigub ühest kuni kahekümne amprini meetri kohta.

Permalloide magnetilised omadused sõltuvad väga palju nende valmistamise tehnoloogiast.

Ferriitideks nimetatakse ferromagnetilisi materjale, mida saadakse raua, tsingi ja teiste elementide oksiidide segust. Südamike valmistamisel segu pulbristatakse, pressitakse ja kuumutatakse siis temperatuuril 1200 °C. Nii saadakse vajaliku kujuga südamikud. Kuna ferriitidel on väga suur eritakistus, siis on pöörisvoolukaod neis üliväikesed. See võimaldab neid rakendada kõrgetel sagedustel.

Nikkeltsinkferriite, mida saadakse vastavate soolade



Joon. 3-28. Täisnurkne hüstereesisilmus.

termilisel lagundamisel, nimetatakse oksiferideks. Nende magnetilised omadused erinevad vähe ferriitide omadest. Nii nagu ferriite on ka oksifere mitmesuguste magnetiliste omadustega. Neil on väike küllastusvoo tihedus (0,18 ... 0,32 T), väike koertsitiivjõud (8 ... 80 A/m) ja põhimagneetimiskõvera algosas küllaltki suur magnetiline läbitavus.

Magnetodielektrikud on materjalid, mida saadakse peeneteralise ferromagnetilise pulbri ja dielektriku (polüvinüülkloriid, polüetüleen) segust. Segu vormitakse, pressitakse ja kuumutatakse.

Ferriite kasutatakse nagu teisigi magnetodielektrikuid laialdaselt südamikena mitmesugustes sideliinide ja raadioside aparatuuri transformaatorites, magnetvõimendites, arvutusmasinais ja ka teistes tehnika harudes.

Ristkülikulise hüstereesisilmusega ferriitidest rõngassüdamikud on leidnud väga laialdast kasutamist, sest neil on hinnatav omadus magneetuda vooluimpulsi mõjul küllastumiseni ja säilitada pika aja vältel pärast impulssi jääkvoo tihedus, mis erineb vähe küllastusvoo tihedusest.

Kõvad magnetmaterjalid on mõeldud mitmesuguse otstarbega püsimagnetite valmistamiseks. Neid materjale iseloomustab suur koertsitiivjõud ja suur jääkvoo tihedus.

Kõvade magnetmaterjalide hulka kuuluvad süsinik-, volfram-, kroom- ja koobaltterased. Nende koertsitiivjõud on 5 000 ... 13 500 A/m ja jääkvoo tihedus 0,7 ... 1 T.

Nimetatud terased on sepistatavad, valtsitavad ja mehhaaniliselt töödeldavad. Tööstus laseb neid välja latt- ja lehtmaterjalina.

Parimate magnetiliste omadustega kõvade magnetmaterjalide hulka kuuluvad järgmised sulamid: alni — sulam rauast, 15%-st alumiiniumist ja 25%-st niklist; alnisi — erineb alnist selle poolest, et sisaldab veel 1% räni; alniko — sisaldab erinevalt alnist veel 7% koobaltit. Neid iseloomustab koertsitiivjõud 20 000 ... 60 000 A/m ja jääkvoo tihedus 0,4 ... 1,25 T.

Nimetatud sulameist magneteid valmistatakse valamise teel, mille järel neid ainult lihvitakse.

Metallkeraamilisi magneteid saadakse alni ja alniko pulbritest pressimise ja kuumutamise teel. Peamiseks väärtuseks on siin see, et nii võib saada väikeste mõõtmetega magneteid.

3-14. Magnetahela arvutus

Magnetahel koosneb magneetimisergutuse allikast (vooluga pool) ja magnetjuhtmest. Viimane koostatakse peaaegu täielikult ferromagnetilistest materjalidest. Eesmärgiks on magnetilise takistuse (3-20) viimine miinimumini ja magnetvoo suunamine. Nii saame vajaliku suuruse ja konfiguratsiooniga magnetvoo väikseima magneetimisergutusega.

Lihtsaimat magnetahelat, pooli rõngakujulise magnetjuhiga, käsitlesime paragrahvis 3-7.

Praktikas kasutatakse väga erineva kujuga magnetahelaid. Need võivad olla lihtsad ehk mittehargnevad ja hargnevad. Magnetjuhtme osad võivad olla ühest ja samast või ka erinevatest materjalidest.

Magnetahela arvutuse eesmärgiks on enamasti antud magnetjuhtme jaoks sellise magneetimisergutuse F leidmine, mis on vajalik nõutava magnetvoo Φ saamiseks. Selleks jagatakse magnetjuhe kogu pikkuses osadeks l_1, l_2 jne. ristlõigetega S_1 S_2 jne., milledest igaüks koosneb vaid ühest materjalist. Iga osa jaoks arvutatakse magneetimisosaergutus ja, summeerides need üle kogu magnetjuhtme (magnetvoo keskmise teepikkuse), saadakse otsitav magneetimisergutus.

Näiteks esimese ferromagnetilisest materjalist osa magneetimisergutus

$$U_{M1} = H_1 \cdot l_1,$$

kus l_1 leitakse jooniselt (vt. näidet 3-7), H_2 aga magneetimiskõveratelt (joon. 3-27). Selleks leitakse eelnevalt

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

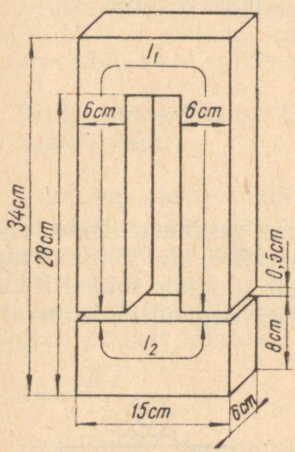
Väljatugevus õhus ja mitteferromagnetilises materjalis

$$H_0 = \frac{B_0}{\mu_0} \approx 0{,}8 \cdot 10^6 B_0, \qquad (3\text{-}31)$$

kus H_0 saame amprites meetri kohta, kui B_0 on antud teslades, või siis $H_0 = 0{,}8\ B_0$, kui H_0 on antud amprites sentimeetri kohta ja B_0 gaussides.

Näide 3-7. Leida keerdude arv mähisele, mis on vaja paigutada südamikule (joon. 3-29), kui vajalik magnetvoog on $470 \cdot 10^{-5}$ Wb ja vool mähises 10 A. Südamiku ülemine osa on valmistatud elektrotehnilisest terasest, alumine aga valuterasest.

Jagame magnetahela kolmeks osaks: esimene osa — elektrotehnilisest terasest, pikkusega $l_1 = 56$ cm ja ristlõikega $S_1 = 36$ cm²; teine — valuterasest, pikkusega $l_2 = 17$ cm ja ristlõikega $S_2 = 48$ cm²; kolmas — õhupilu, laiusega $l_0 = 2 \cdot 0{,}5 = 1$ cm pindalaga $S_0 = 36$ cm².



Joon. 3-29. Näite 3-7 juurde.

Magnetvoo tihedus esimeses osas

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1} = \frac{470 \cdot 10^{-5}}{36 \cdot 10^{-4}} = 1{,}3 \text{ T}.$$

Elektrotehnilise terase magneetimiskõveral (Э 330, joon. 3-27) vastab magnetvoo tihedusele 1,3 T väljatugevus 750 A/m.

Esimese osa magneetimisergutus

$$U_{M1} = H_1 l_1 = 750 \cdot 0{,}56 = 420 \text{ A}.$$

Analoogiliselt magnetvoo tihedus teises osas

$$B_2 = \frac{\Phi}{S_2} = \frac{470 \cdot 10^{-5}}{48 \cdot 10^{-4}} = 0{,}98 \text{ T}$$

ja magnetvälja tugevus teises osas (joon. 3-27)

$$H_2 = 400 \text{ A/m}.$$

Teise osa magneetimisergutus

$$U_{M2} = H\ l_2 = 400 \cdot 0{,}17 = 68 \text{ A}.$$

Kolmandas osas — õhupilus

$$B_0 = \frac{\Phi}{S_0} = \frac{470 \cdot 10^{-5}}{36 \cdot 10^{-4}} = 1{,}3 \text{ T}.$$

Väljatugevus

$$H_0 = 0{,}8 \cdot 10^6 B_0 = 0{,}8 \cdot 10^6 \cdot 1{,}3 = 1{,}04 \cdot 10^6 \text{ A/m}.$$

Magneetimisosaergutus

$U_{M0} = H_0 l_0 = 1{,}04 \cdot 10^6 \cdot 0{,}01 = 10400$ A.

Magneetimisergutus

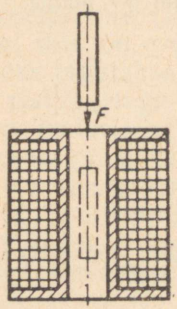
$F = U_{M1} + U_{M2} + U_{M0} = 420 + 68 + 10\,400 = 10\,888$ A.

Mähise keerdude arv

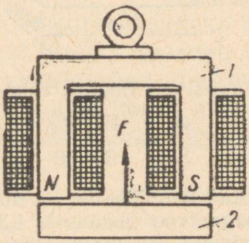
$$w = \frac{F}{I} = \frac{10\,888}{10} = 1089 \text{ keerdu.}$$

3-15. Elektromagnetid

Kui vooluga pooli lähedale tema geomeetrilisele teljele paigutada terasest südamik (joon. 3-30), siis viimane magneetub ja püüab elektromagnetiliste jõudude toimel liikuda pooli keskele, millisel juhul magnetvoog on maksimaalne.



Joon. 3-30. Terassüdamikuga pool.



Joon. 3-31. Elektromagnet.

Elektromagnetiks nimetatakse seadist, mis koosneb magnetjuhtmest ja magneetivast poolist (joon. 3-31). Ankrut *2*, magnetjuhtme liikuvat osa, tõmmatakse põhilise osa, südamiku *1* poole jõuga

$$F = 4B^2S \cdot 10^5, \qquad (3\text{-}32)$$

kus F on jõud njuutonites,

B — magnetvoo tihedus teslades,

S — pooluste ristlõige ruutmeetrites.

Kui magnetjuhe töötab magneetimiskõvera osas, mis ei vasta küllastusele, siis saab elektromagneti jõudu reguleerida magneetiva voolu muutmisega.

Elektromagneteid kasutatakse tehnikas laialdaselt terasdetailide kinnitamiseks, pidurdusseadmetes, automaatides, releedes jne.

Näide 3-8. Leida elektromagneti tõmbejõud, kui magnetvoo tihedus on 1,2 T ja pooluste ristlõige 1000 cm^2.

$F = 4B^2S \cdot 10^5 = 4 \cdot 1{,}2^2 \cdot 0{,}1 \cdot 10^5 = 57\,600$ N.

3-16. Induktiivsus. Endainduktsiooni elektromotoorjõud

Vooluga elektriahela mistahes kontuuri, näiteks iga pooli keerdu, läbib tema oma magnetvoog, millede algebralist summat nimetatakse pooli puhul viimase *endainduktsiooni aheldusvooks* Ψ_L. Suurus, mis on võrdne endainduktsiooni aheldusvoo ja voolu suhtega, kujutab endast kontuuri või pooli *induktiivsust*

$$L = \frac{\Psi_L}{I}. \tag{3-33}$$

Keskkonna muutumatu magnetilise läbitavuse korral on magnetvood ja endainduktsiooni aheldusvoog võrdelised vooluga. Järelikult on pooli induktiivsus konstantne.

Induktiivsus sõltub pooli (kontuuri) kujust, mõõtmetest, keerdude arvust ja keskkonna (pooli südamiku) magnetilisest läbitavusest.

Induktiivsuse mõõtühik

$$[L] = \left[\frac{\Psi_L}{I}\right] = \frac{\text{Wb}}{\text{A}} = \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}} = \Omega \cdot s = \text{H}.$$

Oomsekundit nimetatakse *henriks*. Kuna viimane on väga suur ühik, siis kasutatakse sageli palju väiksemaid: millihenri $= 1 \cdot 10^{-3}$ H ja mikrohenri $= 1 \cdot 10^{-6}$ H.

Rõngaspooli magnetvoog (3-19)

$$\Phi = BS = \mu_a \frac{Iw}{l} S$$

ja tema aheldusvoog (3-27)

$$\Psi_L = w\Phi = \mu_a \frac{Iw^2}{l} S.$$

Seega rõngaspooli induktiivsus

$$L = \frac{\Psi_L}{I} = \mu_a \frac{w^2 S}{l}. \tag{3-34}$$

Näide 3-9. Leida pika südamikuta pooli induktiivsus. Pooli pikkus on 25 cm, läbimõõt 5 cm, keerdude arv 1000.

Pooli induktiivsus

$$L = \mu_0 \frac{w^2 S}{l} = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{10^6 \cdot \pi \cdot 5^2 \cdot 10^{-4}}{0{,}25 \cdot 4} = 39{,}2 \cdot 10^{-5} \text{ H}.$$

Igasugune voolu muutus kontuuris, näiteks kui muudame koormust, katkestame või suleme elektriahela, tekitab endainduktsiooni aheldusvoo muutumise. Sellest tingituna indutseeritakse aga emj. Emj. tekkimise nähtust kontuuris temas kulgeva voolu muutumise tulemusena nimetatakse *endainduktsiooniks*, indutseeritud elektromotoorjõudu aga *endainduktsiooni elektromotoorjõuks*.

Endainduktsiooni emj. määrame nagu iga teisegi indutseeritud emj. valemist (3-28):

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

või, arvestades seda, et

$$\Psi_L = LI,$$

valemist

$$e_L = -L\frac{di}{dt}. \qquad (3\text{-}35)$$

Siit järeldub, et endainduktsiooni emj. on võrdeline induktiivsusega L ja voolu muutumise kiirusega kontuuris.

Endainduktsiooni emj. suund määratakse Lenzi seaduse põhjal: kui vool vooluringis väheneb ($\frac{di}{dt} < 0$), siis on emj. positiivne ja vooluga samasuunaline, voolu suurenemisel ($\frac{di}{dt} > 0$) on emj. aga negatiivne ja voolule vastassuunaline.

Näide 3-10. Leida endainduktsiooni emj., kui vool poolis, mille induktiivsus on $4 \cdot 10^{-6}$ H, väheneb kiirusega 800 A/s.

Kuna

$$\frac{di}{dt} = -800 \text{ A/s},$$

siis endainduktsiooni emj.

$$e_L = -L\frac{di}{dt} = 4 \cdot 10^{-6} \cdot 800 = 3{,}2 \cdot 10^{-3} \text{ V} = 3{,}2 \text{ mV}.$$

3-17. Magnetvälja energia

Kui vool i vooluringis, mille takistus on R ja induktiivsus L, suureneb võrdeliselt ajaga t, siis

$$i = kt,$$

kus k on võrdetegur.

Seejuures indutseeritakse kogu voolu kasvamise ajal konstantne emj.

$$e = -L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = -Lk,$$

sest

$$\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = k.$$

Tähistades vooluringi klemmipinge U-ga, võime vastavalt Kirchhoffi teisele seadusele kirjutada:

$$U + e_L = iR,$$

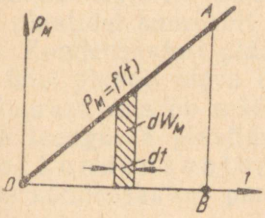
millest vooluringi klemmipinge

$$U = iR - e_L = iR + Lk. \tag{3-36}$$

Korrutades viimase võrrandi mõlemaid pooli i-ga, saame:

$$Ui = i^2R + Lki = i^2R + Lk^2t = P_S + P_M. \tag{3-37}$$

Selle võrrandi vasak pool väljendab võimsust, mida vooluring saab toiteallikalt. Parema poole esimene liidetav $P_S = i^2R$ väljendab soojusvõimsust, mis iseloomustab elektrienergia soojusenergiaks muundumise kiirust, teine liidetav $P_M = Lk^2t = \Psi i/t$ aga võimsust, mis iseloomustab elektrienergia magnetvälja energiaks muundumise kiirust.



Joon. 3-32. Ajast sõltuva võimsuse graafik.

Sõltuvust $P_M = f(t)$ esitav graafik on koordinaatide alguspunkti läbiv sirge (joon. 3-32).

Aja dt vältel saab vooluringi magnetväli energia

$$dW_M = P_M dt,$$

mis on kujutatud joonisel 3-32 viirutatud pindalana. Selliste pindalade summa kujutab magnetvälja salvestatavat energiat, mis kulub voolu muutumiseks nullist i-ni aja t vältel ja on võrdne kolmnurga OAB pindalaga. Seega magnetvälja salvestatav energia

$$W_M = \frac{1}{2} P_M t = \frac{L}{2} (kt)^2 = \frac{Li^2}{2}. \qquad (3\text{-}38)$$

Kui rakendada induktiivsust ja takistust omava elektriahela klemmidele alalispinge, siis ei teki temas kohe maksimaalne vool. Vool kasvab sujuvalt nullist oma lõppväärtuseni $I = U/R$. Samaaegselt voolu kasvamisega tekib elektriahelat ümbritsevas ruumis magnetväli, millesse salvestub toiteallika arvel energia $^1/_2 Li^2$. Muutuv magnetväli aga indutseerib elektriahelas endainduktsiooni emj., mis on nagu voolu reguleerijaks.

Endainduktsiooni nähtust võib võrrelda keha inertsiga. Kui mingi keha hakkab liikuma, siis ei saavuta ta lõppkiirust silmapilkselt. Kiirus kasvab järk-järgult alates nullist, kusjuures kiiruse kasv on seotud energia kuluga, mis läheb inertsi ületamiseks.

Elektriahela katkestamisel ei kao vool silmapilkselt, vaid väheneb sujuvalt, sest nõrgenev magnetväli indutseerib endainduktsiooni emj., mille suund ühtib voolu omaga. Vool püsib elektriahelas viimase sulgemisel tekkinud magnetvälja salvestunud energia arvel.

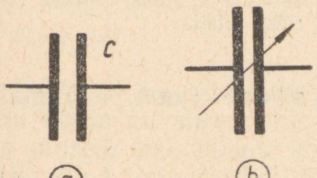
4. KONDENSAATORID. ELEKTRIISOLATSIOON

4-1. Elektrimahtuvus. Kondensaatorid

Kaks suvalise kujuga juhti, mis on teineteisest dielektrikuga eraldatud, moodustavad elektrikondensaatori. Juhtivast materjalist osi nimetatakse kondensaatori elektroodideks ehk plaatideks.

Näiteks moodustavad kondensaatori kaks elektriliini juhet, kaks kaabli soont, kaabli metallkest ja soon, juhe ja maa, seadme metallkere ja isoleeritud väljaviik. Laialdaselt kasutatakse mitmesuguseid lamekondensaatoreid, mis koosnevad kahest paralleelsest teineteisest isoleeritud metallplaadist.

Kondensaatori tingmärk on toodud joonisel 4-1.



Joon. 4-1. Kondensaatorite tingmärgid.
a — konstantse mahtuvusega kondensaator; *b* — muudetava mahtuvusega.

Kondensaatorite omaduseks on koguda ja säilitada oma plaatidel suuruselt võrdseid erimärgilisi elektrilaenguid. Kondensaatori plaatide vaheline pinge U on võrdeline ühel plaadil oleva laenguga Q.

Suurust, mis on määratud kondensaatori ühel plaadil oleva laengu ja plaatidevahelise pinge suhtega, nimetatakse kondensaatori mahtuvuseks ja ta on üheks kondensaatori parameetriks.

Seega mahtuvus

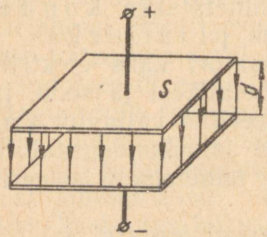
$$C = \frac{Q}{U}. \qquad (4\text{-}1)$$

Rahvusvahelises mõõtühikute süsteemis on mahtuvuse mõõtühikuks farad, s. o. sellise kondensaatori mahtuvus, mille plaatidevaheline pinge on laengu 1 C puhul 1 V. Seega

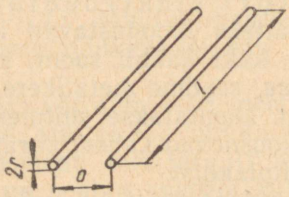
$$1\ \mathrm{F} = \frac{1\ \mathrm{C}}{1\ \mathrm{V}}.$$

Kuna farad on suur mõõtühik, siis kasutatakse sagedamini mikrofaradit (1 μF = 10^{-6} F) või pikofaradit (1 pF = 10^{-12} F).

Kondensaatori mahtuvus sõltub tema elektroodide kujust, mõõtmetest ja vastastikusest asetusest ning elektroode lahutava dielektriku omadustest.



Joon. 4-2. Lamekondensaator.



Joon. 4-3. Kaks rööpset silindrilist juhet.

Näiteks lamekondensaatori (joon. 4-2) mahtuvus avaldub järgmiselt:

$$C = \varepsilon_a \frac{S}{d}, \qquad (4\text{-}2)$$

kus S on elektroodi pind (m^2),

d — elektroodidevaheline kaugus (m),

ε_a — absoluutne dielektriline läbitavus.

Kahe rööpse silindrilise juhtme (joon. 4-3) vaheline mahtuvus

$$C = \varepsilon_a \frac{\pi l}{\ln \frac{a}{r}}, \qquad (4\text{-}3)$$

kus l on juhtme pikkus,
a — juhtmete telgjoonte vaheline kaugus,
r — juhtme raadius.

Absoluutne dielektriline läbitavus iseloomustab dielektriku omadusi. Valemist (4-2) järeldub, et

$$\varepsilon_a = \frac{Cd}{S},$$

millest mõõtühik

$$[\varepsilon_a] = \left[\frac{Cd}{S}\right] = \frac{\mathrm{F \cdot m}}{\mathrm{m^2}} = \frac{\mathrm{F}}{\mathrm{m}}.$$

Seega mõõdetakse absoluutset dielektrilist läbitavust faradites meetri kohta.

Erinevatel dielektrikutel on absoluutne dielektriline läbitavus erinev. Vaakuumi absoluutne dielektriline läbitavus, mida nimetatakse elektriliseks konstandiks, on rahvusvahelises mõõtühikute süsteemis

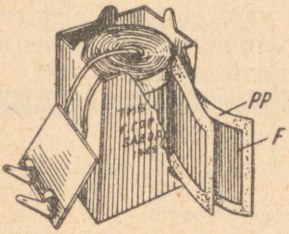
$$\varepsilon_0 \approx \frac{1}{36 \cdot 10^9 \cdot \pi} = 8{,}85 \cdot 10^{12}\ \mathrm{F/m}. \qquad (4\text{-}4)$$

Erinevate ainete absoluutne dielektriline läbitavus avaldatakse elektrilise konstandi ε_0 ja dielektrilise läbitavuse ε korrutisena:

$$\varepsilon_a = \varepsilon_0 \varepsilon.$$

Dielektriline läbitavus ε on seega arv, mis näitab mitu korda on antud aine absoluutne dielektriline läbitavus suurem elektrilisest konstandist. Õhul on dielektriline läbitavus 1, mineraalõlil 2,2, vilgul 6, paberil 4,3.

Meie kodumaine tööstus laseb välja mitmesuguse mah-



Joon. 4-4. Paberkondensaator.
F — foolium; *PP* — parafiiniga immutatud paber.

tuvusega (1 pF ... 10 000 μF) kondensaatoreid mitmesugustele nimipingetele kuni 100 kilovoldini. Need kondensaatorid erinevad üksteisest ka konstruktsiooni ja otstarbe poolest.

Alalis- ja vahelduvvooluahelais kasutatakse paber-, vilk- ja keraamilisi kondensaatoreid. Elektrolüütkondensaatoreid kasutatakse vaid alalisvooluahelais.

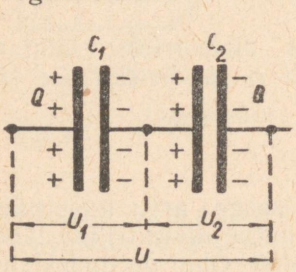
Paberkondensaator (joon. 4-4) koosneb kahest õhukese lehtmetalli ehk fooliumi ribast, mis on isoleeritud parafiiniga immutatud paberlintidega.

Elektrolüütkondensaatoris on dielektrikuks väga õhuke oksiidikiht kondensaatori üheks plaadiks oleval alumiiniumlindil. Teiseks plaadiks on viskoosse elektrolüüdi lahusega immutatud paber või riie.

4-2. Kondensaatorite ühendamine

Vajaliku mahtuvusega või nimipingega kondensaatori puudumisel võime seda asendada mitme teistsuguste parameetritega kondensaatoriga.

Kondensaatorite ühendamisel kasutatakse jada-, rööp- ja segaühendust.



Joon. 4-5. Kondensaatorite jadaühendus.

Jadaühenduse (joon. 4-5) puhul on kõigi kondensaatorite elektroodidel suuruselt võrdsed laengud, sest laengud liiguvad energiaallikast vaid välistele elektroodidele ja sisemistel tekivad nad varem teineteist neutraliseerinud laengute eraldumise tulemusena.

Tähistades kondensaatori ühe elektroodi laengu Q-ga, võib kirjutada

$$U_1 = \frac{Q}{C_1} \quad \text{ja} \quad U_2 = \frac{Q}{C_2}.$$

Seega on erinevate mahtuvustega kondensaatorite pinged erinevad.

Pinget ahela klemmidel

$$U = U_1 + U_2$$

saame avaldada kondensaatorite laengute ja mahtuvuste suhete abil:

$$\frac{Q}{C} = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2},$$

millest Q-ga jagamisel saame, et

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}. \qquad (4\text{-}5)$$

Siit avaldame kahe jadamisi ühendatud kondensaatori ekvivalentse ehk kogumahtuvuse:

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}. \qquad (4\text{-}6)$$

Rööpühenduse korral (joon. 4-6) on pinged kõigil kondensaatoritel võrdsed, laengud aga üldjuhul erinevad:

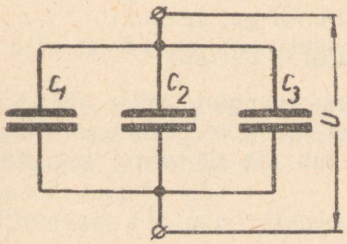
$Q_1 = C_1 U$ ja $Q_2 = C_2 U$.

Rööpsetele kondensaatoritele antud kogu laeng on võrdne üksikute kondensaatorite laengute summaga, s. o.

$$Q = Q_1 + Q_2.$$

Seega ekvivalentne ehk kogumahtuvus

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{Q_1 + Q_2}{U} = C_1 + C_2, \qquad (4\text{-}7)$$



Joon. 4-6. Kondensaatorite rööpühendus.

s. t. ta võrdub üksikute kondensaatorite mahtuvuste summaga. Valemite (4-5) ja (4-7) abil võime kergesti leida suvalise arvu jadamisi või rööbiti ühendatud kondensaatorite kogumahtuvuse.

Näide 4-1. Leida kahe kondensaatori kogumahtuvus nende jada- ja rööpühenduse puhul, kui $C_1 = 1$ μF ja $C_2 = 3$ μF.

Kogumahtuvus jadaühenduse puhul

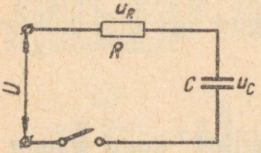
$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{1 \cdot 3}{1 + 3} = 0{,}75 \ \mu\text{F}.$$

Kogumahtuvus rööpühenduse puhul

$$C = C_1 + C_2 = 1 + 3 = 4 \ \mu\text{F}.$$

4-3. Elektrivälja energia

Takistusest R ja mahtuvusest C koosneva ahela (joon. 4-7) lülitamisel alalispingele tekib ahelas vool ja kondensaator laetakse.



Joon. 4-7. Vooluring takisti ja kondensaatoriga.

Pinge ahela klemmidel koosneb igal hetkel kahest komponendist:

$$U = u_R + u_C,$$

kus $u_R = iR$ on pingelang takistil R, $u_C = \frac{q}{C}$ aga pinge kondensaatori plaatide vahel.

Korrutades pinge võrrandit $i\mathrm{d}t$-ga, saame:

$$Ui\mathrm{d}t = i^2R\mathrm{d}t + u_C i\mathrm{d}t = i^2R\mathrm{d}t + u_C C\mathrm{d}u_C.$$

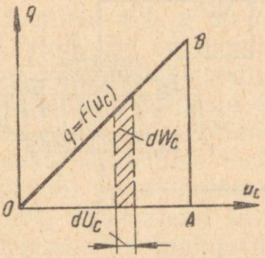
Võrrandi vasak pool esitab energiat, mille ahel saab aja $\mathrm{d}t$ vältel toiteallikast. Parema poole esimene liidetav $i^2R\mathrm{d}t$ on energia, mis muundub aja $\mathrm{d}t$ vältel takistis R soojuseks. Teine liidetav

$$\mathrm{d}W_C = u_C C\mathrm{d}u_C$$

esitab energiat, mis salvestub elektrivälja kondensaatori pinge kasvamisel du_C võrra. Kuna $u_C C = q$, siis

$$dW_C = q du_C.$$

Kondensaatori laeng q kasvab võrdeliselt pingega, mis on graafiliselt kujutatav koordinaatide alguspunkti läbiva sirgega (joon. 4-8). Energia, mille kondensaator saab



Joon. 4-8. Kondensaatori laadimise graafik $q = f(u_C)$.

tema klemmipinge kasvamisel du_C võrra, on kujutatud viirutatud pindalana (joon. 4-8). Selliste pindalade summa, s. o. kolmnurga OAB pindala, kujutab kondensaatori pinge tõusmisel nullist u_C-ni tema elektriväljas salvestatavat energiat. Seega elektrivälja energia

$$W_C = \frac{1}{2} q u_C = \frac{C u_C^2}{2}. \qquad (4\text{-}8)$$

Välise elektrivälja kadumisel kondensaatori elektrivälja salvestatud energia vabaneb.

Näide 4-2. Leida 50 mikrofaradise kondensaatori elektrivälja salvestatud energia, kui pinge kondensaatoril on 300 V.

Elektrivälja energia

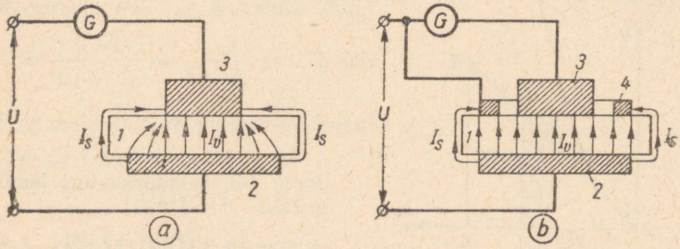
$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{50 \cdot 300^2}{10^6 \cdot 2} = 2{,}25 \text{ J}.$$

4-4. Dielektrik elektriväljas

Kehad, millede ruumalaühikus on ioone ja vabu elektrone tühisel hulgal, on üliväikese juhtivusega ja neid nimetatakse mittejuhtideks — isolaatoriteks või dielektrikuteks.

Joonisel 4-9, *a* on dielektrikust leht *1* asetatud kahe

metallelektroodi *2* ja *3* vahele, millele on rakendatud pinge *U*. Välja jõudude mõjul kulgeb elektroodilt *2* elektroodile *3* tühiselt väike vool, millest osa (I_v) läbib dielektrikut, osa (I_S) aga kulgeb dielektriku pindala mööda. Esimest komponenti nimetatakse m a h u-, teist p i n n a v o o l u k s.



Joon. 4-9. Voolud dielektrikus.
I_v — mahuvool; I_S — pinnavool; *a* — galvanomeeter mõõdab voole I_v, I_S; *b* — galvanomeeter mõõdab ainult voolu I_v.

Mahuvool on määratud dielektriku omadustest ja mõõtmetest sõltuva mahutakistusega R_v.

Pinnavool on määratud dielektriku pinnatakistusega R_S, mis sõltub peale dielektriku mõõtmete ja omaduste veel keskkonna tingimustest, näiteks õhuniiskusest.

Mahuvool

$$I_v = \frac{U}{R_v} = \frac{U}{\varrho_v \frac{l}{S}}.$$

M a h u e r i t a k i s t u s e ϱ_v all mõistetakse suurust, mis on arvuliselt võrdne 1-ruutsentimeetrise ristlõikega ja 1 cm pikkuse dielektriku takistusega. Mahueritakistuse mõõtühikuks on oomsentimeeter:

$$[\varrho_v] = \left[\frac{R_v S}{l}\right] = \frac{\Omega \cdot \text{cm}^2}{\text{cm}} = \Omega \cdot \text{cm}.$$

Pinnavool

$$I_S = \frac{U}{R_S} = \frac{U}{\varrho_S \frac{l}{d}}.$$

Dielektriku pinnaeritakistuse all mõistetakse suurust, mis on arvuliselt võrdne 1 cm pikkuse ja 1 cm laiuse pinna takistusega. Pinnaeritakistuse mõõtühikuks on oom:

$$[\varrho_S] = \left[\frac{R_S d}{l}\right] = \frac{\Omega \cdot \text{cm}}{\text{cm}} = \Omega.$$

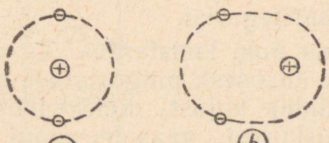
Joonisel 4-9, *b* on näidatud samasugune dielektrikust leht, kuid siin on ülemine kettakujuline elektrood ümbritsetud rõngaselektroodiga *4*. Selle tulemusena mõõdame galvanomeetriga vaid elektroodilt *2* elektroodile *3* kulgevat mahuvoolu. Mõõtnud pinge, saame dielektrikukihi paksust ja ülemise elektroodi pindala teades antud lülitusskeemi puhul määrata algul mahutakistuse $R_v = U/I_v$, seejärel aga valemi (4-9) abil ka mahueritakistuse.

Dielektriku mahueritakistus on tema üheks parameetriks.

Näide 4-3. Leida elektriisoleerkartongi mahueritakistus (joon. 4-9, *b*), kui $U = 500$ V, $I_v = 2 \cdot 10^{-8}$ A, $S = 100$ cm^2, $l = 1$ cm. Mahueritakistus

$$\varrho_v = R_v \frac{S}{l} = \frac{U}{I_v} \cdot \frac{S}{l} = \frac{500 \cdot 100}{2 \cdot 10^{-8}} = 2{,}5 \cdot 10^{12}\ \Omega \cdot \text{cm}.$$

Dielektriku viimisel elektrivälja nihkuvad elektronide orbiidid välja jõudude mõjul väljale vastupidises suunas, mille tulemusena aatomite tuumad ei asu enam orbiitide keskpunktis, vaid on pisut nihkunud (joon. 4-10). Välise välja kadumisel kaob ka see nihe. Seda nähtust nimetatakse dielektriku polarisatsiooniks.



Joon. 4-10. Dielektriku aatom. *a* — polariseerimata; *b* — polariseeritud.

Polariseeritud molekulid loovad oma elektrivälja, mis on vastupidine välisele, ja selle tulemusena resulteeriv väli nõrgeneb.

Seda, mil määral dielektrik elektrivälja toimel polari-

seerub, iseloomustab dielektriline läbitavus, mis näitab, mitu korda väline väli polarisatsiooni tõttu nõrgeneb.

Vahelduva elektrivälja puhul vaheldub ka elektronide orbiitide nihkumise suund tuuma suhtes. Selles protsessis tugevneb aineosakeste liikumine ja dielektrik soojeneb. Mida suurem on elektrivälja muutumise sagedus, seda tugevamini dielektrik soojeneb. Seda nähtust kasutatakse niiskete dielektrikute kuivatamiseks ja ka kõrget temperatuuri nõudvate keemiliste reaktsioonide saamiseks. Perioodilistest nihetest tingitud dielektriku kuumenemiseks minevat võimsust ruumala ühiku kohta nimetatakse *dielektrikuserikaoks*.

Dielektriline läbitavus ja dielektrikuserikaod on dielektriku tähtsaimad parameetrid.

Kui dielektrik on elektriväljas, võime väljatugevuse suurendamisel jõuda piirini, mil toimub dielektriku *läbilöök*, s. o. tema kohalik purunemine. Sellist väljatugevust nimetatakse dielektriku *läbilöögitugevuseks* ehk *elektriliseks tugevuseks*. Pinget, mille puhul läbilöök toimub, nimetatakse läbilöögipingeks.

Läbilöögi iseloom võib olla mitmesugune.

Elektrilise läbilöögi puhul saavutavad vähesed dielektrikus esinevad vabad elektronid elektrivälja mõjul kriitilise kiiruse, millest piisab dielektriku neutraalsetest aatomitest ja molekulidest elektronide väljalöömiseks. Tekib põrkeionisatsioon, mis viib läbilöögini.

Soojusläbilöögi puhul kuumeneb dielektrik elektriväljas temperatuurini, mille juures ta rikneb või puruneb, näiteks mõraneb, söestub jms. Kuumenemise põhjuseks võivad olla dielektrikuskaod või dielektriku juhtivuse suurenemine ja tunduv ebaproportsionaalne mahuvoolu suurenemine pinge tõstmisel, mis on tingitud dielektriku negatiivsest takistuse temperatuuritegurist.

Dielektriku läbilöögitugevus pole konstantne. Ta sõltub pinge liigist ja muutumise kiirusest, pingestatuse kestusest, elektrivälja (elektroodide) kujust, dielektrikukihi paksusest, temperatuurist, niiskusest, gaaside puhul ka rõhust.

Elektriseadmete töökindluse tagamiseks on vajalik, et kõik ta dielektrikust osad töötaksid lubatavate väljatugevuste piirkonnas, mille ülemine piir peab olema mitu korda väiksem läbilöögitugevusest. Mõnede dielektrikute läbilöögitugevused on toodud paragrahvis 4-7.

Näide 4-4. Kahe tasapinnalise metallelektroodi vahele on surutud 0,2 cm paksune elektriisoleerkartongi leht. Leida lubatav pinge ja läbilöögipinge. Lubatav pinge peab olema läbilöögipingest 3 korda väiksem.

Tabelist leiame elektriisoleerkartongi läbilöögitugevuse $\mathcal{E}_u = 100$ kV/cm.

Läbilöögipinge $U_u = \mathcal{E}_u d = 100 \cdot 0{,}2 = 20$ kV.

Lubatav pinge

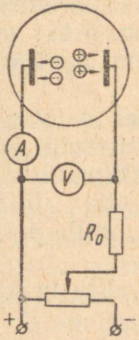
$$U_{lub} = \frac{U_u}{3} = \frac{20}{3} \approx 7 \text{ kV}.$$

4-5. Gaas elektriväljas

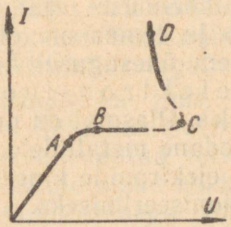
Normaaltingimustel on gaasid dielektrikud, sest vabu elektrone ja ioone on neis väga vähe.

Röntgeni-, radioaktiivsete, kosmiliste ja teiste kiirte, elektrivälja, kõrge temperatuuri ja veel mõnede tegurite mõjul gaas *ioniseerub*. Näiteks võib elektriväljas elektroni kokkupõrkel gaasi neutraalse aatomi või molekuliga toimuda viimase lagunemine elektroniks ja positiivseks iooniks. Seejuures annab elektron osa oma energiast gaasi aatomile. Vähim aatomi ioniseerimiseks vajalik energiahulk on määratud *ionisatsioonipotentsiaaliga*. Aatomist eraldunud elektron võib jääda vabaks või ühineda mõne neutraalse aatomiga, moodustades negatiivse iooni.

Vastupidine protsess, mida nimetatakse *rekombi-*



Joon. 4-11. Lülitusskeem gaasisamba karakteristikute ülesvõtmiseks.



Joon. 4-12. Gaasisamba pingevoolu karakteristik.

natsiooniks, kujutab endast elektronide ja ioonide ühinemist neutraalseteks aatomiteks ja toimub samaaegselt gaasi ionisatsiooniga. Seega jääb gaasi ionisatsiooniaste ionisaatori pidevale toimele vaatamata enam-vähem ühesuguseks.

Kui rakendame kahe ioniseeritud gaasi asetatud metallelektroodi (joon. 4-11) vahele alalispinge, siis põhjustab elektriväli positiivsete ioonide liikumise välja suunas ja negatiivsete ioonide ning elektronide liikumise vastassuunas. Seega tekib elektroodide vahel olevas gaasisambas vool.

Ionisatsioonijuhtivuseks nimetatakse gaasi juhtivust, mis tekib ja püsib vaid ionisaatori toimel.

Ionisaatori loodud konstantse ionisatsiooniastme puhul kutsub elektroodidevahelise pinge tõstmine algul esile võrdelise voolu suurenemise (joon. 4-12), seejärel voolu kasv aeglustub ja katkeb. Vool saab võrdseks küllastusvooluga, mille juures rekombinatsiooni ei toimu: kõik ionisatsiooniprotsessis tekkivad elektronid ja ioonid jõuavad elektroodidele.

Pinge edasisel suurendamisel võime saada elektroodide vahel elektrivälja tugevuse, mille juures elektronide kineetiline energia $mv^2/2$ osutub küllaldaseks, et ioniseerida neutraalseid aatomeid. Toimub nn. põrkeionisatsioon. Vabanevad elektronid saavad piisava kiirenduse ja ioniseerivad omakorda uusi neutraalseid aatomeid jne. Ioonide ja vabade elektronide tekkimise protsess kulgeb laviinikujuliselt ja sellega kaasneb voolu järsk suurenemine (joon. 4-12, kõver *CD*) takistusega R_0 (joon. 4-11) määratud piirini. Pinge elektroodide vahel samal ajal väheneb.

Elektrilahenduse ajal elektroodide vahel asuv gaas ioniseerub ja temas on elektrone ja positiivseid ioone enam-vähem ühesugusel hulgal. Sellist keskkonda nimetatakse elektron-ioonplasmaks ehk lihtsalt plasmaks. Plasmal on hea elektrijuhtivus, mille poolest ta on lähedane metallidele.

Osade elektronide kineetilisest energiast ei piisa gaasi aatomite ioniseerimiseks.

Sel juhul kokkupõrkel üleantud energia vaid ergastab aatomi. Viimane aga kiirgab energia välja footonina — gaas hakkab helendama.

Küllalt suure väljatugevusega elektriväli võib gaasis

põhjustada sõltumatu elektrilahenduse. Teatava väljatugevuse ja pinge juures toimub järsk voolu suurenemine (joon. 4-12, kõver *CD*) ja gaas hakkab helendama. Vastavat pinget nimetatakse süütepingeks.

Eristame mitmeid sõltumatu lahenduse staadiume: pime-, huum-, säde- ja kaarlahendus.

Pimelahendus tekib siis, kui elektrivälja tugevus saavutab mingis välja osas, näiteks mitmesugustel teravikel, väikese läbimõõduga juhtmete ümber antud gaasile kriitilise väärtuse. Vahel kaasneb selle lahendusega nõrk surin ja helendamine — esineb nn. koroonalahendus.

Huumlahendus tekib pimelahendusest üleminekul seadmeis, kus gaasi rõhk on madal. Talle on iseloomulik helendav gaasisammas anoodi juures — anoodhelendamine. Pikkades klaastorudes võtab ta enda alla suurema osa torust. Tema värvus sõltub gaasist ja võib olla vägagi erinev; neoon annab näiteks punast valgust. Selliseid torusid kasutatakse valgusreklaami tarbeks.

Huumlampe kasutatakse ka pingeindikaatoreina. Neooni või argooniga täidetud ballooni paigutatakse kaks metallelektroodi. Lamp süttib täpselt määratud pingel. Tarbitav võimsus on murdosa vatist.

Sädelahendus tekib pimelahendusest pinge tõstmisel. Kasvab loomulikult ka väljatugevus ja ionisatsioon levib kogu elektroodidevahelises ruumis. Sädelahendus kulgeb nn. kanaleid mööda, mis kujutavad endast vähima takistusega teid elektronide vahel. Sädekanalis liikuv elektronide laviin põhjustab temperatuuri ja rõhu järsu tõusu, millest on tingitud sädelahendusele iseloomulik ragin. Välk kujutab endast hiiglaslikku sädelahendust.

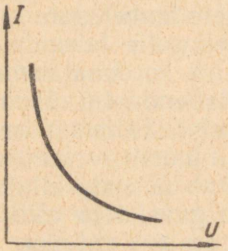
Sädelahendusega kaasneb elektroerosioon, s. o. aineosakeste väljapaiskumine anoodist. Seda nähtust kasutatakse metallide töötlemisel elektrisädemega.

Kaarlahendust võib saada ka ilma eelnevate staadiumideta. Võetakse näiteks kaks süsielektroodi, mis on voolu piirava takistuse abil ühendatud toiteallikaga. Kaare saamiseks viiakse elektroodide otsad kokku. Tekkiv vool kuumutab suure üleminekutakistusega kokkupuutekoha kõrge temperatuurini. Kui nüüd elektroodid lahutada, ioniseerivad elektronid nendevahelise gaasisamba ja tekib plasma, mis suleb vooluringi. Toimub edasine elektroodide, eriti elektronide poolt pommitatava anoodi

kuumenemine. Anoodi ja plasma temperatuur tõuseb üle 4000 °C ja kiirgub võimas valgusvoog.

Kuna plasma juhtivus on suur, siis läbib vooluringi ka väikestel pingetel (15 ... 30 V) tugev vool.

Voolu kasvamisel plasma temperatuur ja juhtivus kasvavad, pinge elektrikaarel aga langeb. Elektrikaare pinge-voolu karakteristik on langeva iseloomuga (joon. 4-13).



Joon. 4-13. Elektrikaare pinge-voolu karakteristik.

Säde- ja kaarlahendus tekivad vooluringide katkestamisel, tarbijate väljalülitamisel.

Kaarlahenduse avastas 1802. aastal akadeemik V. V. Petrov. Ta uuris ka selle praktilise kasutamise võimalusi valgusallikates ja muuks otstarbeks.

Esimesena kasutas elektrikaart valgusallikana P. N. Jablotškov 1876. aastal.

Laialdaselt kasutatav metallide elektrikaarkeevitus on üks progressiivsemaid tehnoloogilisi protsesse.

4-6. Elektriisolatsioon

Mistahes vooluringi puhul on meil tegemist mitte ainult juhtivate kehadega, mida mööda kulgeb vool, vaid ka konstruktsioonidega, mis välistavad voolu kulgemise mõnda teist teed mööda väljaspool neid juhtivaid kehi. Seega peab juht kogu oma ulatuses olema ümbritsetud elektriisolatsiooniga, mis eraldaks teda väliskeskkonnast ja samuti eraldaks üksteisest erineva potentsiaali all olevaid juhi osasid.

Peale selle ei lase isolatsioon inimesel puutuda juhtivate osade vastu, mis on maast erineva potentsiaaliga.

Kondensaatorites ja reas seadmetes, näiteks kaablites,

kasutatakse spetsiaalset isolatsiooni (dielektrikut) vajaliku mahtuvuse, etteantud parameetrite või muude omaduste saamiseks.

Isolatsiooni õige valik, otstarbekas konstruktsioon ja kontroll tagavad elektriseadmete avariideta töö. Siinkohal tuleb meeles pidada, et isolatsioonis tekivad kergemini mitmesugused muutused ja ta rikneb kiiremini kui juhtiv materjal.

Elektrotehniliste seadmete üksikute elementide isolaatorite ja isolatsiooni ehitust ning konstruktsiooni ja nende kontrolli vaadeldakse raamatu vastavates peatükkides.

Elektriisolatsiooni tähtsus ja maksumus kasvavad koos elektriseadme tööpingega.

Uute suure läbilöögitugevuse, kõrge kuumuskindluse ja suure dielektrilise läbitavusega isolatsioonimaterjalide saamine ja otstarbekohane kasutamine on suure tehnilis-ökonoomilise tähtsusega, sest nad võimaldavad vähendada elektrimasinate, -aparatuuri ja elektriülekandeliinide ning -võrkude gabariiti, massi ja maksumust.

Elektriisolatsioonimaterjalidele esitatakse nende omaduste suhtes väga mitmesuguseid nõudeid, milledest tähtsamad on määratud järgmiste suuruste abil:

1) läbilöögitugevus $\mathcal{E}_{ll}$;
2) mahueritakistus;
3) pinnaeritakistus;
4) dielektriline läbitavus ε_a või ε;
5) dielektrikuskaod.

Peale selle on suur tähtsus ka mehhaanilistel, termilistel ja teistel füüsikalistel ning keemilistel omadustel.

Elektrotehnikas kasutatakse suurel hulgal mitmesuguseid isoleermaterjale, sest nende omaduste suhtes esitatakse väga mitmesuguseid nõudeid.

4-7. Elektriisoleermaterjalid

Elektriisoleermaterjale võib jaotada rühmadesse mitmete tunnuste alusel;

1) agregaatoleku alusel gaasilisteks, vedelateks ja tahketeks;
2) keemiliste omaduste alusel orgaanilisteks ja anorgaanilisteks;
3) kuumuskindluse järgi mitmesse klassi (§ 14-2) jne.

a) Gaasilised dielektrikud

Õhk on loomulik isolaator. Üksikutes elektriseadmete osades, näiteks elektriõhuliinide mastidevahelistes osades on õhk ainsaks isolaatoriks paljaste juhtmete vahel.

Õhu nagu teistegi gaaside läbilöögitugevus sõltub temperatuurist, rõhust ja reast teistest teguritest. Normaaltemperatuuril (+20° C) ja normaalrõhul on õhu läbilöögitugevus väiksem kui enamikul vedelatest ja tahketest dielektrikutest — 30 kV/cm. Sellest tingituna esinebki vahel õhuvahemiku läbilöök vahetult tahke dielektriku (isolaatori) pinnal ja seda nimetatakse p i n d l a h e n d u s e k s. Pindlahendus on eelistatavam kui isolaatori läbilöök, sest õhu läbilöögitugevus taastub, isolaator aga rikneb läbilöögi tulemusena ja tuleb asendada uuega.

Teistest gaasidest kasutatakse vesinikku, süsihappegaasi, lämmastikku ja inertseid gaase, argooni ning neooni, viimaseid peamiselt elektrilampide kolbide täiteks.

Vesinikku kasutatakse õhu asemel suurte elektrimasinate jahutamiseks, sest tema suurema soojusmahtuvuse ja soojusjuhtivuse tõttu saame tunduvalt parema jahutuse.

b) Vedelad dielektrikud

Vedelate dielektrikute hulka kuuluvad mineraalõlid, sünteetilised vedelikud, vaigud, lakid.

M i n e r a a l õ l i d on nafta utteproduktid ja nad kujutavad endast vedelate süsivesinike segu. Nende tähtsamad kasutamiskohad on: võimsad õlijahutusega trafod, õlilülitid, jõukaablid, kondensaatorid.

Õli on trafos ühteaegu nii voolu juhtivate osade isoleerimiseks kui ka jahutamiseks. Jahutus toimub konvektsiooni teel, s. t. soojust kannab edasi liikuv trafoõli.

Õlilüliteis on õli keskkonnaks, mis soodustab vooluringi katkestamisel tekkiva elektrikaare kustumist.

Kaablites tööpingega kuni 35 kV kasutatakse õli isolatsiooni immutamiseks. Kaablites tööpingega 100 kV ja üle selle on kogu kaabli pikkuses spetsiaalsed kanalid, mis täidetakse õliga.

Õlil peab olema suur läbilöögitugevus (100...200 kV/cm). Kui aga õlis on niiskust, siis ta läbilöögitugevus langeb järsult. See ongi põhjuseks, miks õli tuleb puhastada ja kuivatada enne kaabli täitmist ning perioodiliselt

ekspluatatsiooni käigus. Õli dielektriline läbitavus $\varepsilon = 2 \ldots 2{,}3$; mahueritakistus $\varrho_v = 10^{14} \ldots 10^{15}\ \Omega \cdot \text{cm}$.

Viimasel ajal on üsna laialdast kasutamist leidnud sünteetilised vedelad dielektrikud.

S o v o o l kujutab endast erineva kloreerituse astmega difenüüli molekulide segu. Seda sünteetilist vedelat dielektrikut kasutatakse kondensaatorite täitmiseks ja immutamiseks, sest tema dielektriline läbitavus on üle kahe korra suurem kui mineraalõlil. Seega kasvab kondensaatorite mahtuvus umbes kaks korda.

Suure viskoossuse tõttu ei sobi sovool transformaatorite täitmiseks. Selleks otstarbeks kasutatakse sovtooli, s. o. trikloorbensoolis lahustatud sovooli.

Nagu sovool nii pole ka sovtool süttiv ja temaga täidetud trafod on tuleohutud.

V a i g u d on madalal temperatuuril amorfsed klaasisarnased ained. Kuumutamisel nad pehmenevad, muutuvad plastiliseks ja lõpuks vedelaks. Vaigud pole hügroskoopsed ja nad ei lahustu vees, küll aga lahustuvad nad piirituses ja teistes lahustites. Vaigud on paljude lakkide, kompaundide, plastmasside ja kilede üheks tähtsamaks koostisosaks. Neid on nii looduslikke kui ka sünteetilisi.

Looduslikud vaigud, näiteks šellak ja taimevaigud, kujutavad endast mõnede loomsete ja taimsete organismide elutegevuse produkte. Suuremat tähtsust omavad sünteetilised vaigud, nagu polüetüleen-, polüvinüülkloriid- vaik. Viimast saadakse vinüülkloriidi polümeriseerimisel ja teda kasutatakse juhtmete ja kaablite isolatsiooniks, kaitsekateteks, lakkide valmistamiseks.

Sünteetiliste vaikude dielektriline läbitavus $\varepsilon = 4 \ldots 9$; läbilöögitugevus $\mathcal{E}_{ll} = 150 \ldots 400$ kV/cm; mahueritakistus $\varrho_v = 10^{13} \ldots 10^{14}\ \Omega \cdot \text{cm}$.

L a k i d kujutavad endast kilesid moodustavate ainete lahuseid. Sellised ained on näiteks vaigud, bituumenid, kuivavad taimeõlid (tselluloosieetrid, linaseemneõli). Kuivamisel kujunebki lakikile.

Otstarbe järgi jaotatakse lakke immutus-, katte- ja liimlakkideks. Immutuslakke (kompaunde) kasutatakse elektrimasinate ja -aparaatide mähiste immutamiseks, et tõsta nende niiskuskindlust. Kattelakid loovad kihi, mis on kaitseks keskkonna mõjude eest. Liimlakke kasutatakse vilgulehtede kleepimiseks üksteise, paberi või vastava kanga külge (mikaniit, mikalint).

Emailid on lakid, millesse on segatud anorgaanilist täiteainet, mis tõstab emailkihi kõvadust, mehhaanilist tugevust ja niiskuskindlust.

Emaillakid moodustavad erilise lakkide rühma, mis on mõeldud juhtmetele õhukese (0,05 mm) ja painduva isolatsioonikihi loomiseks (emailisolatsiooniga mähisetraat).

c) Tahked dielektrikud

Tahked dielektrikud moodustavad nii suurearvulise isoleermaterjalide rühma, et kõiki neid on võimatu käsitleda. Seepärast räägime vaid kasutatavamatest tahketest dielektrikutest. Kompaktsuse mõttes on osa andmeid nende kohta esitatud tabelis 4-1.

1. Orgaanilisi kiudmaterjale, nagu paber, kartong, fiiber, mitmesugused kangad, valmistatakse vastavalt kas puidust, puuvillast või naturaalsiidist.

Tabel 4-1

Mõnede elektriisoleermaterjalide iseloomustussuurused

Dielektrik	$\mathcal{E}u$	ε	ρ_v
	kV/cm	—	Ω · cm
Asbest	30 ... 60		10^8
Õliga immutatud paber	100 ... 250	3,6	—
Getinaks	100 ... 150	4 ... 7	$10^{10} \ldots 10^{12}$
Puit	25 ... 50	2 ... 3	$10^8 \ldots 10^{11}$
Lakkriie	70 ... 400	3 ... 4	$10^{11} \ldots 10^{13}$
Marmor	30 ... 50	7 ... 8	$10^8 \ldots 10^{11}$
Polüstürool	200 ... 300	2,5	$10^{16} \ldots 10^{18}$
Parafiin	200 ... 250	2 ... 2,2	$10^{16} \ldots 10^{17}$
Polüvinüülkloriid	325	3,2	10^{14}
Polüetüleen	500	2,25	$10^{14} \ldots 10^{16}$
Kummi	150 ... 250	3 ... 6	$10^{13} \ldots 10^{14}$
Klaas	100 ... 150	6 ... 10	10^{14}
Orgaaniline klaas	400 ... 500	3	$10^{14} \ldots 10^{16}$
Klaaslakkriie	300 ... 400	3 ... 4	$10^{12} \ldots 10^{14}$
Vilk	500 ... 1000	5,4	$5 \cdot 10^{11}$
Sovool		5,3	
Trafoõli	50 ... 180	2 ... 2,5	$5 \cdot 10^{14} \ldots 5 \cdot 10^{15}$
Tekstoliit	10 ... 75	4 ... 8	$10^{10} \ldots 10^{13}$
Portselan	150 ... 200	5,5	$10^{14} \ldots 10^{15}$
Eboniit	600 ... 800	3 ... 3,5	$10^{15} \ldots 10^{16}$
Elektriisoleerkartong	80 ... 120	3 ... 3	$10^8 \ldots 10^{10}$

Need materjalid on painduvad, piisava mehhaanilise tugevuse, kuid küllaltki suure hügroskoopsusega. Viimase puuduse parandamiseks immutatakse neid õliga või spetsiaalse kompaundiga.

Paberit valmistatakse puidust. Elektrotehnikas kasutatakse kaabli- ja kondensaatoripaberit, immutatud paberit getinaksi valmistamiseks, liimita paberit bakeliittoodete valmistamiseks ja liimiga paberit teraslehtede isoleerimiseks.

Elektriisoleerkartongi (presspappi) valmistatakse tselluloosist ja töödeldakse tugeva survega. Elektrikartongi mark ЭВ on mõeldud töötamiseks õhu-, ЭМ aga õlikeskkonnas.

Elektrikartongi kasutatakse laialdaselt trafode mähiste alustes, elektrimasinate uuretes mähise kihtide eraldamiseks ja mujal.

Fiibrit valmistatakse poorsest paberist, mida töödeldakse tsinkkloriidiga. Teda kasutatakse mitmesuguste paneelide, pukside, püstikute, poolide aluste ja teiste elektritarvete valmistamiseks.

Getinaks on bakeliitlakiga immutatud ja pressitud paber ja seda valmistatakse lehtedena paksusega 0,2... 50 mm.

Tekstoliit on valmistatud pressitud ja bakeliitlakiga immutatud mitmekihisest kangast.

2. Plastmassid koosnevad kahest põhilisest komponendist: side- ja täiteainest. Sideaineks on enamasti vaigud või bituumenid, samuti ka klaas (mikaleksis) või tsement (asbesttsemendis). Täiteaine võib olla pulbriline või kiuline.

Rabeduse vähendamiseks kasutatakse vahel veel lisaks plastifikaatoreid, tootele värvi andmiseks aga värvaineid.

Eristatakse kuumalt ja külmalt pressitavaid plastmasse.

Kindla kujuga valmistoode saab plastmassist allest pressvormis.

Plastmasse kasutatakse elektrotehnikas laialdaselt nii isoleer- kui ka konstruktsioonimaterjalidena.

3. Elastomeerid. Elastsuseks nimetatakse materjali omadust tõmbel tunduvalt pikeneda ja hiljem, välisjõudude mõju lõppedes, saada oma endised mõõtmed.

Elastseid materjale on hakatud nimetama elastomeerideks.

Kautšukit sisaldavate taimede mahlast saadav naturaalne kautšuk on väga elastne ning ei lase peaaegu üldse läbi niiskust ja gaase.

Viimaste aastakümnete jooksul on leidnud laialdast kasutamist sünteetiline kautšuk.

Elastset materjali, mida saadakse kautšuki töötlemisel väävliga, nimetatakse kummiks. 1...3%-lise väävlisisalduse puhul saame pehme, väga elastse kummi; kui aga väävlit on 25...50%, saame nn. kõvakummi e. eboniidi, mis on küll hästi töödeldav, kuid pole elastne.

Elastsuse ja heade elektriliste omaduste tõttu (vt. tabel 4-1) kasutatakse kummit elektrotehnikas väga laialdaselt.

Väikese väävlisisaldusega kummit kasutatakse juhtmete ja kaablite isolatsiooniks. Eboniidist valmistatakse aga mitmesuguseid isoleerdetaile.

Kummi puuduseks on madal kuumuskindlus ja riknemine mineraalõlide toimel.

Viimasel ajal asendatakse kummit edukalt plastmasside-elastomeeridega, nagu näiteks polüvinüülkloriidi ja polüetüleeniga, mis on leeliste, hapete, mineraalõlide ja bensiini toimele palju vastupidavamad.

4. K l a a s i saadakse räänioksiidi (SiO_2) sulatamisel koos naatriumi, kaaliumi ning kaltsiumi oksiididega. Sulatamisele järgneb kiire jahutamine ja vastava töötlemisega toodetele vajaliku kuju andmine.

Tavaline klaas on habras, spetsiaalsed klaasid, näiteks staliniit, on aga väga vastupidavad.

Elektrotehnikas kasutatakse klaasi isolaatorite ning hõõg- ja elektronlampide kolbide valmistamiseks.

Klaasist võib saada klaaskiudu ja -kedrust, mida kasutatakse kõrge temperatuuriga keskkonnas töötavate juhtmete isolatsiooniks.

5. E l e k t r i i s o l e e r p o r t s e l a n i saadakse koaliini, tulekindla savi, kvartsi ja põldpao peenestatud segu vastaval töötlemisel. Segust valmistatavale tootele antakse vajalik kuju, hügroskoopsuse vähendamiseks kaetakse ta glasuuriga ja seejärel põletatakse.

Portselanil on suur mehhaaniline ja läbilöögitugevus ning kuumuskindlus. Teda kasutatakse laialdaselt madal- ja kõrgepingeisolaatorite valmistamiseks.

6. Vilk on kristallilise ehitusega materjal, mis lõhustub kergesti õhukesteks lehtedeks. Ta on väga kuumus- ja niiskuskindel ning väga heade elektriliste omadustega (vt. tabel 4-1). Vilk leiab elektro- ja raadiotehnikas laialdast kasutamist.

Mikaniidiks nimetatakse laki või vaiguga kokkukleebitud vilgulehti. Seda materjali kasutatakse elektrimasinate kommutaatorilestade isoleerimiseks, mitmesugustes isoleerivates vahekihtides, samuti mitmesuguse kujuga detailide valmistamiseks (vormide abil).

7. Asbest on kiulise ehitusega mineraal. Tema peamiseks eeliseks on kõrge kuumuskindlus — ta talub temperatuuri — 300 ... 400° C. Asbest on hügroskoopne ja ka isoleerivad omadused pole tal eriti head (vt. tabel 4-1). Asbestist valmistatakse kedrust, kangaid, linte, nööri, asbestpappi.

Asbesttsementi saadakse asbestkiu, tsemendi ja vee segu külmpressimisel. Ta on suure kuumuskindlusega ja mehhaanilise tugevusega, mittesüttiv.

Asbesttsemendist valmistatakse kilpide vaheseinu, torusid ja keeruka kujuga detaile.

8. Marmor on üks lubjakivi liike. Temast valmistatakse lülituskilpide plaate ja paneele.

9. Parafiini saadakse nafta töötlemisel. Ta on valge, vahataoline aine. Ta pole hügroskoopne ning sulab 55° C juures.

Parafiini kasutatakse paberi, papi ja puidu immutamiseks, et vähendada nende materjalide hügroskoopsust.

5. VAHELDUVVOOL

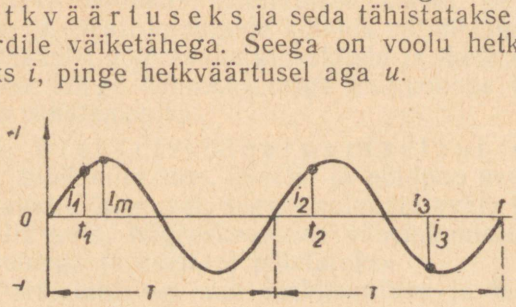
5-1. Vahelduvvoolu periood ja sagedus

Kõikjal kasutatava vahelduvvoolu peamiseks eeliseks on võimalus teda lihtsalt ja peaaegu ilma kadudeta transformeerida, s. o. saada erineva pingega vahelduvvoolu — kõrgepingelist kaugülekandeliinide tarvis ja madalapingelist tarbijaile.

Tehnikas nimetatakse v a h e l d u v v o o l u k s perioodiliselt muutuvat voolu, mille väärtused korduvad teatud ajavahemiku järel, mida nimetatakse p e r i o o d i k s (T), kusjuures poole perioodi vältel kulgeb vool ühes suunas, teise poole vältel aga vastassuunas.

Siinuselise vahelduvvoolu graafik on toodud joonisel 5-1, kusjuures abstsissteljele on paigutatud aja ja ordinaatteljele voolu *i* väärtused. Abstsissteljest kõrgemal asuvad ordinaadid vastavad positiivsetele, allpool asuvad aga negatiivsetele voolu väärtustele.

Muutuva suuruse väärtust mingil hetkel nimetatakse h e t k v ä ä r t u s e k s ja seda tähistatakse vastavalt standardile väiketähega. Seega on voolu hetkväärtusel tähiseks *i*, pinge hetkväärtusel aga *u*.



Joon. 5-1. Vahelduvvoolu graafik.

Voolu hetkväärtuseks nimetatakse lõpmatu väikese ajavahemiku dt vältel juhtme ristlõiget läbiva laengu dq ja selle ajavahemiku dt suhet:

$$i = \frac{dq}{dt}. \tag{5-1}$$

Maksimaalset väärtust, mille vahelduvsuurus saavutab perioodi vältel, nimetatakse maksimaalväärtuseks ehk amplituudiks ja vastavalt standardile tähistatakse teda suurtähega koos indeksiga «m». Seega on voolu maksimaalväärtuse tähis I_m (joonis 5-1). Voolu (pinge) hetkväärtused moodustavad perioodi vältel muutudes vahelduvvoolu (-pinge) tsükli.

Perioodi pöördväärtust, s. o. perioodide arvu sekundis, nimetatakse vahelduvvoolu sageduseks. Seega sagedus

$$f = \frac{1}{T}. \tag{5-2}$$

Sageduse mõõtühikuks on herts (Hz), mis on arvuliselt võrdne ühe perioodiga sekundis.

NSV Liidus on standardne tööstuslik sagedus 50 Hz. Telefoniside töötab sagedustel 300 ... 3500 Hz (helisagedus). Raadiotehnikas kasutatakse sagedusi 10^5 ... 10^{10} Hz.

5-2. Siinuselise emj. saamine

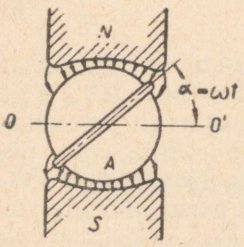
Tehnikas kasutatakse peamiselt siinuseliselt muutuvaid voole (joon. 5-1), sest sel juhul, nagu allpool selgub, muutuvad sama seaduspärasuse järgi ka pinged ning nende voolude poolt indutseeritud elektromotoorjõud.

Joonisel 5-2 on kujutatud lihtsaima generaatori ehitus. Elektromagneti pooluste N ja S vahel asub ankur, mis kujutab endast teraslehtedest koostatud silindrit, mille pinnale on kinnitatud traadikeerd. Keeru otsad on ühendatud isoleeritud vaskrõngastega, mis on kinnitatud ankru võllile. Rõngastel libisevad harjad, mis on ühendatud elektriahelaga.

Poolustele on antud selline kuju, et õhupilu kasvaks magneti äärte suunas ja et magnetvoo tihedus B muutuks ankru pinna lähedal piki õhupilu siinuseliselt, s. t.

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

kus B_m on maksimaalne vootihedus pooluse keskel, α aga nurk ankru telge läbiva neutraaltasapinna OO' ja läbi sama telje ning ankru pinna suvalise punkti võetud tasapinna vahel.



Joon. 5-2. Vahelduvvoolugeneraatori põhimõtteskeem.

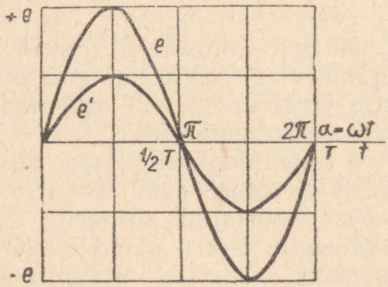
Kui ankur pöörleb ühtlase nurkkiirusega $\omega = \alpha/t$, siis indutseeritakse iga keeru aktiivküljes emj.

$$e' = Blv = B_m lv \sin \alpha = B_m lv \sin \omega t.$$

Keeru aktiivküljed on ühendatud jadamisi, seega keerus indutseeritud emj.

$$e = 2e' = 2B_m lv \sin \omega t.$$

Joonisel 5-3 on toodud elektromotoorjõudude $e = f(t)$ ja $e' = f(t)$ graafikud.



Joon. 5-3. Vahelduv-elektromotoorjõudude graafikud.

Kui ankrul on ühe keeru asemel pool, milles on w keerdu, siis summaarne emj.

$$e = 2B_m lwv \sin \omega t,$$

s. o. w korda suurem kui ühe keeru emj.

Kui $\sin \omega t = 1$, siis on emj. maksimaalne:

$$E_m = 2B_m lwv. \tag{5-3}$$

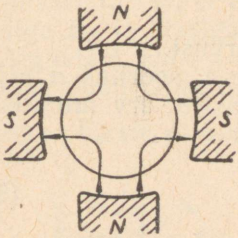
Seega võime ankru poolis indutseeritava emj. avaldada järgmiselt:

$$e = E_m \sin \omega t. \tag{5-4}$$

Eeltoodust järeldub, et hetkel $t = 0$ keeru tasapind ühtib neutraaltasapinnaga, sest $\alpha = \omega t = 0$.

Kui ankur pöörleb ühtlaselt, siis täispöörde $\alpha = 2\pi$ tegemisel toimub emj. muutumise täielik tsükkel, mis vastab ühele perioodile $t = T$. Seega võime nurkkiiruse avaldada järgmiselt:

$$\omega = \frac{\alpha}{t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f. \tag{5-5}$$



Joon. 5-4. Kahe pooluspaariga vahelduvvoolugeneraator.

Ühe pooluspaariga generaatorite kõrval kasutatakse suurema pooluspaaride arvuga generaatoreid. p pooluspaariga generaatoril (joonis 5-4) toimub ühe täispöörde vältel p emj. muutumise tsüklit, sest ühe pöörde kestel liigub iga aktiivjuhe p korda põhja- ja p korda lõunapooluse alt läbi.

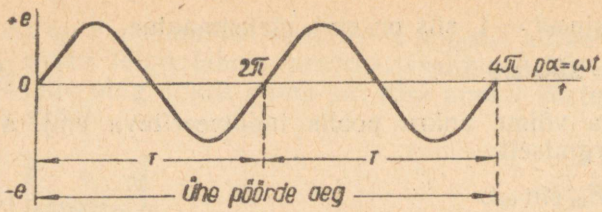
Joonisel 5-5 on toodud graafik $e = f(t)$ kahe pooluspaariga generaatori ankru ühe pöörde kohta.

Siinuselise emj. saamiseks peab p pooluspaariga generaatori ankru pinnal magnetvoo tihedus muutuma seaduse

$$B = B_m \sin p\alpha \tag{5-6}$$

kohaselt. Korrutist $p\alpha$ nimetatakse elektriliseks nurgaks erinevalt geomeetrilisest nurgast α.

Elektrilise nurga ja aja suhet $\frac{p\alpha}{t} = \omega$ nimetatakse



Joon. 5-5. Kahe pooluspaariga generaatori vahelduvemj. graafik.

elektriliseks nurkkiiruseks või nurksagedu seks. Kui $t = T$, siis $p\alpha = 2\pi$; järelikult mitmepooluselise generaatori nurksagedus

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \tag{5-7}$$

ei sõltu generaatori pooluspaaride arvust.

Kui ankur pöörleb kiirusega n, s. t. sooritab n pööret minutis, siis indutseeritava emj. tsüklite arv minutis on pn, tsüklite arv sekundis, s. o. sagedus

$$f = \frac{pn}{60}. \tag{5-8}$$

Nurksagedus

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{pn}{60}. \tag{5-9}$$

Näide 5-1. Auruturbiini jõul töötaval generaatoril on kaks pooluspaari ($p = 2$). Tema ankur pöörleb kiirusega 1500 p/min. Leida vahelduvvoolu sagedus.

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

Näide 5-2. Mitu pooluspaari peab olema hüdroturbiini võllil asuval generaatoril, kui turbiini nimikiirus on 250 p/min. ja vajalik generaatori sagedus $f = 50$ Hz.

Vastavalt seosele (5-8)

$$p = \frac{f \cdot 60}{n} = \frac{50 \cdot 60}{250} = 12 \text{ paari}.$$

5-3. Faasinihe

Kui pöörlevale ankrule on kinnitatud kaks teineteise suhtes mingi nurga võrra nihutatud ühesugust keerdu *1* ja *2* (joon. 5-6), siis indutseeritakse neis ühesuguse sageduse ja amplituudiga elektromotoorjõud. Kuna aga keerud on teineteise suhtes pööratud, siis saavutab emj. neis maksimaalväärtuse erinevatel hetkedel.

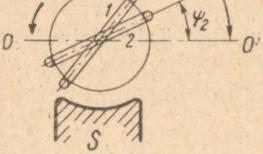
Pöörlemisel vastu kellaosuti liikumise suunda asuvad keerud alghetkel ($t = 0$) neutraaltasapinna OO' suhtes nurkade ψ_1 ja ψ_2 all ning keerdudes indutseeritavad elektromotoorjõud avalduvad suvalisel hetkel t järgmiselt:

$$e_1 = E_m \sin(\omega t + \psi_1) \text{ ja } e_2 = E_m \sin(\omega t + \psi_2). \quad (5\text{-}10)$$

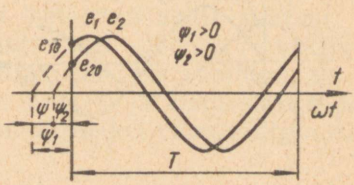
Viimastes avaldistes esinevat nurka $(\omega t + \psi)$ nimetatakse faasinurgaks ehk faasiks. Seega järeldub avaldisest (5-10), et emj. hetkväärtus on määratud amplituudiga E_m ja faasiga.

Alghetkel, kui $t = 0$, on keerdudes indutseerivad elektromotoorjõud järgmised:

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



Joon. 5-6. Kaks generaatori ankrumähise keerdu.



Joon. 5-7. Kahe vahelduv-emj. graafikud.

Joonisel 5-7 on need elektromotoorjõud kujutatud algordinaatidena.

Hetkel $t = 0$ elektromotoorjõudude suurusi määravaid elektrilisi nurki ψ_1 ja ψ_2 nimetatakse algfaasinurkadeks ehk algfaasideks. Positiivne algfaas kantakse koordinaatide alguspunktist vasakule, negatiivne — paremale.

Kahe siinuselise suuruse algfaaside vahet nimetatakse faasinihkenurgaks e. faasinihkeks:

$$\psi = \psi_1 - \psi_2. \qquad (5\text{-}11)$$

Jagades faasinihke nurksagedusega, saame ajalise nihke:

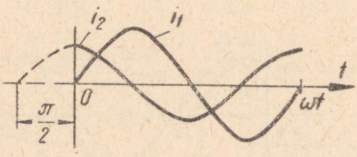
$$\frac{\psi}{\omega} = \frac{\psi T}{2\pi} = t_{12}.$$

See on aeg, mille võrra ühe siinuselise suuruse periood algab varem kui teisel.

Perioodi alguseks loetakse hetke, millal siinuselise suuruse hetkväärtus on null ja see hakkab kasvama positiivses suunas.

Suurust, mille perioodi algus saabub varem kui teisel, nimetatakse eelnevaks, seda suurust aga, mille perioodi algus on hiljem, nimetatakse mahajäävaks. Näiteks eelneb emj. e_1 (joon. 5-7) e_2 suhtes nurga ψ (aja t_{12}) võrra ehk teisiti väljendades emj. e_2 jääb e_1-st maha nurga ψ (aja t_{12}) võrra.

Kui kahel siinuselisel suurusel on ühesugused algfaasid, s. t. ühtivad perioodide algused, siis öeldakse, et nad on faasis ($\psi = 0$).



Joon. 5-8. Kahe vahelduvvoolu graafikud.

Voolud i_1 ja i_2 (joon. 5-8) on teineteise suhtes nihutatud veerand perioodi, s. o. faasinurga 90° võrra. Voolul i_1 on nulline algfaas, voolul i_2 on aga algfaas $\frac{\pi}{2} = 90°$. Seega

$$i_1 = I_{m1} \sin \omega t;\ i_2 = I_{m2} \sin (\omega t + \pi/2).$$

Siinuseline suurus algfaasiga $\pi/2$ on samane nullise algfaasiga koosinuselise suurusega $i_2 = I_{m2} \cos \omega t$.

Kui kahe siinuselise suuruse faasinihe teineteise suhtes on pool perioodi, siis öeldakse, et nad on vastandfaasis

Näide 5-3. On antud elektromotoorjõud

$e_1 = E_m \sin(\omega t + 60°)$; $e_2 = E_m \sin \omega t$.

Sagedus $f = 50$ Hz.
Leida e_1 ja e_2 vaheline faasinihe ja ajaline nihe.
Väljendame algfaasid ψ_1 ja ψ_2 radiaanides:

$$\psi_1 = \frac{60 \cdot 2\pi}{360} = \frac{\pi}{3}; \quad \psi_2 = 0.$$

Faasinihkenurk

$$\psi = \psi_1 - \psi_2 = \frac{\pi}{3}.$$

Periood

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

ning e_1 ja e_2 vaheline ajaline nihe

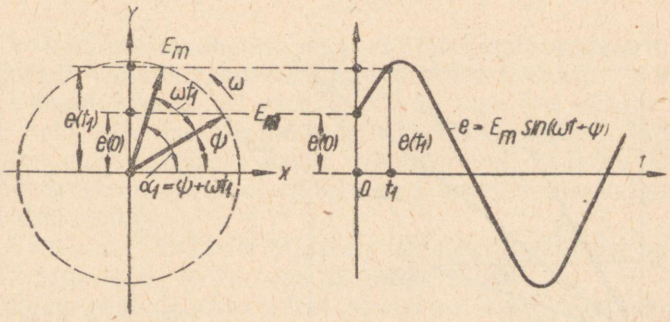
$$t_{12} = \frac{\psi}{\omega} = \frac{\pi T}{3 \cdot 2\pi} = \frac{T}{6} = 0{,}0033 \text{ s}.$$

5-4. Vektordiagramm

Siinuselisi suurusi kujutatakse kas sinusoidide või pöörlevate vektorite abil.

Esimest moodust kasutasime paragrahvides 5-1, 5-2 ja 5-3. See võimaldab leida amplituudi, algfaasi ja perioodi, s. o. kõiki siinuselist suurust iseloomustavaid suurusi.

Siinuselise suuruse kujutamisel pöörleva vektorina saame vektori pikkuse korrutamisel mastaabiteguriga siinuselise suuruse amplituudi. Vektori ja abstsisstelje positiivse suuna vaheline nurk on alghetkel võrdne algfaasiga,



Joon. 5-9. Siinuselise suuruse kujutamine pöörleva vektori abil.

vektori pöörlemise nurkkiirus aga võrdne nurksagedusega. Pöörleva vektorina kujutatud siinuselise suuruse hetkväärtus on määratud vektori projektsiooniga ordinaatteljele.

Näiteks emj. $e = E_m \sin(\omega t + \psi)$ kujutamiseks paigutatakse abstsisstelje positiivse suuna suhtes nurga ψ all (joon. 5-9) vektor, mille pikkus vastab valitud mastaabis maksimaalväärtusele E_m. Kui vektor pöörleb positiivses suunas (joon. 5-9) nurkkiirusega ω, siis tema projektsioonid ordinaatteljele (Y-teljele) annavad meile emj. hetkväärtused vastavatel hetkedel, sest nad kujutavad valitud mastaabis suurust

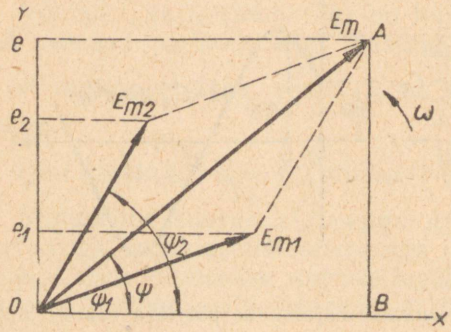
$$E_m \sin \alpha = E_m \sin(\omega t + \psi).$$

Graafikul (joon. 5-9) on hetkele t_1 vastav emj. väärtus kujutatud ordinaadina $e(t_1)$, mis on võrdne vastaval hetkel abstsisstelje suhtes nurga $\alpha_1 = (\omega t_1 + \psi)$ all asuva pöörleva vektori projektsiooniga Y-teljele.

Üht või mitut ühesuguse sagedusega siinuselist suurust kujutavat vektorit nimetatakse vektordiagrammiks.

Vektordiagrammi moodustavate vektorite pöörlemisel jääb nende vastastikune asend endiseks. Tavaliselt pakub huvi faasinihe üksikute suuruste vahel. Sellest lähtudes valitakse vektordiagrammi konstrueerimisel esimese vektori suund vabalt, ülejäänud aga paigutatakse tema suhtes nurkade all, mis on võrdsed vastavate faasinihkenurkadega.

Vektordiagramme kasutatakse laialdaselt vahelduvvooluahelas toimuvate protsesside kirjeldamisel.



Joon. 5-10. Kahe vektori liitmine.

Joonisel 5-10 on näidatud kaks elektromotoorjõu vektorit E_{m1} ja E_{m2} ja nende geomeetriline summa — summaarse elektromotoorjõu vektor E_m hetkel $t = 0$. Mistahes hetkel on pöörlevate vektorite E_{m1} ja E_{m2} projektsioonide summa Y-teljel võrdne summaarse vektori E_m projektsiooniga samale teljele, s. o. $e = e_1 + e_2$, sest vektorite vastastikune asend pöörlemisel ei muutu.

Kahe võrdse sagedusega siinuselise suuruse liitmisel saame sama sagedusega siinuselise suuruse, mille amplituudi annab meile summaarse vektori pikkus:

$$\bar{E}_m = \bar{E}_{m1} + \bar{E}_{m2}. \tag{5-12}$$

Kriipsud tähtede kohal näitavad, et suurused on vektorid. Seega toimub nende liitmine geomeetriliselt rööpküliku (kolmnurga) juhise kohaselt.

Summaarse suuruse algfaas (joon. 5-10) määratakse valemi

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{AB}{OB} = \frac{E_{m1} \sin \psi_1 + E_{m2} \sin \psi_2}{E_{m1} \cos \psi_1 + E_{m2} \cos \psi_2} \tag{5-13}$$

järgi.

Kahe siinuselise suuruse lahutamine toimub nagu nende liitmine, kusjuures lahutatav suurus võetakse vastupidise märgiga.

Seega

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

5-5. Voolu ja pinge efektiivväärtused

Vahelduvvooluahelate arvutus lihtsustub tunduvalt, kui kasutada vahelduvvoolu efektiivväärtuse mõistet.

Vahelduvvoolu e f e k t i i v v ä ä r t u s on võrdne sellise ekvivalentse alalisvoolu väärtusega, mis, läbides samasugust takistust nagu vahelduvvool, eraldab selles vahelduvvoolu perioodi vältel sama suure soojushulga kui vahelduvvoolgi.

Vastavalt ГОСТ-ile tähistatakse efektiivväärtusi suurte tähtedega, s. o. voolu I-ga ja pinget U-ga.

Mõõteriistade skaaladele kantakse alati voolude või pingete efektiivväärtused.

Kui vool muutub siinuseliselt, siis on ta efektiivväärtus võrdne 0,707 voolu amplituudväärtusega. Seega

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{I_m}{1{,}41} = 0{,}707\ I_m. \qquad (5\text{-}14)$$

Sama seos kehtib ka siinuselise pinge puhul:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707\ U_m. \qquad (5\text{-}15)$$

Näitame toodud vahekordade õigsust. Alalisvoolu poolt vahelduvvoolu perioodi T vältel takistis r eraldatav soojushulk

$$Q' = I^2 rT.$$

Vahelduvvoolu poolt samas takistis ja sama aja T vältel eraldatava soojushulga võime avaldada vahelduvvoolu võimsuse keskväärtuse P kaudu:

$$Q'' = PT.$$

Kui $Q' = Q''$, siis

$$I^2 rT = PT. \qquad (5\text{-}16)$$

Vastavalt meie poolt antud definitsioonile on ekvivalentse alalisvoolu väärtus I võrdne vahelduvvoolu efektiivväärtusega. Seega vahelduvvoolu efektiivväärtus

$$I = \sqrt{\frac{P}{r}}. \qquad (5\text{-}17)$$

Siinuselise voolu võimsuse hetkväärtus

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

Kuna $\sin^2 \alpha = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\alpha$, siis saame, et

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

Seega on siinuselise voolu võimsuse hetkväärtus esitatav kahe liidetava, s. o. alaliskomponendi $1/2\ I_m^2 r$ ja siinuseliselt muutuva vahelduvkomponendi summana.

Järelikult on võimsuse keskväärtus siinuselise voolu puhul võrdne võimsuse alaliskomponendiga

$$P = 1/2\ I_m^2 r,$$

sest siinuselise komponendi $1/2\ I_m^2 r \cos 2\omega t$ perioodi kohta on võrdne nulliga.

Siinuselise vahelduvvoolu efektiivväärtus (5-17)

$$I = \sqrt{\frac{P}{r}} = \sqrt{\frac{\frac{I_m^2 r}{2}}{r}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707\, I_m.$$

Kuna siinuseliste voolude ja pingete efektiivväärtused on $\sqrt{2}$ korda väiksemad vastavatest amplituudväärtustest, siis vektor, mis ühes mastaabis annab meile amplituudväärtuse, annab teises mastaabis efektiivväärtuse. Edaspidi lähtume vektorite mastaapide valikul efektiivväärtusest.

Näide 5-4. Võrku lülitatud voltmeeter näitab pinget 380 V. Leida võrgupinge amplituud.

$U_m = \sqrt{2}\,U = 1{,}41 \cdot 380 = 536$ V.

5-6. Üldisi märkusi vahelduvvooluahelate kohta

Mistahes elektriahelal on järgmised parameetrid: takistus r, induktiivsus L ja mahtuvus C.

Alalisvooluahelais on konstantse pinge puhul vool, võimsus ning energiavaru elektri- ja magnetväljas muutumatud.

Kui ahela klemmidel on vahelduvpinge, siis läbib teda vahelduvvool ning elektri- ja magnetväljade energiad muutuvad pidevalt.

Tehnikas tuleb ette ahelaid, milledes toimuvaid füüsikalisi protsesse iseloomustatakse vaid ühega parameetreist r, L või C, sest teiste parameetrite mõju on niivõrd väike, et selle võime arvestamata jätta.

Näiteks võib hõõglampi, soojendusriista või reostaati vaadelda kui ahelat takistusega r. Mahtuvuse ja induktiivsuse mõju pole vaja arvestada.

Koormamata transformaatorit võime iseloomustada vaid induktiivsusega, jättes arvestamata ta takistuse ja mahtuvuse.

Pingestatud, ent vooluta kaablit võime aga iseloomustada vaid mahtuvusega, sest induktiivsuse ja takistuse mõju on selles ahelas tühine.

5-7. Takistusega vooluring

a) Pinge ja vool

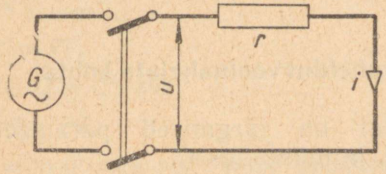
Joonisel 5-11 kujutatud vooluringi takistus on r. Kui vooluringi klemmidel on siinuseline pinge

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

siis, vastavalt Ohmi seadusele, vool

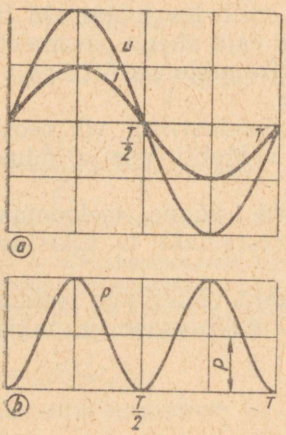
$$i = \frac{u}{r} = \frac{U_m}{r} \sin \omega t = I_m \sin \omega t.$$

Vool muutub siinuseliselt ja on pingega faasis.

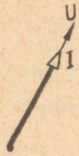


Joon. 5-11. Takistusega vooluring.

Joonisel 5-12 on näidatud pinge ja voolu muutumine ühe perioodi vältel, joonisel 5-13 on aga toodud takistusega vooluringi vektordiagramm.



Joon. 5-12. Takistusega vooluringi voolu, pinge ja võimsuse graafikud.



Joon. 5-13. Takistusega vooluringi vektordiagramm.

Vaadeldava vooluringi puhul kehtib Ohmi seadus mitte ainult hetk- ja maksimaalväärtustele: $i = u/r$ ja $I_m = U_m/r$, vaid ka efektiivväärtustele, sest $I_m/\sqrt{2} = I$ ja $U_m/\sqrt{2} = U$. Järelikult

$$I = \frac{U}{r}. \tag{5-18}$$

b) Võimsus

Ühe ja sama hetke voolu ja pinge hetkväärtuste korrutis kujutab endast võimsuse hetkväärtust

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

Võimsuse hetkväärtus on positiivne mistahes voolu suuna puhul (joon. 5-12, *a* ja *b*), sest elektrienergia muundub soojuseks sõltumata voolu suunast.

Teades, et $\sin^2 \omega t = 1/2 - 1/2 \cos 2\omega t$, võime kirjutada, et

$$p = I_m^2 r \sin^2 \omega t = \frac{1}{2} I_m^2 r \cos 2\omega t = I^2 r - I^2 r \cos 2\omega t,$$

sest

$$\frac{1}{2} I_m^2 = (I_m/\sqrt{2})^2 = I^2.$$

Muutumatu suurus

$$P = I^2 r = UI \tag{5-19}$$

annab meile keskmise võimsuse perioodi vältel ja seda nimetatakse aktiivvõimsuseks. Takistust r, millest tingituna elektrienergia muundub soojuseks keskmise kiirusega P, nimetatakse aktiivtakistuseks.

Aktiivvõimsust mõõdetakse vattides.

5-8. Induktiivsusega vooluring

a) Pinge ja vool

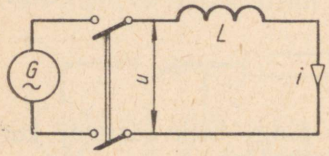
Joonisel 5-14 kujutatud vooluringil on induktiivsus ja tühiselt väike aktiivtakistus ($r = 0$).

Kui vooluringis kulgeb vool

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

siis indutseeritakse temas endainduktsiooni emj. (§ 3-16)

$$e_L = -L \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}.$$

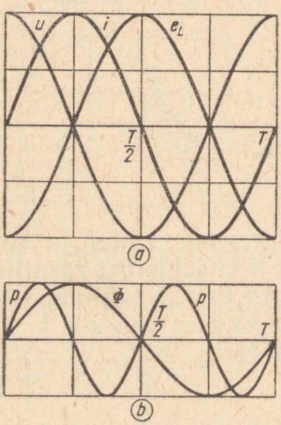


Joon. 5-14. Induktiivsusega vooluring.

Vastavalt Kirchhoffi teisele seadusele suletud vooluringis $u + e_L = ir = 0$, järelikult pinge induktiivpooli klemmidel

$$u = -e_L = L \frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}. \qquad (5\text{-}20)$$

Viimane võrrand näitab, et toitepinge mõjul tekib vooluringis vool, mis indutseerib igal hetkel toitepingega



Joon. 5-15. Induktiivsusega vooluringi pinge, voolu, endainduktsiooni emj., magnetvoo ja võimsuse graafikud.

võrdse, ent vastassuunalise endainduktsiooni elektromotoorjõu (vool indutseerib emj., mis tasakaalustab pinge).

Võrrand (5-20) näitab, et pinge induktiivpoolil on võrdeline voolu ajas muutumise kiirusega.

Siinuselise voolu (joon. 5-15) muutumise kiirus

$$\frac{di}{dt} = I_m \frac{d \sin \omega t}{dt} = \omega I_m \cos \omega t$$

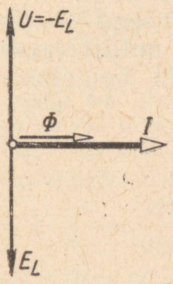
on võrdeline $\cos \omega t$-ga. Järelikult, kui voolul on maksimaalväärtus, siis on tema muutumise kiirus null, kui aga vool läbib nullväärtust, siis on tema muutumise kiirus maksimaalne (joon. 5-15).

Pinge induktiivpoolil

$$u = L \frac{di}{dt} = L\omega I_m \cos \omega t =$$

$$= L\omega I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right). \qquad (5\text{-}21)$$

Seega on siinuselise voolu puhul pinge induktiivpoolil samuti siinuseline, ainult ta edestab voolu nurga $\frac{\pi}{2}$ võrra (joon. 5-15).



Joon. 5-16. Induktiivsusega vooluringi vektordiagramm.

Vooluringis indutseeritud endainduktsiooni emj.

$$e_L = -u = -L\omega I_m \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) =$$

$$= L\omega I_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \qquad (5\text{-}22)$$

on toitepinge suhtes ajaliselt nihutatud poole perioodi võrra.

Induktiivsusega vooluringi vektordiagramm on toodud joonisel 5-16.

b) Induktiivtakistus

Avaldistest (5-21) ja (5-22) järeldub, et pinge maksimaalväärtus ja temaga võrdse emj. maksimaalväärtus

$$U_m = E_{Lm} = L\omega I_m. \tag{5-23}$$

Jagades toodud avaldised $\sqrt{2}$-ga, saame pinge ja emj. efektiivväärtused

$$U = E_L = L\omega I, \tag{5-24}$$

millest voolu efektiivväärtus

$$I = \frac{U}{\omega L} = \frac{U}{x_L}. \tag{5-25}$$

Pinge ja voolu suhtega määratud suurust

$$\frac{U}{I} = \omega L = 2\pi f L = x_L \tag{5-26}$$

nimetatakse induktiivtakistuseks (induktiivseks reaktiivtakistuseks), mille mõõtühikuks on Ω.

Induktiivtakistus on võrdeline induktiivsusega ja vahelduvvoolu sagedusega. Sageduse muutmisel nullist (alalisvool) lõpmatuseni muutub x_L samuti nullist lõpmatuseni.

c) Võimsus

Võimsuse hetkväärtus

$$p = ui = U_m \cos \omega t \cdot I_m \sin \omega t.$$

Kuna $\sin \omega t \cos \omega t = \frac{1}{2} \sin 2\omega t$, siis

$$p = \frac{1}{2} U_m I_m \sin 2\omega t = UI \sin 2\omega t. \tag{5-27}$$

Joonisel 5-15 on toodud võimsuse hetkväärtuse graafik.

Induktiivsusega vooluringis muutub võimsuse hetkväärtus kahekordse sagedusega, saavutades kord posi-

tiivse maksimumi $UI = I^2\omega L$, kord sama suure negatiivse maksimumi.

Voolu ja järelikult ka magnetvoo kasvamisel (esimene ja kolmas veerandperiood, joon. 5-15), sõltumatuna nende suunast, kasvab magnetvälja energia nullist maksimaalväärtuseni (§ 3-17)

$$W_m = \frac{1}{2} L I_m^2 = L I^2.$$

See toimub generaatori poolt antava energia arvel. Vooluring töötab tarbijana ja võimsus on seega positiivne.

Voolu ja temaga koos ka magnetvoo vähenemisel (teine ja neljas veerandperiood, joon. 5-15) muutub magnetvälja energia maksimaalväärtusest nullini. Energia antakse tagasi generaatorisse. Neil perioodi osadel töötab induktiivsusega vooluring generaatorina, tarbides negatiivset võimsust.

Võimsuse keskväärtus P on puhtinduktiivses vooluringis võrdne nulliga.

Induktiivsusega vooluringi võimsuse Q maksimaalväärtust nimetatakse reaktiivvõimsuseks.

Võrrandist (5-27) järeldub, et

$$Q = \frac{1}{2} U_m I_m = UI = I^2\omega L = \omega W_m. \qquad (5\text{-}28)$$

Reaktiivvõimsuse mõõtühikut nimetatakse varriks, ühiku tähis on var (sõnadest volt, amper ja reaktiivne).

Näide 5-5. Pool induktiivsusega 0,01 H on lülitatud võrku, mille pinge on 127 V ja sagedus 50 Hz.

1. Leida reaktiivtakistus, vool vooluringis ja reaktiivvõimsus.

$$x_L = 2\pi f L = 2\pi \cdot 50 \cdot 0{,}01 = 3{,}14\ \Omega;$$

$$I = \frac{U}{x_L} = \frac{127}{3{,}14} = 40{,}5\ \text{A};$$

$$Q = UI = 127 \cdot 40{,}5 = 5143{,}5\ \text{var}.$$

2. Leida reaktiivtakistus ja vool sagedusel 500 Hz.

$$x_L = 2\pi f L = 2\pi \cdot 500 \cdot 0{,}01 = 31{,}4\ \Omega;$$

$$I = \frac{U}{x_L} = \frac{127}{31{,}4} = 4{,}05\ \text{A}.$$

d) Elektromotoorjõu ja magnetvoo vaheline seos

Terast sisaldavate vahelduvvooluahelate arvutamisel avaldatakse indutseeritav elektromotoorjõud sageli magnetvoo kaudu.

Endainduktsiooni aheldusvoo amplituud

$$\Psi_m = LI_m.$$

Kui kõik kontuuri keerud ahelduvad ühe magnetvooga, siis

$$\Psi_m = w\Phi_m.$$

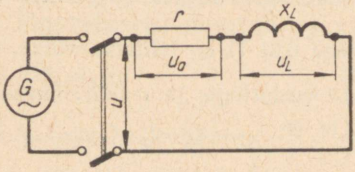
Sel juhul võime endainduktsiooni emj. või temaga võrdse pinge avaldada järgmiselt:

$$U = E_L = \omega L \frac{I_m}{2} = 2\pi f \frac{w\Phi_m}{\sqrt{2}} = 4{,}44\ f w \Phi_m. \qquad (5\text{-}29)$$

5-9. Aktiivtakistuse ja induktiivsusega vooluring

a) Pinge ja vool

Joonisel 5-17 kujutatud vooluringil on nii aktiivtakistus r kui ka induktiivsus L. Sellise vooluringi moodustab pingeallikaga ühendatud mistahes elektromagnetilise seadise või aparaadi pool.



Joon. 5-17. Aktiivtakistuse ja induktiivsusega vooluring.

Kui vooluringi läbib vahelduvvool i, siis poolis indutseeritakse endainduktsiooni emj. e_L.

Vastavalt Kirchhoffi teisele seadusele

$$u + e_L = ir,$$

millest vooluringi klemmipinge

$$u = ir - e_L = ir + L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t} = u_a + u_L.$$

Esimest liidetavat $u_a = ir$, mille hetkväärtus on võrdeline vooluga, nimetatakse aktiivpingeks, teist liidetavat $u_L = -e_L = L\frac{di}{dt}$ nimetatakse aga reaktiivpingeks (antud juhul induktiivpingeks). Viimase komponendi hetkväärtus on võrdeline voolu muutumise kiirusega.

Kui vool muutub siinuseliselt, s. o.

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

siis aktiivpinge

$$u_a = ir = I_m r \sin \omega t = U_{am} \sin \omega t$$

muutub samuti siinuseliselt ja on vooluga faasis.

Aktiivpinge amplituudväärtus

$$U_{am} = I_m r$$

ja efektiivväärtus

$$U_a = Ir.$$

Reaktiivpinge

$$u_L = L\frac{di}{dt} = \omega L I_m \cos \omega t = U_{Lm} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

muutub samuti siinuseliselt, kuid edestab voolu 90° võrra.

Reaktiivpinge amplituudväärtus

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

ja efektiivväärtus

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

Vooluringi klemmipinge

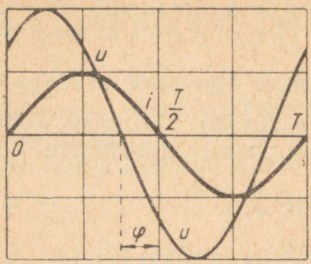
$$u = u_a + u_L = U_{am} \sin \omega t + U_{Lm} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) =$$

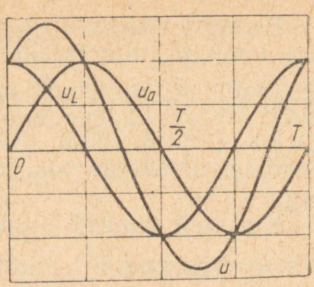
$$= U_m \sin(\omega t + \varphi). \qquad (5\text{-}30)$$

Ta muutub siinuseliselt ja on voolust ees nihkenurga φ võrra.

Joonisel 5-18 on toodud i, u_a, u_L ja u graafikud, joonisel 5-19 aga vooluringi vektordiagramm. Pingete U, U_a ja U_L vektorid moodustavad viimasel täisnurkse pingekolmnurga, kust järeldub nende suuruste vaheline seos:

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2}. \qquad (5\text{-}31)$$





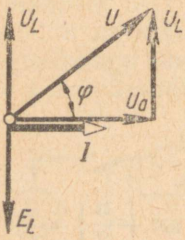
Joon. 5-18. Aktiivtakistuse ja induktiivsusega vooluringi voolu ja pinge graafikud.

Analoogiline seos on ka amplituudväärtuste vahel:

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

Nihkenurk vooluringi klemmipinge ja voolu vahel on leitav pingekolmnurgast järgmiste valemite abil:

$$\cos\varphi = \frac{U_a}{U} \quad \text{ja} \quad \operatorname{tg}\varphi = \frac{U_L}{U_a}.$$



Joon. 5-19. Aktiivtakistuse ja induktiivsusega vooluringi vektordiagramm.

Mida suurem on reaktiivpinge võrreldes aktiivpingega, seda suurema faasinihkenurga võrra jääb vool maha vooluringi klemmipingest.

b) Vooluringi takistus

Võrrandit (5-31) võime teisendada kujule

$$U = \sqrt{(Ir)^2 + (Ix_L)^2} = I\sqrt{r^2 + x_L^2} = Iz,$$

millest vool

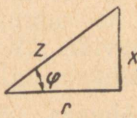
$$I = \frac{U}{z} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x_L^2}}. \qquad (5\text{-}32)$$

Suurust

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2} = \sqrt{r^2 + (\omega L)^2} \qquad (5\text{-}33)$$

nimetatakse vooluringi *näivtakistuseks*.

Takistusi r, x_L ja z võib graafiliselt kujutada täisnurkse *takistuskolmnurga* (joon. 5-20) külgedena.



Joon. 5-20. Aktiivtakistuse ja induktiivsusega vooluringi takistuskolmnurk.

Selle kolmnurga saame pingekolmnurgast, vähendades tema külgi I korda.

Kuna pingekolmnurk ja takistuskolmnurk on sarnased, siis on pinge ja voolu vaheline nihkenurk φ võrdne takistuskolmnurga külgede z ja r vahelise nurgaga. Seega

$$\cos\varphi = \frac{U_a}{U} = \frac{r}{z} \quad \text{või} \quad \operatorname{tg}\varphi = \frac{U_L}{U_a} = \frac{x_L}{r}. \qquad (5\text{-}34)$$

c) Võimsused

Võimsuse hetkväärtus

$$p = ui = U_m \sin(\omega t + \varphi) I_m \sin \omega t =$$
$$= U_m I_m \sin(\omega t + \varphi) \sin \omega t.$$

Kuna

$$\sin(\omega t + \varphi) \sin \omega t = \frac{1}{2}\cos\varphi - \frac{1}{2}\cos(2\omega t + \varphi),$$

siis, pidades silmas seost (5-28), võime võimsuse hetkväärtuse avaldada kujul

$$p = UI\cos\varphi - UI\cos(2\omega t + \varphi). \qquad (5\text{-}35)$$

Toodud avaldis koosneb kahest liikmest: ajast sõltumatust alaliskomponendist $UI\cos\varphi$ ja siinuselisest vahel-

duvkomponendist $UI\cos(2\omega t + \varphi)$. Vahelduvvoolu ahelate arvutamisel kasutatakse tavaliselt võimsuse keskväärtust perioodi ulatuses, mis on võrdne alaliskomponendiga $UI\cos\varphi$, sest siinusfunktsiooni keskväärtus perioodi ulatuses on null.

Seega on vooluringi võimsuse keskväärtus võrdne pinge ja voolu efektiivväärtuste ning $\cos\varphi$ korrutisega, s. o.

$$P = UI\cos\varphi. \tag{5-36}$$

Et

$$U\cos\varphi = U\frac{r}{z} = Ir = U_a,$$

siis

$$P = U_a I = I^2 r.$$

Järelikult on vooluringi keskmine võimsus võrdne aktiivtakistusel avalduva võimsuse keskväärtusega. Mistahes vooluringi keskmist võimsust nimetatakse seetõttu ka a k t i i v v õ i m s u s e k s.

Vooluringi reaktiivvõimsus (5-28)

$$Q = U_L I = I^2 x_L = I^2 z\sin\varphi = UI\sin\varphi. \tag{5-37}$$

Näeme, et vooluringi r e a k t i i v v õ i m s u s on võrdne pinge ja voolu efektiivväärtuste ning $\sin\varphi$ korrutisega.

Vooluringi n ä i v v õ i m s u s e k s nimetatakse pinge ja voolu efektiivväärtuste korrutist:

$$S = UI. \tag{5-38}$$

Kuna $\sin^2\varphi + \cos^2\varphi = 1$, siis võime kirjutada, et

$$(UI\cos\varphi)^2 + (UI\sin\varphi)^2 = (UI)^2.$$

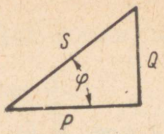
Täpselt sama väljendab seos

$$P^2 + Q^2 = S^2,$$

millest

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \tag{5-39}$$

Võimsusi P, Q ja S võime graafiliselt kujutada täisnurkse kolmnurga (joon. 5-21) külgedena. Seda kolmnurka nimetatakse v õ i m s u s k o l m n u r g a k s ja selle saame pingekolmnurgast, korrutades ta külgi I-ga.



Joon. 5-21. Võimsuskolmnurk.

Aktiiv- ja näivvõimsuse suhet

$$\frac{P}{S} = \cos\varphi \tag{5-40}$$

nimetatakse võimsusteguriks.

Näivvõimsuse mõõtühikuks on voltamper (VA).

Näivvõimsuse mõiste kasutamine on tingitud sellest, et masina või aparaadi konstruktsioon, mass, gabariidid ja maksumus on määratud ta nimi-näivvõimsusega $S_n = U_n I_n$, näivvõimsus S ühes või teises töörežiimis määrab aga masina või aparaadi ärakasutamise astme.

Näide 5-6. 250-voldise pingega ja 50-hertsise sagedusega võrku on lülitatud pool, mille induktiivsus on 51 mH ja aktiivtakistus 12 Ω. Leida järgmised suurused: x_L, z, I, U_a, U_L, $\cos\varphi$ ja P.

$$x_L = 2\pi f L = 2\pi \cdot 50 \cdot 0{,}051 = 16\ \Omega;$$

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2} = \sqrt{12^2 + 16^2} = 20\ \Omega;$$

$$I = \frac{U}{z} = \frac{250}{20} = 12{,}5\ \text{A};$$

$$U_a = Ir = 12{,}5 \cdot 12 = 150\ \text{V};$$

$$U_L = Ix_L = 12{,}5 \cdot 16 = 200\ \text{V};$$

$$\cos\varphi = \frac{r}{z} = \frac{12}{20} = 0{,}6;$$

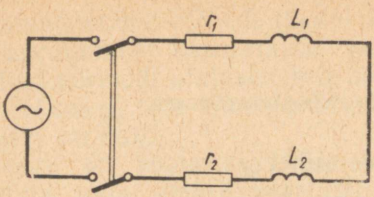
$$P = UI\cos\varphi = 250 \cdot 12{,}5 \cdot 0{,}6 = 1875\ \text{W}.$$

5-10. Aktiivtakistuste ja induktiivsustega mittehargnev vooluring

Kahe jadamisi ühendatud pooli aktiivtakistustest tingitud pinged $U_{a1} = Ir_1$ ja $U_{a2} = Ir_2$ on vooluga I faasis. Poolide reaktiivtakistustest tingitud pinged $U_{L1} = Ix_{L1}$ ja $U_{L2} = Ix_{L2}$ edestavad aga voolu 90° võrra (joon. 5-23).

Pinge kahest poolist koosneva mittehargneva vooluringi klemmidel leiame kolmnurga juhise põhjal:

$$U = \sqrt{(U_{a1} + U_{a2})^2 + (U_{L1} + U_{L2})^2} = \sqrt{U_a^2 + U_L^2}.$$

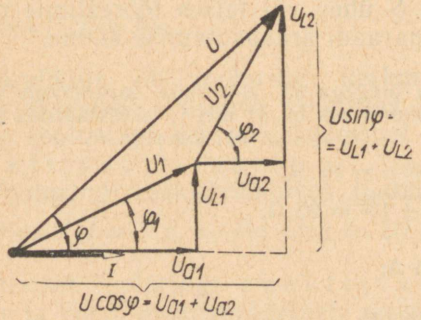


Joon. 5-22. Kahe jadaühenduses pooliga vooluring.

Avaldades pinged voolu ja takistuste kaudu, saame:

$$U = I\sqrt{(r_1 + r_2)^2 + (x_{L1} + x_{L2})^2} = I\sqrt{r^2 + x_L^2} = Iz,$$

kus $r = r_1 + r_2$ on vooluringi aktiivtakistus ja $x_L = x_{L1} + x_{L2}$ on vooluringi reaktiivtakistus.

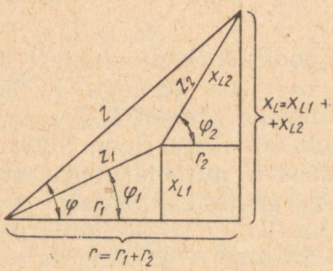


Joon. 5-23. Mittehargneva vooluringi vektordiagramm.

Vooluringi näivtakistus

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2}.$$

Joonisel 5-24 on ta kujutatud täisnurkse takistuskolmnurga hüpotenuusina, mille võib saada vektordiagrammist, vähendades pingekolmnurga iga külge I korda.



Joon. 5-24. Mittehargneva vooluringi takistuskolmnurk.

Vool vooluringis

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

jääb vooluringi klemmipingest maha nihkenurga φ võrra. Viimane on määratav oma koosinuse

$$\cos \varphi = \frac{r}{z}$$

või tangensi

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x_L}{r}$$

abil.

Kahest poolist koosneva vooluringi keskmine võimsus ehk aktiivvõimsus

$$P = P_1 + P_2 = UI \cos \varphi,$$

reaktiivvõimsus

$$Q = UI \sin \varphi$$

ja näivvõimsus

$$S = UI.$$

5-11. Aktiivtakistuste ja induktiivsustega hargnev vooluring

Vool esimeses rööpharus (joon. 5-25)

$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{U}{\sqrt{r_1^2 + x_{L1}^2}}$$

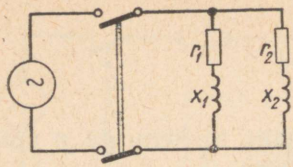
jääb pingest maha nurga võrra, mis on määratav seosest $\operatorname{tg} \varphi_1 = x_{L1}/r_1$.

Vool teises rööpharus (joon. 5-25)

$$I_2 = \frac{U}{z_2} = \frac{U}{\sqrt{r_2^2 + x_{L2}^2}}$$

jääb pingest maha nurga võrra, mille $\operatorname{tg} \varphi_2 = x_{L2}/r_2$.

Hargnevate vooluringide arvutamise lihtsustamiseks lahutatakse iga haru vool komponentideks. Aktiivkomponent (I_a) on pingega faasis, reaktiivkomponent (I_r) on aga pinge suhtes 90° võrra nihutatud.



Joon. 5-25. Kahe rööpühenduses pooliga vooluring.

Esimeses rööpharus on voolu komponendid (joon. 5-26) järgmised:

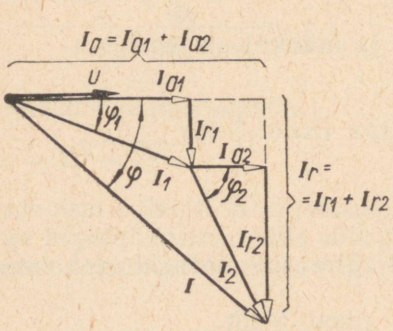
$$I_{a1} = I_1 \cos \varphi_1 \text{ ja } I_{r1} = I_1 \sin \varphi_1. \tag{5-41}$$

Vektordiagrammi konstrueerimisel joonestatakse voolu aktiivkomponendi vektor pinge vektoriga samas suunas. Induktiivse reaktiivkomponendi vektori suuna saame pinge vektori pööramisel 90° võrra kellaosuti liikumise suunas. Voolukolmnurka sulgev vektor ongi esimese haru voolu vektor

$$I_1 = \sqrt{I_{a1}^2 + I_{r1}^2}. \tag{5-42}$$

Teises rööpharus

$$I_{a2} = I_2 \cos \varphi_2; \quad I_{r2} = I_2 \sin \varphi_2; \quad I_2 = \sqrt{I_{a2}^2 + I_{r2}^2}.$$



Joon. 5-26. Hargneva vaheldu-vvooluringi vektordiagramm.

Liitvoolu aktiivkomponent on võrdne harude voolude teineteisega faasis olevate aktiivkomponentide algebralise summaga:

$$I_a = I_{a1} + I_{a2}.$$

Liitvoolu reaktiivkomponent on võrdne harude voolude

ühesuguse faasiga reaktiivkomponentide algebralise summaga:

$$I_r = I_{r1} + I_{r2}.$$

Vooluringi hargnemata osa läbiv liitvool

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}.$$

See vool on nihutatud pinge suhtes nurga φ võrra, mis on leitav seosest

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{I_r}{I_a}.$$

Harude aktiivvõimsuste summaga võrdne kogu vooluringi aktiivvõimsus

$$P = P_1 + P_2 = UI_1 \cos\varphi_1 + UI_2 \cos\varphi_2 = UI \cos\varphi.$$

Analoogiliselt avaldame vooluringi reaktiivvõimsuse:

$$Q = Q_1 + Q_2 = UI_1 \sin\varphi_1 + UI_2 \sin\varphi_2 = UI \sin\varphi.$$

Vooluringi näivvõimsus

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

Näide 5-7. Kahe rööpharuga vooluringi (joon. 5-25) ühes harus on pool, mille aktiivtakistus $r_1 = 1\ \Omega$ ja reaktiivtakistus $x_{L1} = 3\ \Omega$, teises harus aga pool, mille takistused $r_1 = 3\ \Omega$ ja $x_{L2} = 2\ \Omega$. Vooluringi toidame võrgust pingega 230 V. Leida voolud harudes ja liitvool.

$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{230}{\sqrt{1^2 + 3^2}} = 72{,}8\ \text{A};$$

$$I_2 = \frac{U}{z_2} = \frac{230}{\sqrt{3^2 + 2^2}} = 64\ \text{A};$$

$$\cos\varphi_1 = \frac{r_1}{z_1} = \frac{1}{3{,}16} = 0{,}317;$$

$$\sin\varphi_1 = \frac{x_{L1}}{z_1} = \frac{3}{3{,}16} = 0{,}95;$$

$$\cos\varphi_2 = \frac{r_2}{z_2} = \frac{3}{3{,}6} = 0{,}833;$$

$$\sin\varphi_2 = \frac{x_{L2}}{z_2} = \frac{2}{3{,}6} = 0{,}556.$$

Esimese rööpharu voolu komponendid

$I_{a1} = I_1 \cos \varphi_1 = 72{,}8 \cdot 0{,}317 = 23$ A;
$I_{r1} = I_1 \sin \varphi_1 = 72{,}8 \cdot 0{,}95 = 69$ A.

Teise rööpharu voolu komponendid

$I_{a2} = I_2 \cos \varphi_2 = 64 \cdot 0{,}833 = 53{,}2$ A;
$I_{r2} = I_2 \sin \varphi_2 = 64 \cdot 0{,}556 = 35{,}4$ A.

Liitvoolu komponendid

$I_a = I_{a1} + I_{a2} = 23 + 53{,}2 = 76{,}2$ A;
$I_r = I_{r1} + I_{r2} = 69 + 35{,}4 = 104{,}4$ A.

Liitvool

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} = \sqrt{76{,}2^2 + 104{,}4^2} = 129{,}4 \text{ A.}$$

5-12. Mahtuvusega vooluring

a) Pinge ja vool

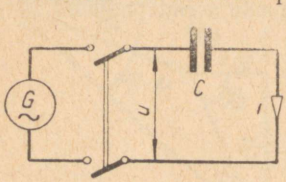
Rakendades kondensaatori (joon. 5-27) klemmidele pinge

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

saame tema plaatidel laengu

$$q = Cu = CU_m \sin \omega t,$$

mis muutub võrdeliselt pingega (joon. 5-28).



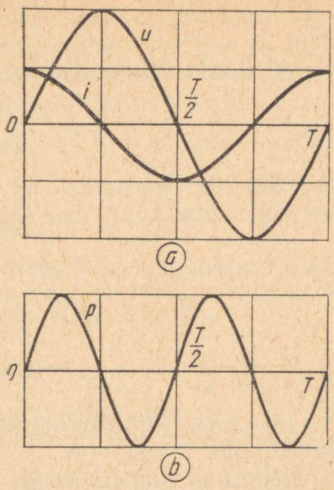
Joon. 5-27. Mahtuvusega vooluring.

Vool kondensaatori vooluringis

$$i = \frac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t} = C \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}t}$$

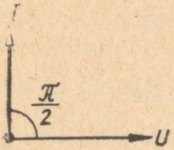
on võrdeline kondensaatori laengu muutumise kiirusega, s. t. ka kondensaatori klemmipinge muutumise kiirusega.

Siinuselisel pingel on suurim muutumise kiirus nullväärtuse läbimise hetkel (joon. 5-28), järelikult on neil ajahetkedel vool kondensaatori vooluringis maksimaalne.



Joon. 5-28. Mahtuvusega vooluringi voolu, pinge ja võimsuse graafikud.

Kui aga pinge saavutab maksimaalväärtuse, siis sel hetkel on tema muutumise kiirus ja ka vool vooluringis võrdsed nullig.



Joon. 5-29. Mahtuvusega vooluringi vektordiagramm.

Niisiis vool kondensaatori vooluringis

$$i = C\frac{du}{dt} = CU_m\frac{d\sin\omega t}{dt} = C\omega U_m\cos\omega t =$$

$$= I_m\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \qquad (5\text{-}43)$$

muutub siinuseliselt ja on pingest ees 90°-se nurga võrra.

Mahtuvusega vooluringi vektordiagramm on toodud joonisel 5-29.

b) Mahtuvustakistus

Avaldisest (5-43) järeldub, et voolu maksimaalväärtus

$I_m = C\,\omega\,U_m$. .

Jagades toodud avaldist $\sqrt{2}$-ga, saame:

$$I = C\omega U = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}} = \frac{U}{x_C}. \qquad (5\text{-}44)$$

Suurust

$$x_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \qquad (5\text{-}45)$$

nimetatakse mahtuvustakistuseks (mahtuvuslikuks reaktiivtakistuseks), mille mõõtühikuks on Ω.

Mahtuvustakistus on pöördvõrdeline mahtuvusega ja vahelduvvoolu sagedusega. Sageduse muutmisel nullist (alalisvool) lõpmatuseni muutub x_C lõpmatusest nullini.

c) Võimsus

Võimsuse hetkväärtus

$p = ui = U_m \sin \omega t\, I_m \cos \omega t = UI \sin 2\omega t.$

Joonisel 5-28, *b* on toodud võimsuse hetkväärtuse graafik.

Mahtuvusega vooluringis muutub võimsuse hetkväärtus kahekordse sagedusega, saavutades kord positiivse maksimumi $UI = I^2/\omega C$, kord absoluutväärtuselt sellega võrdse negatiivse maksimumi. Pinge kasvamisel (esimene ja kolmas veerandperiood, joon. 5-28) suureneb elektrivälja energia nullist maksimaalväärtuseni

$$W_m = \frac{CU_m^2}{2} = CU^2 \qquad (5\text{-}46)$$

generaatori poolt antava energia arvel. Seega töötab kondensaator tarbijana ja tarbitav võimsus on järelikult positiivne.

Pinge vähenemisel (teine ja neljas veerandperiood, joon. 5-28) väheneb elektrivälja energia maksimaalväärtusest nullini. Energia antakse vooluringist tagasi gene-

raatorisse. Neil perioodi osadel töötab mahtuvusega vooluring generaatorina ja tarbib negatiivset võimsust.

Mahtuvusega vooluringi võimsuse maksimaalväärtust nimetatakse r e a k t i i v v õ i m s u s e k s:

$$Q = UI = U^2 \omega C = \omega W_m.$$

Ta iseloomustab generaatori ja mahtuvusega vooluringi energiavahetuse kiirust.

Näide 5-8. Kondensaator mahtuvusega 80 μF on lülitatud võrku, mille pinge on 380 V ja sagedus 50 Hz.

Leida x_C, I ja W_m.

$$x_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 80 \cdot 10^{-6}} = \frac{10^6}{25\,000} = 40\ \Omega;$$

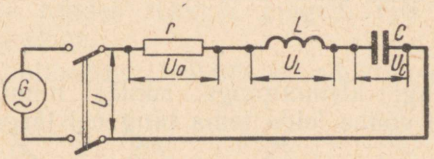
$$I = \frac{U}{x_C} = \frac{380}{40} = 9{,}5\ \text{A};$$

$$W_m = CU^2 = 80 \cdot 10^{-6} \cdot 380^2 = 11{,}5\ \text{J}.$$

5-13. Pingeresonants

Kui mittehargnevas vooluringis (joon. 5-30), millel on aktiivtakistus r, induktiivsus L ja mahtuvus C, kulgeb vool

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



Joon. 5-30. Aktiivtakistuse, induktiivsuse ja mahtuvusega vooluring.

siis koosneb pinge vooluringi klemmidel kolmest komponendist (joon. 5-31): aktiivpingest $U_a = Ir$, mis on vooluga faasis, induktiivpingest $U_L = Ix_L$, mis on voolust 90° ees, ja mahtuvuspingest $U_C = Ix_C$, mis jääb voolust 90° maha. Vektordiagrammist (joon. 5-31) järeldub, et pinget vooluringi klemmidel saab leida täisnurksest kolmnurgast, mille üheks kaatetiks on aktiivpinge vektor, teiseks kaatetiks aga induktiiv- ja mahtuvuspinge vektorite vahe. Seega vooluringi klemmipinge

$$U = \sqrt{U_a^2 + (U_L - U_C)^2}. \qquad (5\text{-}47)$$

Avaldades pinged voolu ja vastavate takistuste korrutistena, saame:

$$U = \sqrt{(Ir)^2 + (Ix_L - Ix_C)^2} =$$

$$= I\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2} = Iz. \qquad (5\text{-}48)$$

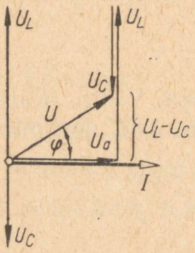
Vool vooluringis

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

Vooluringi näivtakistus

$$z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}. \qquad (5\text{-}49)$$

Seda takistust võib graafiliselt kujutada täisnurkse takistuskolmnurga hüpotenuusina. Selle kolmnurga võib saada pingekolmnurgast, kui viimase külgi vähendada I korda.



Joon. 5-31. Aktiivtakistuse, induktiivsuse ja mahtuvusega vooluringi vektordiagramm juhul, kui $x_L > x_C$.

Vool on vooluringi klemmipinge suhtes nihutatud nurga φ võrra, mille võime leida tema tangensi järgi:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{U_L - U_C}{U_a} = \frac{x_L - x_C}{r}.$$

Vool jääb pingest nurga φ võrra maha, kui $x_L > x_C$ ehk $U_L > U_C$ (joon. 5-31), kui aga $x_L < x_C$ ja $U_L < U_C$, siis eelneb vool nurga φ võrra pingele.

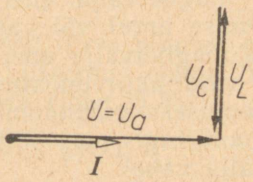
Kui $x_L = x_C$, siis on tegu pingeresonantsiga, mille puhul vooluringi näivtakistus on võrdne aktiivtakistusega:

$$z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2} = r.$$

Sel juhul on vooluringi näivtakistus minimaalne, voolu

efektiivväärtus saavutab aga antud pinge juures maksimumi ja on pingega faasis.

Kuna induktiivpinge U_L ja mahtuvuspinge U_C on võrdsed ja muutuvad teineteisega vastandfaasis (joon. 5-32), siis on vooluringi klemmipinge võrdne aktiivpingega, s. o. $U = U_a$.



Joon. 5-32. Vektordiagramm pingeresonantsi korral.

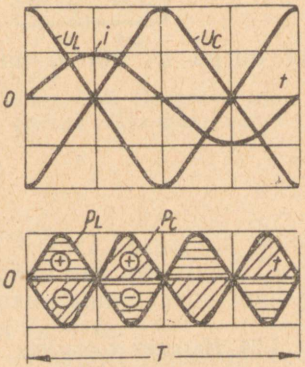
Ühe reaktiivpinge, näiteks U_L, suhe vooluringi klemmipingesse U

$$\frac{U_L}{U} = \frac{Ix_L}{Iz} = \frac{x_L}{z} = \frac{x_L}{r}, \qquad (5\text{-}50)$$

millest $U_L = U\frac{x_L}{r}$.

Juhul kui $x_L = x_C > r$, on induktiivpinge U_L ja temaga võrdne mahtuvuspinge U_C vooluringi klemmipingest U suuremad sama palju kordi, kui mitu korda on x_L suurem r-st. Seega võivad pingeresonantsi korral vooluringi mõnedes osades tekkida pinged, mis ületavad tunduvalt võrgupinge.

Ülaltoodust järeldub, et induktiivsusest ja mahtuvusest



Joon. 5-33. Voolu, pinge ja võimsuse graafikud pingeresonantsi korral.

tingitud pingete hetkväärtused on suuruselt võrdsed ja vastandmärgilised, s. o. $u_L = -u_C$ (joon. 5-33). Sama võib öelda ka induktiivsusest ja mahtuvusest tingitud võimsuste kohta:

$$p_L = iu_L = -p_C = -iu_C.$$

Kerge on tulla järeldusele, et magnetvälja energia kasvab elektrivälja energia vähenemise arvel või vastupidi — elektrivälja energia kasvab magnetvälja energia arvel. Generaator annab energiat vaid aktiivtakistusse, kus toimub tagastamatu energia soojuseks muundumine.

Pingeresonantsi puhul toimub vooluringis perioodiline energiavahetus magnet- ja elektrivälja vahel.

Joonisel 5-33 on toodud voolu i, pingete u_L ja u_C ning võimsuste p_L ja p_C graafikud. Horisontaalselt viirutatud pindalad märgiga «+» kujutavad magnetvälja loomiseks kulutatud energiat, märgiga «—» aga magnetvälja kadumisel eralduvat energiat. Kaldu viirutatud pindalad kujutavad märgi «+» puhul elektrivälja loomiseks kulutatud energiat, märgi «—» puhul aga elektrivälja kadumisel vooluringi tagastatavat energiat.

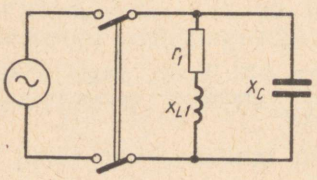
5-14. Vooluresonants

Siinuselise klemmipinge korral on vool hargneva vooluringi (joon. 5-34) esimeses rööpharus, s. o. poolis, avaldatav järgmiselt:

$$I_1 = \frac{U}{z_1} = \frac{U}{\sqrt{r_1^2 + x_{L1}^2}}.$$

See vool jääb pingest maha nurga φ_1 võrra, mille tangens

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{x_{L1}}{r_1}.$$



Joon. 5-34. Hargnev vooluring.

Pooli voolu aktiivkomponent $I_{a1} = I_1 \cos \varphi_1$ ja reaktiivkomponent $I_{r1} = I_1 \sin \varphi_1$.

Vool teises rööpharus, s. o. kondensaatoris,

$$I_2 = \frac{U}{x_C} = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}} = U\omega C = I_C$$

on 90° võrra pingest ees.

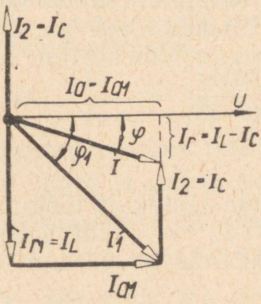
Liitvoolu leiame harude voolude geomeetrilise summana (joon. 5-35):

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2},$$

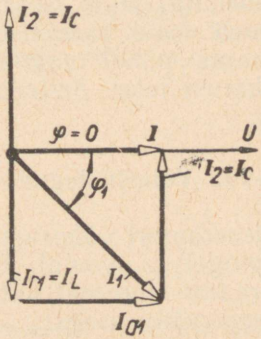
kus $I_a = I_{a1}$ ja $I_r = I_L - I_C = I_{r1} - I_{r2}$.

Liitvoolu nihkenurk pinge suhtes on avaldatav tema tangensi kaudu:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_r}{I_a} = \frac{I_L - I_C}{I_{a1}}.$$



Joon. 5-35. Hargneva vooluringi vektordiagramm.



Joon. 5-36. Vektordiagramm vooluresonantsi korral.

Kui $I_L > I_C$, siis jääb liitvool pingest nurga φ võrra maha, kui aga $I_L < I_C$, siis edestab ta pinget nurga φ võrra. Summaarne vool ja pinge on faasis (joon. 5-36), kui $I_L = I_C$.

Viimasel juhul on vooluringis vooluresonants.

Resonantsi korral liitvool

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} = I_a,$$

s. o. ta on võrdne pooli voolu aktiivkomponendiga, mis on alati väiksem pooli liitvoolust I_1. Seega saame sobiva mahtuvusega kondensaatori lülitamisel rööbiti pooliga olukorra, kus $\varphi = 0$ ja $\cos\varphi = 1$, kusjuures kondensaatori valime sellise, et tema reaktiivvool oleks suuruselt võrdne pooli voolu reaktiivkomponendiga.

Seega väheneb vool generaatoris ja toiteliinis tarbija, antud juhul pooli, konstantse võimsuse $P = UI\cos\varphi = UI$ korral I_1-st I-ni (joon. 5-36).

Siinuselise voolu puhul esimese veerandperioodi kestel vool poolis kasvab ja viimase ümber loodavasse magnetvälja salvestatakse energiat. Järgmise veerandperioodi vältel vool väheneb ja magnetvälja kadumisel energia tagastatakse. Kondensaatorisse salvestub energia sel veerandperioodil, mil pinge kasvab, ja energia tagastamine toimub siis, kui pinge langeb. On arusaadav, et magnetvälja loomiseks vajalik energia vabaneb kondensaatori tühjenemisel ja et elektrivälja loomiseks vajalik energia vabaneb voolu kadumisel poolist. Järelikult läheb vooluresonantsi puhul magnetvälja salvestanud energia ühest rööpharust teise. Sellega seletub voolu vähenemine toiteliinis.

5-15. Võimsustegur

Generaatori võimsust kasutatakse täielikult töötamisel nimipingel ja -voolul, kui $\cos\varphi = 1$. Sel juhul arendab generaator suurimat aktiivvõimsust, mis on võrdne tema nimi-näivvõimsusega:

$$P = U_n I_n \cos\varphi = U_n I_n = S_n. \qquad (5\text{-}51)$$

Kuna aktiivvõimsus on võrdeline $\cos\varphi$-ga, siis põhjustab viimase vähenemine generaatori võimsuse mittetäielikku kasutamist.

Konstantse toitepinge efektiivväärtuse korral muutub konstantse aktiivvõimsusega töötava tarbija vool pöördvõrdeliselt $\cos\varphi$-ga:

$$I = \frac{P}{U}\frac{1}{\cos\varphi} = \text{const}\,\frac{1}{\cos\varphi}.$$

Seega toob tarbijast sõltuva $\cos\varphi$ vähenemine endaga kaasa voolu ja järelikult ka juhtmetes ning toiteallikas soojusena vabaneva võimsuskao kasvu.

Elektrijaamades ülesseatud generaatorite võimsuse mittetäielik kasutamine ja elektrienergia kadude kasvamine $\cos\varphi$ vähenemisel ongi põhjuseks, miks iga seadme $\cos\varphi$-d püütakse viia võimalikult lähedale ühele.

Enamikul elektrimootoreist sõltub $\cos\varphi$ koormusest ja muutub 0,1 ... 0,3-st tühijooksul kuni 0,8 ... 0,9-ni nimikoormusel.

Seega on $\cos\varphi$ tõstmiseks vaja tõsta ülesseatud mootorite koormatust. Peale selle lülitatakse $\cos\varphi$ parandamiseks mootoritega rööbiti kondensaatorid.

Elektriseadmete $\cos\varphi$ tõstmine on väga suure tähtsusega rahvamajanduslik ülesanne, sest selle lahendamine annab meile tohutu hulga seni võrkudes ja generaatoreis madala $\cos\varphi$ tõttu kaduma läinud elektrienergiat ning tagab elektrijaamade suurte võimsustega generaatorite parema ärakasutamise.

Näide 5-9. Võrku pingega 380 V ja sagedusega 50 Hz on lülitatud elektrimootor, mille võimsus on 14 kW ja $\cos\varphi = 0{,}6$.

Seadme $\cos\varphi$ tõstmiseks 0,9-ni tuleb temaga rööbiti ühendada kondensaator. Leida selle kondensaatori vajalik mahtuvus.

Elektrimootori vool

$$I_1 = \frac{P}{U\cos\varphi_1} = \frac{14\,000}{380 \cdot 0{,}6} = 61{,}4 \text{ A}.$$

Trigonomeetrilistest tabelitest saame, et

$\varphi_1 = 53°10'$ ja $\sin\varphi_1 = 0{,}8$.

Elektrimootori voolu reaktiivkomponent

$I_{r1} = I_1 \sin\varphi_1 = 61{,}4 \cdot 0{,}8 = 49{,}1$ A.

Kui $\cos\varphi = 0{,}9$, siis tarbib elektromootorist ja kondensaatorist koosnev seade voolu

$$I_2 = \frac{P}{U\cos\varphi} = \frac{14\,000}{380 \cdot 0{,}9} = 41 \text{ A}.$$

Trigonomeetrilistest tabelitest leiame, et $\cos\varphi = 0{,}9$-le vastav nurk $\varphi = 25°50'$ ning $\sin\varphi = 0{,}436$.

Seadme voolu reaktiivkomponent

$I_{r2} = I_2 \sin\varphi = 41 \cdot 0{,}436 = 17{,}9$ A.

Kondensaatori juurdelülitamisest tingitud voolu reaktiivkomponendi vähenemine on võrdne kondensaatori vooluga

$I_C = I_{r1} - I_{r2} = 49{,}1 - 17{,}9 = 31{,}2$ A.

Kondensaatori reaktiivtakistus

$$x_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot fC} = \frac{U}{I_C} = \frac{380}{31{,}2} = 12{,}2\ \Omega,$$

millest otsitav mahtuvus

$$C = \frac{1}{x_C \cdot 2\pi f} = \frac{1}{12{,}2 \cdot 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50} = 0{,}00026\ \text{F} = 260\ \mu\text{F}.$$

5-16. Aktiiv- ja reaktiivenergia

Suurust, mis on määratud aktiivvõimsuse P ja sellise ajavahemiku t korrutisega, mille vältel aktiivvõimsus ei muutu, nimetatakse aktiivenergiaks. Seega

$$W_a = Pt = UI \cos \varphi \cdot t. \qquad (5\text{-}52)$$

Aktiivenergia iseloomustab vahelduvvooluringis kulutatud elektrienergiat.

Kui võimsus muutub aja t jooksul, siis jagame selle ajavahemiku osadeks t_1, t_2, t_3 jne., mille vältel võimsus on muutumatu. Siis aktiivenergia avaldub energiate summana:

$$W_a = P_1 t_1 + P_2 t_2 + \ldots = W_{a1} + W_{a2} + \ldots$$

Aktiivenergiat mõõdetakse aktiivenergiaarvestitega.

Reaktiivvõimsus Q ja aja t korrutisega määratud suurust nimetatakse reaktiivenergiaks. Seega

$$W_r = Qt = UI \sin \varphi \cdot t. \qquad (5\text{-}53)$$

Reaktiivvõimsus on arvutussuurus.

Muutuva reaktiivvõimsuse korral avaldub reaktiivenergia järgmiselt:

$$W_r = Q_1 t_1 + Q_2 t_2 + \ldots = W_{r1} + W_{r2} + \ldots$$

Reaktiivenergiat mõõdetakse reaktiivenergiaarvestitega.

Mõõtes üheaegselt võrdse ajavahemiku vältel aktiiv- ja reaktiivenergiat, saame leida vooluringi võimsusteguri:

$$\frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}} = \frac{UI \cos \varphi \cdot t}{\sqrt{(UI \cos \varphi \cdot t)^2 + (UI \sin \varphi \cdot t)^2}} =$$

$$= \frac{\cos \varphi}{\sqrt{\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi}} = \cos \varphi. \qquad (5\text{-}54)$$

Muutuvate võimsuste korral saame selle valemi abil arvestite näitude alusel võimsusteguri keskmise väärtuse.

Näide 5-10. Kuu algul näitas aktiivenergiaarvesti 1762 kWh ja reaktiivenergiaarvesti 736 kvar/h. Kuu lõpuks näitas esimene 1922 kWh ja teine 846 kvar/h.

Leida seadme võimsusteguri keskmine väärtus sellel kuul.

Kuu jooksul tarbitud aktiivenergia

$$W_a = 1922 - 1762 = 160 \text{ kWh}$$

ja reaktiivenergia

$$W_r = 846 - 736 = 110 \text{ kvar/h}.$$

Siit

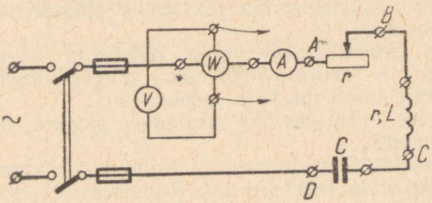
$$\cos \varphi_k = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}} = \frac{160}{\sqrt{160^2 + 110^2}} = 0{,}82.$$

5-17. Laboratoorne töö. Aktiivtakistuse, induktiivsuse ja mahtuvusega vahelduvvooluring

Enne tööle asumist tutvuda § 5-13 sisuga.

Tööplaan

1. Tutvuda tööks vajalike mõõteriistade ja seadmetega, märkida üles nende tehnilised andmed.
2. Koostada lülitus (joon. 5-37) ja näidata seda juhendajale.



Joon. 5-37. Lülitusskeem laboratoorseks tööks.

3. Reguleerida $x_L > x_C$, mõõta pinget ja aktiivvõimsust igas vooluringi lõigus (lõigud AB, BC ja CD) ning kogu koormusel (punktide A ja D vahel).
4. Saadud andmete alusel arvutada iga vooluringi lõigu ja kogu koormuse kohta järgmised suurused:

$$r = \frac{P}{I^2}; \quad z = \frac{U}{I};$$

$$x = \sqrt{z^2 - r^2}; \quad U_a = Ir; \quad U_r = Ix; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{r}.$$

5. Mõõtmis- ja arvutustulemused märkida tabelisse 5-1.

Tabel 5-1

Jrk. nr.	Vahekord	Vooluringi osa	U	I	P	r	z	x	U_a	U_r	tg φ	φ
			V	A	W	Ω	Ω	Ω	V	V	—	—
1	$x_L > x_C$	Reostaat Pool Kondensaator Kogu vooluring										
2	$x_L = x_C$	Reostaat Pool Kondensaator Kogu vooluring										
3	$x_L < x_C$	Reostaat Pool Kondensaator Kogu vooluring										

6. Saadud andmete alusel konstrueerida mastaabis pingete vektordiagramm ja takistuskolmnurk.

7. Reguleerida $x_L = x_C$ (maksimaalse voolu järgi) ja korrata kõiki ülalnimetatud mõõtmisi ja arvutusi nüüd juba pingeresonantsi korral. Mõõtmis- ja arvutustulemused märkida tabelisse 5-1.

8. Saadud andmete alusel konstrueerida mastaabis pingete vektordiagramm ja takistuskolmnurk.

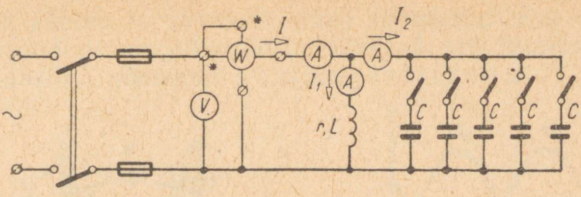
9. Teostada kõik ülalnimetatud mõõtmised ja arvutused olukorra $x_L < x_C$ puhul. Tulemused märkida tabelisse 5-1. Konstrueerida mastaabis pingete vektordiagramm ja takistuskolmnurk.

5-18. Laboratoorne töö. Pooli ja kondensaatori rööpühendus

Enne tööleasumist tutvuda § 5-14 ja §-15 sisuga.

Tööplaan

1. Tutvuda tööks vajalike riistadega. Märkida üles mõõteriistade ja seadmete põhilised tehnilised andmed.



Joon. 5-38. Lülitusskeem laboratoorseks tööks.

2. Koostada lülitus (joon. 5-38) ja näidata seda juhendajale.

3. Suurendada kondensaatori mahtuvust (pooli r ja L jäägu muutmatuteks) ja märkida üles mõõteriistade näidud. Saadud andmete alusel leida z_1, x_C, I_{a1}, I_{r1}, $\cos\varphi_1$, $\cos\varphi$, φ.

Mõõtmis- ja arvutustulemused märkida tabelisse 5-2.

Tabel 5-2

U	I	I_1	I_2	P	z_1	x_C	I_{a1}	I_{r1}	$\cos\varphi_1$	$\sin\varphi_1$	$\cos\varphi$	φ
V	A	A	A	W	Ω	Ω	A	A	—	—	—	—

4. Saadud andmete alusel joonestada järgmised graafikud:

$I_1 = f(x_C)$; $I_2 = f(x_C)$; $I = f(x_C)$ ja $\cos\varphi = f(x_C)$.

5. Joonestada mastaabis juhtudele $I_{r1} > I_2$, $I_{r1} = I_2$ ja $I_{r1} < I_2$ vastavad vektordiagrammid.

6. KOLMEFAASILINE VOOL

6-1. Kolmefaasilise voolu saamine

Vahelduvvoolu kolmefaasiline süsteem on leidnud väga laialdast kasutamist, sest ta võimaldab kõige paremini energiat üle kanda, võimaldab kasutada lihtsaid ja töökindlaid kolmefaasilisi elektrimootoreid, generaatoreid ja transformaatoreid.

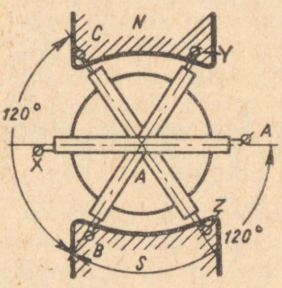
Kolmefaasilise voolu tehnika rajaja M. O. Dolivo-Dobrovolski konstrueeris kolmefaasilise generaatori, kolmefaasilise elektrimootori, kolmefaasilise transformaatori ja esimesena maailmas kandis üle elektrienergiat kolmefaasilise voolu abil.

Kolmefaasiliseks süsteemiks nimetatakse süsteemi, mis koosneb kolmest ühesuguse sagedusega vahelduvvooluringist, millede elektromotoorjõud on teine-

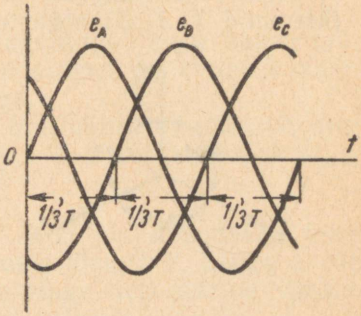


M. O. Dolivo-Dobrovolski.

teise suhtes $^1/_3$ perioodi võrra nihutatud. Kui elektromotoorjõudude amplituudid on võrdsed, siis nimetatakse kolmefaasilist süsteemi s ü m m e e t r i l i s e k s.



Joon. 6-1. Lihtsaim kolmefaasiline generaator.



Joon. 6-2. Kolmefaasilise süsteemi elektromotoorjõudude graafik.

Lihtsaim kolmefaasiline generaator (joon. 6-1) erineb paragrahvis 5-2 vaadeldud ühefaasilisest generaatorist selle poolest, et tema ankrule on paigutatud kolm mähist (pooli), mis on üksteise suhtes pööratud 120° võrra. Generaatori mähiseid nimetatakse faasimähisteks (faasideks).

Kui ankur pöörleb konstantse kiirusega, siis indutseeritakse mähistes ühesuguse sageduse ja amplituudiga elektromotoorjõud. Ühe ankru pöörde jooksul läbib iga mähise emj. täisperioodile T vastava muutumise tsükli. Mähistevahelistest 120°-stest nurkadest tingituna on neis indutseeritud elektromotoorjõud üksteise suhtes $^1/_3$ perioodi või $^2/_3\ \pi$ suuruse nihkenurga võrra nihutatud.

Kui loeme, et esimese faasimähise emj. e_A perioodi algushetkel ($t = 0$) on null, siis võime kirjutada, et

$$e_A = E_m \sin \omega t. \qquad (6\text{-}1)$$

Generaatori teise faasimähise emj. e_B jääb e_A-st maha $^1/_3$ perioodi võrra. Seega

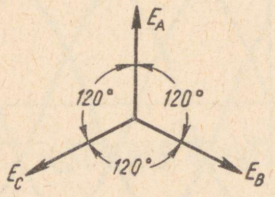
$$e_B = E_m \sin (\omega t - {}^2/_3\pi). \qquad (6\text{-}2)$$

Generaatori kolmanda faasimähise emj. e_C jääb e_B-st $^1/_3$ perioodi võrra maha, e_A-st on ta aga $^1/_3$ perioodi võrra ees:

$$e_C = E_m \sin (\omega t - {}^4/_3\pi) = E_m \sin (\omega t + {}^2/_3\pi). \qquad (6\text{-}3)$$

Nende elektromotoorjõudude graafikud on toodud joonisel 6-2, vektordiagramm aga joonisel 6-3.

Generaatori mähiste elektromotoorjõude loeme positiivseteks, kui nad on suunatud faasimähiste lõppudest (klemmid *X*, *Y*, *Z*) algustesse (klemmid *A*, *B*, *C*).

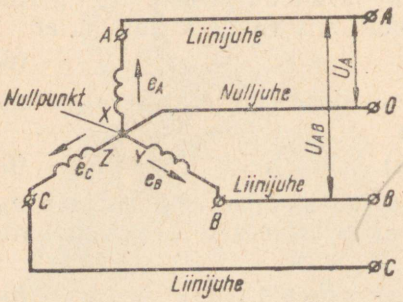


Joon. 6-3. Sümmeetriliste elektromotoorjõudude vektordiagramm.

Kolmefaasilise generaatori iga mähis võib sulguda eri vooluringis. Sel juhul saame ühendamata kolmefaasilise kuuejuhtmelise süsteemi. Praktikas ühendatakse kolmefaasilise generaatori mähised tavaliselt tähte või kolmnurka. Sel juhul kasutatakse kuue juhtme asemel kolme või nelja juhet, mis on tunduvalt ökonoomsem.

6-2. Generaatori faasimähiste tähtühendus

Generaatori mähiste ühendamisel t ä h t e ühendatakse faasimähiste algused *A*, *B* ja *C* liinijuhtmetega. Mähiseharude lõpud *X*, *Y* ja *Z* ühendatakse ühte punkti, mida nimetatakse generaatori n e u t r a a l i k s ehk n u l l p u n k t i k s. Sellesse punkti ühendatakse ka n u l l j u h e (joon. 6-4).



Joon. 6-4. Generaatori mähiste tähtühenduse skeem.

Faasimähise alguse ja lõpu vahelist pinget nimetatakse faasipingeks ning tema tähisteks on U_A, U_B või U_C, üldjuhul aga U_f. Iga liinijuhtme ja nulljuhtme vaheline pinge on faasipinge.

Kui jätame arvestamata pingelangud generaatori mähistel, siis võime öelda, et faasipinged on võrdsed faasimähiste elektromotoorjõududega.

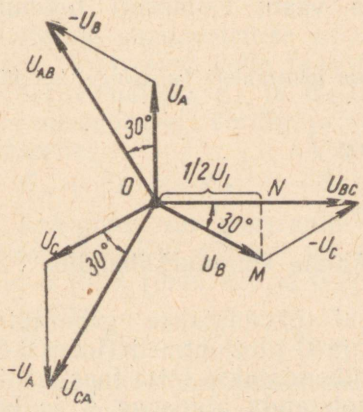
Faasimähiste alguste (või liinijuhtmete) vahelist pinget nimetatakse liinipingeks. Tema tähisteks on U_{AB}, U_{BC} või U_{CA}, üldjuhul aga U_l.

Esimese faasimähise lõpp X ei ole ühendatud teise faasimähise algusega, vaid hoopis lõpuga Y. Seega ei ole juhtmete A ja B vahelise liinipinge hetkväärtus võrdne vastavate pingete summa, vaid vahega:

$$u_{AB} = u_A - u_B.$$

Analoogiliselt saame teiste liinipingete hetkväärtused:

$$u_{BC} = u_B - u_C \quad \text{ja} \quad u_{CA} = u_C - u_A.$$



Joon. 6-5. Kolmefaasilise vooluringi pingete vektordiagramm.

Faasi- ja liinipinged muutuvad siinuseliselt, mistõttu võime nende suuruste efektiivväärtuste vahekorrad määrata vektordiagrammist (joon. 6-5).

Faasipingete U_A, U_B ja U_C vektorid on üksteise suhtes 120° võrra pööratud. Selleks et leida liinipinge U_{AB} vektorit, liidame faasipinge U_A vektorile 180° võrra pööratud pinge U_B vektori. Analoogiliselt leiame ka liinipinge U_{BC}

vektori, mis kujutab endast pingete U_B ja U_C vektorite vahet, ning pinge U_{CA} vektori kui vektorite U_C ja U_A vahe.

Tõmmates läbi ühe liinipinge (U_{BC}) vektori keskpunkti ristsirge, saame täisnurkse kolmnurga ONM (joon. 6-5). Sellest saame, et

$$\frac{1}{2}U_l = U_f \cos 30° = U_f \frac{\sqrt{3}}{2},$$

s. o.

$$U_l = \sqrt{3}\,U_f. \qquad (6\text{-}4)$$

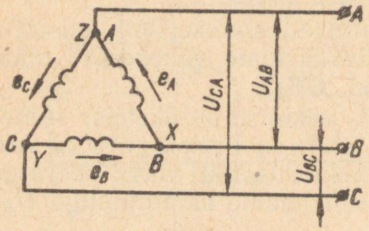
Faasipingete sümmeetrilise süsteemi korral on tähtühenduse puhul liinipinge efektiivväärtus faasipinge efektiivväärtusest $\sqrt{3}$ korda suurem. Peale selle järeldub vektordiagrammist (joon. 6-5), et liinipinge U_{AB} on faasipingest U_A 30° võrra ees, sama nurga võrra eelnevad liinipinged U_{BC} ja U_{CA} vastavalt faasipingetele U_B ja U_C. Liinipingete vektorite täht on pööratud faasipingete vektorite tähe suhtes 30° võrra vastu kellaosuti liikumise suunda.

Näide 6-1. Leida tähtühenduses generaatori faasipinge, kui liinipinge on 380 V.

$$U_f = \frac{U_l}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = \frac{380}{1{,}73} = 220 \text{ V}.$$

6-3. Generaatori faasimähiste kolmnurkühendus

Kolmnurkühenduse korral ühendatakse generaatori faasimähiste algustega A, B ja C liinijuhtmed (joon. 6-6); esimese faasimähise lõpp X ühendatakse teise faasimähise algusega B, teise lõpp Y kolmanda algusega C ja kol-

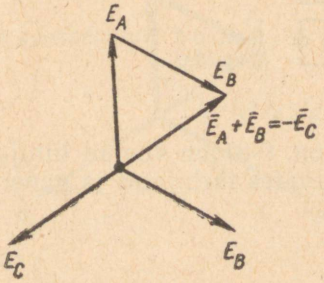


Joon. 6-6. Generaatori mähiste kolmnurkühenduse skeem.

manda lõpp Z esimese algusega A. Järelikult on kolmnurkühenduse puhul liinipinged, s. o. pinged liinijuhtmete vahel, võrdsed faasipingetega:

$$U_{AB} = U_A, \quad U_{BC} = U_B \quad \text{ja} \quad U_{CA} = U_C. \tag{6-5}$$

Kolmnurkühenduse korral tekib väikese takistusega kinnine vooluring $AXBYCZA$. Järelikult selleks, et vältida selles suuri voole, peab seal toimivate elektromotoorjõudude summa olema võrdne nulliga.



Joon. 6-7. Elektromotoorjõudude vektordiagramm generaatori mähiste kolmnurkühenduse korral.

Kolme sümmeetrilise emj. summa on võrdne nulliga (joon. 6-7), sest kahe faasimähise elektromotoorjõudude vektorite, näiteks $\bar{E}_A$ ja $\bar{E}_B$ liitmisel saame vektori $-\bar{E}_C$, mis on suuruselt võrdne ja vastandmärgiline kolmandale vektorile:

$$\bar{E}_A + \bar{E}_B = -\bar{E}_C; \qquad -\bar{E}_C + \bar{E}_C = 0.$$

Lubamatu on generaatori mähiste väär ühendamine kolmnurka. Kui näiteks ühendada õigesti mähiste klemmid X ja B (joon. 6-6 ja 6-7) ja valesti Y ja Z ning C ja A, saame:

$$\bar{E}_A + \bar{E}_B = -\bar{E}_C; \quad -\bar{E}_C - \bar{E}_C = -2\bar{E}_C,$$

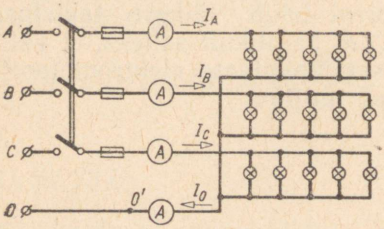
s. t. elektromotoorjõudude summa vooluringis on suuruselt võrdne kahekordse ühe faasimähise elektromotoorjõuga. Tekkiv olukord on samaväärne lühisega.

6-4. Tarbijate tähtühendus

Tarbijate tähtühenduste puhul võib kolmefaasiline süsteem olla neljajuhtmeline (valgustuskoormusele) või kolmejuhtmeline (jõukoormusele).

Esimesel juhul lülitatakse lambid liinijuhtmete ja null-

juhtme vahele (joon. 6-8). Siis tagab nulljuhe üksikute tarbijate klemmipinge ja generaatori faasipinge võrdsuse. Nõnda jäävad tarbijate töötingimused sellisteks, nagu nad on ühefaasilises ahelas.



Joon. 6-8. Nulljuhtmega tähtühendus.

Sellise ühenduse puhul (joon. 6-8) on voolud liinijuhtmetes võrdsed vooludega vastavates tarbijates ja generaatori faasimähistes, s. t.

$$I_l = I_f. \tag{6-6}$$

Tarbijate faasivoolud arvutatakse tuntud valemite järgi:

$$I_A = \frac{U_A}{z_A}; \quad I_B = \frac{U_B}{z_B} \quad \text{ja} \quad I_C = \frac{U_C}{z_C}.$$

Faasivoolude nihkenurgad tarbijate faasipingete suhtes määratakse nende koosinuste kaudu:

$$\cos\varphi_A = \frac{r_A}{z_A}; \quad \cos\varphi_B = \frac{r_B}{z_B}; \quad \cos\varphi_C = \frac{r_C}{z_C};$$

kus r_A, r_B, r_C, z_A, z_B, z_C on vastavate tarbijate aktiiv- ja näivtakistused.

Voolu hetkväärtus nulljuhtmes on Kirchhoffi esimese seaduse kohaselt võrdne faasivoolude hetkväärtuste summaga:

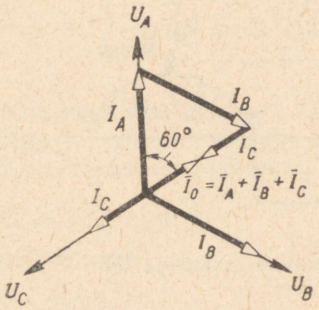
$$i_0 = i_A + i_B + i_C.$$

Nulljuhtme voolu vektor määratakse faasivoolude vektorite summana:

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C. \tag{6-7}$$

Näide 6-2. Generaatori faasipinge on 220 V, tarbija faasitakistused $z_A = z_B = r_A = r_B = 22\ \Omega$, $z_C = r_C = 44\ \Omega$.
Leida vool nulljuhtmes.
Faasivoolud

$$I_A = I_B = \frac{U_f}{z_A} = \frac{220}{22} = 10\ \text{A}; \quad I_C = \frac{U_f}{z_C} = \frac{220}{44} = 5\ \text{A}.$$



Joon. 6-9. Neljajuhtmelise kolmefaasilise süsteemi vektordiagramm aktiivkoormuse korral.

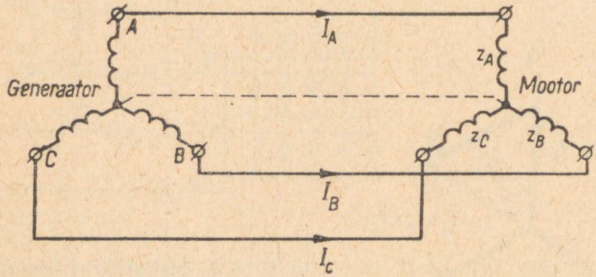
Vektordiagrammil (joon. 6-9) on kujutatud faasipingete ja -voolude vektorid. Faasivoolude vektorite summa annab nulljuhtme voolu vektori, millest $I_0 = 5$ A. Viimane jääb pingest U_A maha nurga $\varphi = 60°$ võrra.

Nulljuhtme ristlõige võetakse võrdne liinijuhtmete ristlõikega (või pisut väiksem), sest vool nulljuhtmes on tavaliselt väiksem kui voolud liinijuhtmetes.

Tarbija mittevõrdsete faasi takistuste puhul nulljuhtme olemasolu korral on tarbija faasipinged $U_l/\sqrt{3} = 0{,}58U_l$, mis on ka tarbija nimipingeks. Nulljuhtme katkemine põhjustab tarbija faasipingete muutuse. Tarbija vähima takistusega faasis pinge langeb ja võib muutuda nulliks, kui $r_f = 0$. Suurima takistusega faasis pinge kasvab ja võib saavutada väärtuse U_l, mis on lubamatu, sest ületab tarbija nimipinge $\sqrt{3}$ korda. Valgustuskoormuse puhul sellesse faasi lülitatud hõõglambid põlevad läbi. Nulljuhtme katkestuse vältimiseks ei ühendata temasse kaitsmeid ega lüliteid.

Kui tarbija faasi-näivtakistused on võrdsed (elektrimootoril) ja generaatori faasimähise elektromotoorjõud on sümmeetrilised, siis on faasivoolud omavahel võrdsed ja ühesuguse nurga võrra nihutatud vastavate faasipingete suhtes, s. t. voolude süsteem on samuti sümmeetri-

line. Sel juhul pole meil nulljuhet vaja, sest vool temas on võrdne faasivoolude summaga, s. t. võrdne nulliga. Me võime nulljuhtme eemaldada ja saame kolmefaasilise kolmejuhtmelise süsteemi.



Joon. 6-10. Kolmefaasilise generaatori ja tarbija tähtühendus.

Kolmefaasilise süsteemi arvutus taandub sümmeetrilise pingete süsteemi ja ühesuguste (ühtlaste) faasikoormuste korral ühefaasilise süsteemi arvutuseks.

Oletame, et tähte ühendatud tarbija on lülitatud võrku (joon. 6-10). Kui tarbija faasi-näivtakistused $z_A = z_B = z_C = z_f$, siis faasipinged

$$U_A = U_B = U_C = U_f = \frac{U_l}{\sqrt{3}}.$$

Faasivoolud

$$I_A = I_B = I_C = I_f = \frac{U_f}{z_f}.$$

Faasivoolu nihkenurka faasipinge suhtes võib määrata seosest

$$\cos \varphi_f = \frac{r_f}{z_f}$$

või

$$\operatorname{tg} \varphi_f = \frac{x_f}{r_f}.$$

Ühe faasi aktiivvõimsus

$$P_f = U_f I_f \cos \varphi_f.$$

Ühtlase faasikoormusega sümmeetrilise süsteemi kõigi faaside aktiivvõimsus

$$P = 3P_f = 3U_f I_f \cos \varphi_f. \qquad (6\text{-}8)$$

Pidades silmas, et tähtühenduse puhul $I_f = I_l$ ja $U_f = U_l/\sqrt{3}$, saame:

$$P = 3U_f I_f \cos \varphi_f = 3\frac{U_l I_l}{\sqrt{3}} \cos \varphi_f = \sqrt{3}\, UI \cos \varphi. \qquad (6\text{-}9)$$

Viimases avaldises on U ja I liinisuurused, φ aga faasipinge ja -voolu vaheline nihkenurk.

Kolmefaasilise süsteemi reaktiivvõimsus

$$Q = \sqrt{3}\, UI \sin \varphi \qquad (6\text{-}10)$$

ja näivvõimsus

$$S = \sqrt{3}\, UI. \qquad (6\text{-}11)$$

Faaside mitteühtlase koormamise või mittesümmeetrilise pingete süsteemi puhul saame kolmefaasilise süsteemi võimsuse üksikute faaside võimsuste summana.

Näide 6-3. Tähte ühendatud kolmefaasiline elektrimootor on lülitatud võrku 380 V. Mootori võimsus on 5 kW ja vool 9 A. Leida võimsustegur.

Elektrimootori võimsus

$$P = \sqrt{3}\, UI \cos \varphi,$$

millest

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3}\, UI} = \frac{5000}{1{,}73 \cdot 380 \cdot 9} = 0{,}84.$$

6-5. Tarbijate kolmnurkühendus

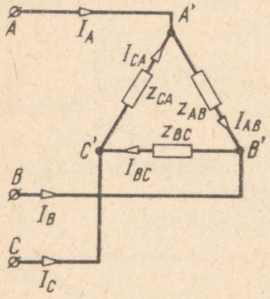
Tarbija kolmnurkühenduse (joon. 6-11) korral ühendatakse iga ta faasimähis liinijuhtmetega, s. t. lülitatakse liinipingele. Viimane on siis ühtlasi ka tarbija faasipingeks:

$$U_{AB} = U_A;\ U_{BC} = U_B;\ U_{CA} = U_C.$$

Sel juhul faaside takistuste muutumine faasipingetele ei mõju.

Positiivseks loeme generaatorist tarbijasse suunatud

liinivoolud (joon. 6-11). Samuti loeme positiivseteks faasivoolud, mis on suunatud A'-st B'-sse, B'-st C'-sse ning C'-st A'-sse.



Joon. 6-11. Tarbijate kolmnurkühendus.

Vastavalt Kirchhoffi esimesele seadusele voolude hetkväärtuste kohta võime sõlme A' kohta kirjutada:

$$i_A + i_{CA} = i_{AB},$$

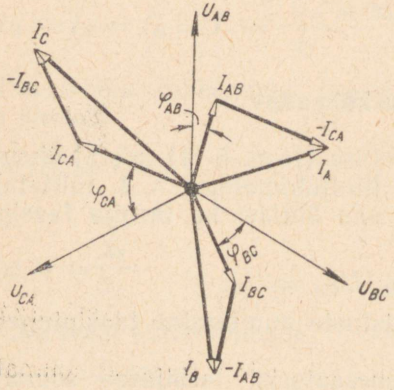
millest

$$i_A = i_{AB} - i_{CA}.$$

Analoogia põhjal saame sõlmede B' ja C' jaoks järgmised seosed:

$$i_B = i_{BC} - i_{AB},$$
$$i_C = i_{CA} - i_{BC}.$$

Seega on iga liinivoolu hetkväärtus võrdne vastava



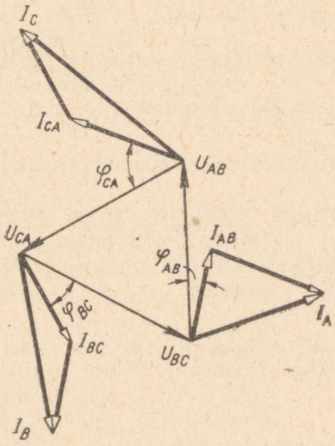
Joon. 6-12. Vektordiagramm tarbijate kolmnurkühenduse korral.

liinijuhtmega ühendatud tarbija faaside voolude algebralise vahega.

Iga liinivoolu vektor on leitav vastavate faasivoolude vektorite vahena:

$$\bar{I}_A = \bar{I}_{AB} - \bar{I}_{CA};$$
$$\bar{I}_B = \bar{I}_{BC} - \bar{I}_{AB};$$
$$\bar{I}_C = \bar{I}_{CA} - \bar{I}_{BC}.$$

Joonisel 6-12 on toodud sellise kolmefaasilise vooluringi vektordiagramm, milles tarbijad on ühendatud kolmnurka. Kõigil selle diagrammi vektoreil on ühine alguspunkt. Joonisel 6-13 on toodud teine selle vooluringi vek-



Joon. 6-13. Vektordiagramm tarbijate kolmnurkühenduse korral.

tordiagramm. Viimases moodustavad pingete vektorid kolmnurga, faasivoolude vektoritel on aga vastavate faasipingete vektoritega ühised alguspunktid.

Kui liinipingete süsteem on sümmeetriline ja faasikoormused võrdsed, s. o.

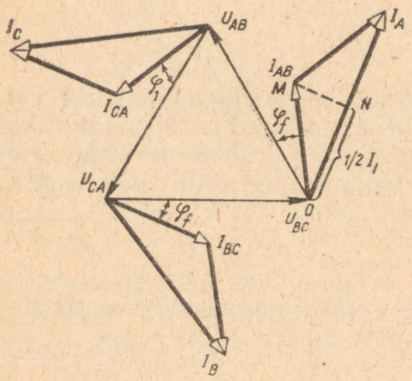
$$z_{AB} = z_{BC} = z_{CA} = z_f$$

ja

$$\varphi_{AB} = \varphi_{BC} = \varphi_{CA} = \varphi_f,$$

siis on faasivoolude efektiivväärtused võrdsed ja nad on

vastavate faasipingete suhtes nihutatud võrdse nurga võrra (joon. 6-14). Üksteise suhtes on faasivoolud seega nihutatud 120° võrra, moodustades sümmeetrilise süsteemi. Sümmeetrilise süsteemi moodustavad ka liinivoolud (joon. 6-14).



Joon. 6-14. Kolmnurkühenduses vooluringi vektordiagramm ühtlasel faasikoormusel.

Kui tõmbame ühele liinivoolu vektorile, olgu selleks näiteks I_A, tema keskpunktist ristsirge, siis saame täisnurkse kolmnurga ONM, millest

$$\frac{1}{2} I_l = I_f \cos 30° = I_f \frac{\sqrt{3}}{2}$$

ehk

$$I_l = \sqrt{3}\, I_f. \qquad (6\text{-}12)$$

Seega on kolmnurka ühendatud tarbijate korral ühtlasel koormusel liinivoolud faasivooludest $\sqrt{3}$ korda suuremad.

Samast vektordiagrammist selgub veel, et liinivoolud jäävad vastavatest faasivooludest 30° võrra maha

Kolmnurkühenduses tarbijate korral ühtlasel koormusel taandub kolmefaasilise süsteemi arvutus ühefaasilise süsteemi arvutusele.

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 ja tangens avalduvad järgmiselt:

$$\cos \varphi = \frac{r_f}{z_f}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{x_f}{r_f}.$$

Ühe faasi aktiivvõimsus

$P_f = U_f I_f \cos \varphi_f$.

Kolme faasi aktiivvõimsus

$$P = 3P_f = 3U_f I_f \cos \varphi_f = \sqrt{3} UI \cos \varphi. \qquad (6\text{-}13)$$

Kolme faasi reaktiivvõimsus

$$Q = 3U_f I_f \sin \varphi_f = \sqrt{3} UI \sin \varphi. \qquad (6\text{-}14)$$

Kolmefaasilise süsteemi näivvõimsus

$$S = 3U_f I_f = \sqrt{3} UI. \qquad (6\text{-}15)$$

Mitteühtlase faasikoormusega kolmefaasilise süsteemi võimsuse leiame üksikute faaside võimsuste summana.

Näide 6-4. Kolmefaasiline elektrimootor võimsusega 4,5 kW töötab pingel 127 V, kusjuures $\cos \varphi = 0{,}8$. Mootori mähised on kolmnurkühenduses.

Leida liini- ja faasivool.

Kuna võimsus $P = \sqrt{3} UI \cos \varphi$, siis mootori liinivool

$$I_l = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos \varphi} = \frac{4500}{1{,}73 \cdot 127 \cdot 0{,}8} = 25{,}6 \text{ A}.$$

Faasivool

$$I_f = \frac{I_l}{\sqrt{3}} = \frac{25{,}6}{1{,}73} = 14{,}8 \text{ A}.$$

Näide 6-5. Kolmefaasilisse võrku liinipingega $U_l = 125$ V on lülitatud tarbijad (joon. 6-15), mille takistused on järgmised: $r_{AB} = 10\ \Omega$ ning $r_{BC} = r_{CA} = 15\ \Omega$.

Leida pinged tarbijail, juhul kui juhtmes B olev sulavkaitse «põleb läbi».

Sellises olukorras osutavad tarbijad AB ja BC jadamisi liinipingele $U_l = 125$ V lülitatuteks.

Vool tarbijais

$$I_{AB} = I_{BC} = \frac{U_{AC}}{r_{AB} + r_{BC}} = \frac{125}{25} = 5 \text{ A}.$$

Pinged tarbijate klemmidel

$U'_{AB} = I_{AB} r_{AB} = 5 \cdot 10 = 50$ V;
$U'_{BC} = I_{BC} r_{BC} = 5 \cdot 15 = 75$ V;
$U_{CA} = U_l = 125$ V.

Kui tarbijad on lülitatud tähte ja liinivoolude positiivseks suunaks on loetud suund generaatorist tarbijasse, siis võime, Kirchhoffi esimest seadust kasutades, kirjutada nullpunkti kohta võrrandi

$$i_A + i_B + i_C = 0.$$

Kui tarbijad on ühendatud kolmnurka, siis liinivoolude summa

$$i_A + i_B + i_C = i_{AB} - i_{CA} + i_{BC} - \\ - i_{AB} + i_{CA} - i_{BC} = 0.$$

Kolmefaasilise süsteemi liinivoolude hetkväärtuste algebraline summa on järelikult tarbijate mistahes ühendusviisi puhul võrdne nulliga.

Seetõttu ongi näiteks kolmefaasilise kaabli soonte summaarne magneetimisergutus võrdne nulliga ning kaablit mehhaaniliste vigastuste eest kaitseva terassoomus ei magneetu.

6-6. Tarbijate ühendamine kolmefaasilisse võrku

Elektrilampe valmistatakse nimipingetele 127 ja 220 V, kolmefaasilisi elektrimootoreid aga nimi-faasipingetele 127, 220, 380 ja enam volti.

Tarbija kolmefaasilisse võrku ühendamise viis sõltub võrgu liinipingest ja tarbija nimipingest.

Lambid nimipingega 127 V ühendatakse 127-voldise liinipingega võrku kolmnurkühenduses ja 220-voldise liinipingega võrku nulljuhtmega tähtühenduses. 220-voldise nimipingega lambid ühendatakse 220-voldise liinipingega võrgus kolmnurka, 380-voldise liinipingega võrgus aga nulljuhtmega tähte.

Kui toitevõrgu liinipinge on võrdne kolmefaasilise elektrimootori nimi-faasipingega, siis kasutame mähiste kolmnurkühendust, kui aga liinipinge on nimi-faasipingest $\sqrt{3}$ korda suurem, kasutame tähtühendust.

6-7. Laboratoorne töö. Neljajuhtmeline kolmefaasiline vooluring

Enne tööle asumist tutvuda § 6-2 ja § 6-4 sisuga.

Tööplaan

1. Tutvuda tööks vajalike mõõteriistadega. Märkida üles nende tähtsamad tehnilised andmed.
2. Koostada lülitus (joon. 6-8) ja näidata seda juhendajale.
3. Katkestada nulljuhe (*00'*) ja reguleerida faasikoormused võrdseteks. Mõõta faasi- ja liinipinged, punktide *0* ja *0'* vaheline pinge U_0 ning liinivoolud.

Arvutada faasivõimsused P_A, P_B ning P_C.

4. Katkestatud nulljuhtme korral muuta koormust faasis *C*, jättes lampide arvu faasides *A* ja *B* endiseks. Mõõta faasi- ja liinipingeid ning liinivoole faasi *C* takistuse mitmesuguste väärtuste puhul, sealhulgas ka juhtudel, kus faasi takistus on null (faasi lühis) ja lõpmatult suur (faasi tühijooks). Arvutada faasivõimsused.
5. Mõõteriistade näidud ja arvutustulemused märkida tabelisse 6-1.
6. Joonestada vektordiagrammid ühtlase ja mitteühtlase faasikoormuse puhul.

Tabel 6-1

Katse nr.	r_C	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

7. Sulgeda nulljuhe, mõõta faasi- ja liinipingeid, liinivoole ning voolu nulljuhtmes faasi *C* takistuse mitmesugustel väärtustel, seejuures faasi lühistamata. Arvutada faasivõimsused. Leida nulljuhtme takistuse mõju vooluringi töörežiimile. Mõõteriistade näidud ja arvutustulemused märkida tabelisse 6-1. Joonestada vektordiagrammid.

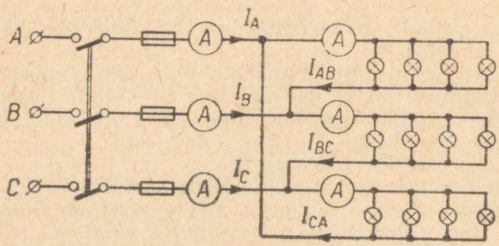
6-8. Laboratoorne töö. Kolmejuhtmeline kolmefaasiline vooluring

Enne tööle asumist tutvuda § 6-5 sisuga.

Tööplaan

1. Tutvuda tööks vajalike mõõteriistadega. Märkida üles mõõteriistade ja seadmete põhilised tehnilised andmed.

2. Koostada lülitus (joon. 6-15) ja näidata seda juhendajale.
3. Ühtlasel faasikoormusel mõõta faasi- ja liinivoolu, veenduda, et $I_l = \sqrt{3} I_f$. Mõõta faasipinged ja arvutada faasivõimsused. Joonestada vektordiagramm.



Joon. 6-15. Elektrilampide ühendamine kolmnurka.

4. Mõõteriistade näidud ja arvutustulemused märkida tabelisse 6-2.

Tabel 6-2

Katse nr.	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	I_{AB}	I_{BC}	I_{CA}	I_A	I_B	I_C	$\frac{I_l}{I_f}$	P_{AB}	P_{BC}	P_{CA}	P
	V	V	V	A	A	A	A	A	A	—	W	W	W	W

5. Muuta mingi faasi takistust, jättes teiste faaside takistused (r_{AB}, r_{BC}) võrdseteks. Iga katse puhul märkida mõõteriistade näidud tabelisse 6-2. Arvutada faasivõimsused. Joonestada ühe katse põhjal mastaabis vektordiagramm.
6. Reguleerida faasikoormused võrdseteks ja eemaldada faasi C kaitse. Märkida üles mõõteriistade näidud ja joonestada katse kohta mastaabis vektordiagramm. Uurida takistuse r_{BC} muutumise mõju vooluringi töörežiimile.

7. ELEKTRIMÕÕTMISED JA -MÕÕTERIISTAD

7-1. Põhimõisted

Mõõtmiseks nimetatakse protsessi, mille käigus toimub mõõdetava suuruse võrdlemine teise sama liiki suurusega, mis on kokkuleppel võetud mõõtühikuks.

Konkreetset mõõtühikut, selle murdosa või selle kordse väärtuse näidist nimetatakse mõõduks.

Seadist, mis on mõeldud mõõdetava suuruse võrdlemiseks mõõtühiku või mõõduga, nimetatakse mõõteriistaks.

Praktilisteks mõõtmisteks mõeldud mõõte ja mõõteriistu nimetatakse töö- ehk tehnilisteks mõõtudeks ja mõõteriistadeks.

Mõõte ja mõõteriistu, mis on mõeldud mõõtühikute säilitamiseks ja taastamiseks, samuti aga mõõteriistade kontrollimiseks ja gradueerimiseks, nimetatakse taatelmõõtudeks ja -mõõteriistadeks.

Iga mõõtmise tulemus erineb alati pisut mõõdetava suuruse tegelikust väärtusest. Mõõdetava suuruse tegelikuks väärtuseks loetakse väärtust, mis saadakse taatelmõõteriistaga (-mõõduga) mõõtmisel.

Mõõtmisel saadud väärtuse ja mõõdetava suuruse tegeliku väärtuse vahet nimetatakse absoluutseks veaks. Protsentides väljendatud absoluutse vea ja tegeliku väärtuse või mõõtmisel saadud väärtuse suhet nimetatakse suhteliseks veaks. Viimast kasutatakse mõõtmistäpsuse hindamiseks.

Näide 7-1. Voolu mõõtmisel saime tulemuseks, et $I_1 = 41$ A. Voolu tegelik väärtus $I = 40$ A. Leida mõõtmise absoluutne ja suhteline viga.

Mõõtmise absoluutne viga

$$\Delta I = I_1 - I = 41 - 40 = 1\text{A}.$$

Suhteline viga

$$\gamma = \frac{\Delta I}{I} \cdot 100\% = \frac{1}{40} \cdot 100\% = 2{,}5\%.$$

7-2. Elektrimõõteriistade liigitus

Elektrimõõteriistu liigitatakse *otselugem-* ja *võrdlusmõõteriistadeks*.

Otselugem-mõõteriistade hulka kuuluvad näiteks ampermeeter, vattmeeter, elektrienergiaarvesti, s. o. mõõteriistad, mis annavad mõõdetava suuruse arvväärtuse oma lugemisseadisel.

Võrdlusmõõteriistu kasutatakse mõõdetava suuruse võrdlemiseks mõõduga. Näitena võiks nimetada takistuse mõõtesilda (§ 7-7).

Tehniliste mõõtmiste puhul kasutatakse enamasti otselugem-mõõteriistu, mis on lihtsamad, odavamad ja mille kasutamisel on ajakulu mõõtmistele väiksem.

Võrdlusmõõteriistu kasutatakse *täpsemate* mõõtmiste korral.

Tabelis 7-1 on toodud elektrimõõteriistade liigitus mõõdetava suuruse järgi. Tabelis 7-2 on aga toodud mõõteriistade liigitus mõõtesüsteemi, s. o. töötamispõhimõtte ja ehituse järgi.

Erinevate mõõtesüsteemide ja omadustega mõõteriistade mitmekesisus on tingitud elektriliste suuruste mõõtmistele esitatavatest mitmesugustest nõuetest ja mõõtmistingimustest.

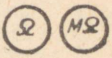
Täpsusastme järgi jagatakse elektrimõõteriistad (ГОСТ 1845-59) kaheksasse täpsusklassi: 0,05; 01; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5 ja 4. Mõõteriista täpsusklassi näitab skaalal ringiga ümbritsetud arv.

Mõõteriista täpsusklass väljendab mõõteriista *lubatavat taandatud põhiviga*. Lubatavaks taandatud põhiveaks nimetatakse normaaltingimustes asuvale mõõteriistale standardiga lubatava suurima absoluutse vea (Δx) ja riista täishälbe (x_m) jagatist protsentides.

Mõõteriist on normaaltingimustes, kui ta asub normaaltemperatuuriga (+20 °C) keskkonnas skaalal näi-

Tabel 7-1

Elektrimõõteriistad ja nende tingmärgid

Mõõdetav suurus	Mõõteriist	Tingmärk
Vool	Milliampermeeter, ampermeeter, kiloampermeeter	
Pinge	Millivoltmeeter, voltmeeter, kilovoltmeeter	
Võimsus	Vattmeeter, kilovattmeeter	
Energia	Aktiivenergiaarvesti, reaktiivenergiaarvesti	
Faasinihe	Faasimõõtur	
Sagedus	Sagedusmõõtur	
Takistus	Oommeeter, megaoommeeter	

datud asendis (tabel 7-2) ja kui talle ei mõju välised magnetväljad (peale Maa magnetvälja).

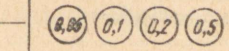
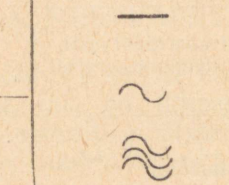
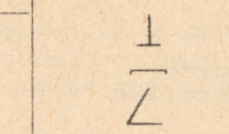
Mõõteriista täishälbeks ehk mõõteulatuseks nimetatakse suurimat mõõdetavat väärtust.

Seega mõõteriista taandatud viga

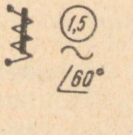
$$\gamma_m = \frac{\Delta x}{x_m} \cdot 100\%. \qquad (7\text{-}1)$$

Viga võib olla nii positiivne kui ka negatiivne.

Elektrimõõteriistade süsteemid ja tingmärgid mõõteriistade skaaladel.

Süsteemi märk	Süsteem	Märgid mõõteriista skaalal	Selgitused
	Magneto-elektriline	Täpsusklassi märgid	Põhilised taandatud vead %
	Magneto-elektriline logomeeter		0,05; 0,1; 0,2; 0,5
	Alaldiga		1; 1,5; 2,5; 4
		Vooluliigi märgid	
	Termo-elektriline		Alalisvool Vahelduvvool
	Elektro-magnetiline		Kolmefaasiline vool
	Elektro-dünaamiline	Mõõteriista asendi märgid	
	Elektro-dünaamiline logomeeter		Skaala vertikaalasend Skaala horisontaal-asend Skaala kaldasend
	Ferro-dünaamiline	Isolatsiooni läbilöögitugevuse märk	
	Ferro-dünaamiline logomeeter		Mõõtesüsteem on kerest isoleeritud ja katsetatud pingel 2 kV

Tabel 7-2 (järg)

Süsteemi märk	Süsteem	Märgid mõõteriista skaalal	Selgitused
	Induktsioon-		Generaatorklemm Kerega ühendatud klemm
	Elektrostaatiline		Maandusklemm
	Vibratsioon-	Näide 	Elektromagnetilise süsteemi mõõteriist vahelduvvoolule, täpsusklass 1,5, skaala kalle horisontaaltasapinna suhtes 60°

Mingi suuruse x_1 mõõtmisel loetakse mõõteriista suhteliseks veaks tema suurima võimaliku absoluutse vea Δx ja mõõdetava suuruse väärtuse x_1 suhet protsentides:

$$\gamma_{x_1} = \frac{\Delta x}{x_1} \cdot 100\%. \qquad (7\text{-}2)$$

Korrutades ja jagades viimast avaldist mõõteriista täishälbega, saame:

$$\gamma_{x_1} = \frac{\Delta x}{x_1} \cdot 100\% \cdot \frac{x_m}{x_m} = \frac{\Delta x}{x_m} \cdot 100\% \cdot \frac{x_m}{x_1} =$$

$$= \gamma_m \cdot \frac{x_m}{x_1}.$$

Seega on mõõdetava suuruse suhteline viga võrdne mõõteriista taandatud vea ning mõõteriista täishälbe ja mõõdetava suuruse väärtuse suhte korrutisega.

Näide 7-2. Ampermeetriga, mille mõõteulatus $I_m = 25$ A ja täpsusklass on 1,5, mõõdeti voolu $I_1 = 15$ A. Leida suhteline viga mõõtmisel.

Suurim võimalik suhteline viga voolu mõõtmisel

$$\gamma_{I_1} = \gamma_m \cdot \frac{I_m}{I_1} = \pm 1{,}5\% \cdot \frac{25}{15} = \pm 2{,}5\%.$$

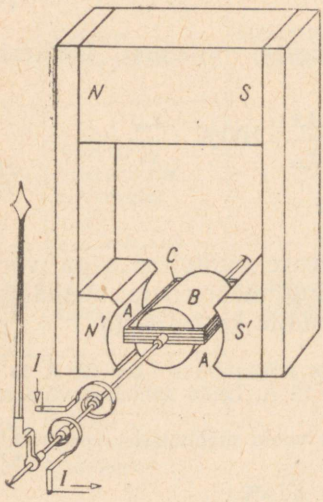
Mida väiksem on mõõdetav suurus võrreldes mõõteriista mõõteulatusega, seda suurem on suhteline viga. Siit järeldub, et mõõdetava suuruse väärtus ei tohiks olla väiksem poolest mõõteriista mõõteulatusest.

7-3. Mõõteriistade mõõtemehhanismid

Iga mõõteriista põhiliseks osaks on mõõtemehhanism. Mõõdetava või sellega funktsionaalselt seotud suuruse mõjumisel mõõtemehhanismile muutub viimase liikuva osa asend. Mõõdetava suuruse väärtus määratakse liikuva osa pöördenurga või joonnihke järgi.

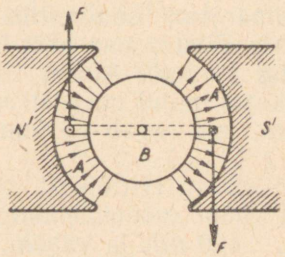
a) Magnetoelektriline mõõtemehhanism

Magnetoelektrilise mõõtemehhanismi liikuv osa (joon. 7-1) koosneb ristkülikukujulisest poolist (raamist) *C*. Raami peenest isoleeritud vasktraadist mähis on keritud alumiiniumist alusele. Raami külge on kinnitatud kaks tugedele toetuvat pooltelge — kärni. Ühele pooltelgedest on kinnitatud osuti ning spiraalvedrude otsad. Nende vedrude kaudu juhitakse vool raami mähisesse.



Joon. 7-1. Magnetoelektriline mõõtemehhanism.

Raami küljed asuvad liikumatu terassilindri B ja pooluskingade N' ning S' vahelises kitsas õhupilus A. Tugev püsimagnet NS tekitab õhupilus ühtlase radiaalse magnetvälja.



Joon. 7-2. Pöördemomendi tekkimine magnetoelektrilises mõõtemehhanismis.

Kui raami mähist läbib vool, siis mõjub tema magnetväljas asuvatele külgedele jõupaar FF (joon. 7-2). Seega tekib raami mähist läbiva vooluga võrdeline pöördemoment

$$M = kI,$$

kus k on võrdetegur.

Selle momendi mõjul pöördub raam nurga α võrra, mille juures vedrudè vastumoment tasakaalustab pöördemomendi. Vastumoment on võrdeline vedru pöördenurgaga:

$$M_v = D\alpha,$$

kus D on võrdetegur.

Pöörde- ja vastumomendi võrdsuse korral

$$D\alpha = kI$$

avaldub raami pöördenurk järgmiselt:

$$\alpha = \frac{k}{D} I,$$

millest näeme, et pöördenurk on võrdeline vooluga.

Vool mõõtemehhanismi poolis

$$I = \frac{D}{k} \alpha = C\alpha,$$

kus $C = D/k$ on nn. voolukonstant, mis on iga mõõteriista jaoks teada.

Seega saame mõõdetava voolu väärtuse raami pöörde-

nurga ja voolukonstandi korrutisena. Nurga loeme osuti järgi skaalalt.

Summutiks nimetatakse seadist, mis on mõeldud mõõteriista liikuva osa võnkumiste vähendamiseks pärast tema töösse lülitamist.

Magnetoelektrilise mõõtemehhanismi summutiks on raami alumiiniumalus. Mõõteriista liikuva osa pöördumisel pooli alust läbiv magnetvoog muutub. Aluses indutseeritakse voolud, mille vastastikusel mõjul magneti magnetväljaga tekib pidurdusmoment, mis tagab võnkumiste sumbumise.

Vedrude ja mähise traadi väikesest ristlõikest tingituna valmistatakse vaadeldavat tüüpi mõõtemehhanisme vaid väikestele vooludele — 10 ... 100 mA ja vähem.

Kirjeldatud konstruktsiooniga magnetoelektrilise mõõtemehhanismi ühendamisel vahelduvvooluringi hakkab pöördemoment muutuma võrdeliselt voolu hetkväärtusega. Momendi sellise kiire muutumise korral ei suuda mõõtemehhanismi liikuv osa inertsi tõttu momendi muutumist jälgida ning ta pöördub nurga võrra, mis on võrdeline pöördemomendi keskväärtusega. Siinuselise voolu puhul on voolu ja järelikult ka momendi keskväärtus võrdne nulliga ning liikuv osa ei pöördu. Seega saab vaadeldud mõõtemehhanismi kasutada vaid mõõtmiseks alalisvooluringis.

b) Elektromagnetiline mõõtemehhanism

Elektromagnetiline mõõtemehhanism on kujutatud joonisel 7-3. Ta koosneb liikumatust poolist *A* ning liikuvast osast, mille moodustavad ühele teljele kinnitatud terassüdamik *B*, osuti, vedru ja sektorikujuline alumiiniumlehest summuti *C*.

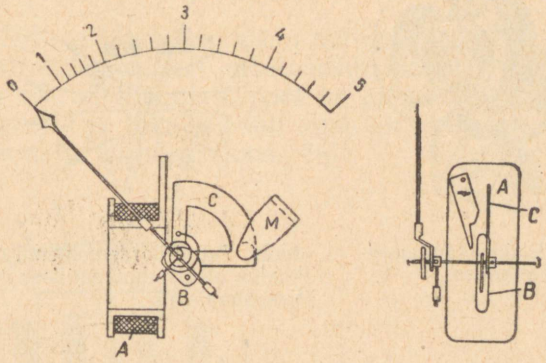
Mõõdetav vool tekitab liikumatut pooli läbides magnetvälja, mis magneedib südamiku *B* ja tõmbab teda pooli sisse. Vool poolis määratakse südamiku pöördenurga järgi.

Summuti lehe *C* liikumisel magneti *M* magnetväljas indutseeritakse temas pöörisvoolud. Nende voolude ja magnetvälja vastastikuse mõju tõttu tekib pidurdusmoment, mis tagab võnkumiste sumbumise.

Elektromagnetilist mõõtemehhanismi võib kasutada nii

alalis- kui ka vahelduvvooluringis, sest jõud, millega südamik tõmmatakse pooli sisse, ei sõltu voolu suunast.

Jääkvoo tiheduse tõttu võivad südamikku tõmbav jõud ja muidugi ka mõõtemehhanismi näit omada ühetugevuse voolu puhul erinevaid väärtusi sõltuvalt sellest, kas vool suureneb või väheneb. Seega esineb jääkvoo tihedusest tingitud mõõteviga. Selle vea vähendamiseks valmistatakse südamikud permalloist, mille jääkvoo tihedus on tühine.



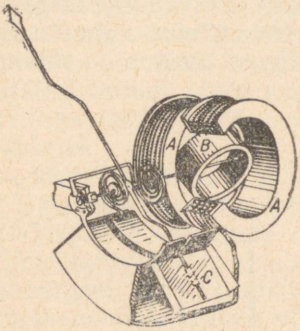
Joon. 7-3. Elektromagnetiline mõõtemehhanism.

Välistest väljadest tingitud vea vähendamiseks ümbritsetakse mõõtemehhanism terasekraaniga või -kestaga. Samal eesmärgil kasutatakse ka astaatilisi mõõtemehhanisme kahe jadamisi ühendatud pooliga ja kahe südamikuga ühel teljel. Mõõdetav vool loob poolides vastassuunalised magnetväljad. Väline homogeenne magnetväli nõrgendab ühe pooli magnetvälja, kuid tugevdab samavõrra teise oma. Nõnda osutub välise välja resulteeriv mõju tühiseks.

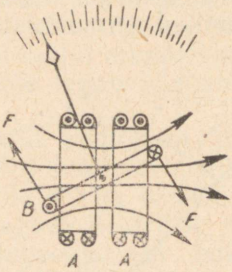
c) Elektrodünaamiline mõõtemehhanism

Elektrodünaamiline mõõtemehhanism (joon. 7-4 ja 7-5) koosneb liikumatust poolist *A*, millel on kaks sektsiooni, ja liikuvast poolist *B*, mis on kinnitatud ühele teljele osutiga, õhksummuti tiivikuga *C* ja kahe spiraalvedruga.

Kui liikumatut pooli läbib vool I_1 ja liikuvat pooli vool I_2, siis ilmneb poolide vahel vastastikune elektrodünaamiline mõju. Liikuvale poolile mõjub jõupaar FF (joon. 7-5), s. o. pöördemoment. Liikuv pool pöördub seni, kuni vedrude vastumoment tasakaalustab pöördemomendi.



Joon. 7-4. Elektrodünaamiline mõõtemehhanism.



Joon. 7-5. Pöördemomendi tekkimine elektrodünaamilises mõõtemehhanismis.

Alalisvoolu puhul on liikuva pooli pöördemoment ja pöördenurk võrdelised poolide voolude korrutisega:

$$a = k_1 I_1 I_2. \tag{7-4}$$

Vahelduvvoolu korral on pöördemomendi hetkväärtus võrdeline voolude hetkväärtuste korrutisega, pöördemomendi keskväärtus ja temaga võrdeline liikuva pooli pöördenurk on aga määratud poolide voolude efektiivväärtuste korrutisega ning vooludevahelise nihkenurga koosinusega:

$$a = k_1 I_1 I_2 \cos \Psi. \tag{7-5}$$

Hiljem näeme, et selle pöördenurga järgi leitakse mõõdetava suuruse väärtus.

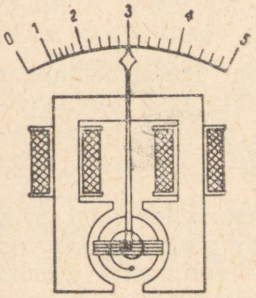
Kuna mõõtemehhanismis pole terasdetaile ja ei esine jääkvoo tihedusest tingitud viga, siis on võimalik neid mehhanisme valmistada väga täpseteks mõõtmisteks.

Mõõtemehhanismi nõrga magnetvälja tõttu tekivad väliste magnetväljade mõjul mõõtevead. Nende vähendamiseks kasutatakse samu vahendeid mida elektromagnetiliste mõõtemehhanismide puhul.

Nõrgale magnetväljale vastab nõrk pöördemoment. Järelikult on vaja suure täpsuse saamiseks vähendada hõõrdumisest tingitud viga. Seda saavutatakse liikuva osa kaalu vähendamisega ning telgede ja tugede (laagrite) laitmatu töötlemisega. Peale selle on elektrodünaamiline mõõtemehhanism tundlik ülekoormusele, sest vedrude ja liikuva pooli traadi ristlõiked on väikesed.

d) Ferrodünaamiline mõõtemehhanism

Selle mõõtemehhanismi töötamispõhimõte on sama mis elektrodünaamilisel mõõtemehhanismil. Erinevuseks on aga see, et liikumatu pool on paigutatud lehtterasest südamikule ja liikuva pooli sisse on paigutatud lehtterasest liikumatu silinder (joon. 7-6).



Joon. 7-6. Ferrodünaamiline mõõtemehhanism.

Terasest magnetahel tugevdab mõõtemehhanismi magnetvälja, mille tulemusena suureneb pöördemoment. Sellega saab tõsta konstruktsiooni vastupidavust. Väheneb väliste magnetväljade mõju mõõtemehhanismi näidule. Terase kasutamine suurendab aga jääkvoo tihedusest ja magnetahelas tekkivatest pöörisvooludest tingitud viga.

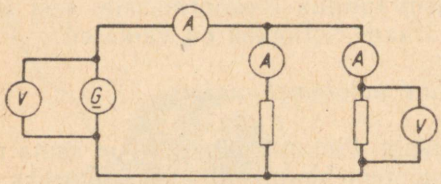
7-4. Voolu ja pinge mõõtmine

a) Ampermeetri ja voltmeetri lülitusskeemid

Ampermeetri näidu määrab tema mõõtemehhanismi läbiv vool. Sellepärast tuleb voolu mõõtmiseks mingis vooluringi osas, kas siis tarbijas või generaatoris, ampermeeter ühendada nii, et teda läbiks kogu mõõdetav vool.

Seega ühendatakse ampermeeter tarbijaga, generaatoriga või vooluringi mingi osaga *jadamisi* (joon. 7-7).

Ampermeetri ühendamine vooluringi ei tohi muuta viimase tööolukorda, järelikult peab tema takistus olema palju väiksem kui tarbija või vastava vooluringi haru



Joon. 7-7. Ampermeetrite ja voltmeetrite ühendamine vooluringi.

takistus. Ampermeetri väikese takistuse (r_a) korral on maksimaalse mõõdetava voolu (I_{am}) juures väike ka võimsuskadu mõõteriistas:

$$P_{am} = I_{am}^2 r_a.$$

Kui mõõdetav vool on suurem mõõtemehhanismi (ampermeetri) nimivoolust, siis kasutatakse alalisvooluringis mõõtepiirkonna laiendamiseks *šunte*, mida vaatleme allpool, vahelduvvooluringis aga *voolutransformaatoreid* (§ 9-10).

Voltmeetri näidu määrab pinge tema klemmidel. Seega tuleb tarbija või generaatori klemmipinge mõõtmiseks nende klemmid ühendada vastavalt voltmeetri klemmidega, s. t. ühendada voltmeeter rööbiti tarbija või generaatoriga (joon. 7-7).

Voltmeetri takistus peab olema palju suurem selle tarbija (generaatori) takistusest, millega ta rööbiti ühendatakse, sest vastasel juhul mõjub tema juurdeühendamine mõõdetavale pingele (vooluringi tööreżiimile). Voltmeetri suure takistuse (r_v) korral on tema maksimaalne vool (I_{vm}) väike. Samuti on väike tema võimsuskadu, sest

$$I_{vm} = \frac{U_{vm}}{r_v} \quad \text{ja} \quad P_{vm} = \frac{U_{vm}^2}{r_v}.$$

Pinge mõõtemehhanismi klemmidel

$$U_{mm} = I_{mm} r_{mm}.$$

Kuna mõõtemehhanismi vasktraadist mähise takistus r_{mm} muutub temperatuurimuutuse 10° C puhul 4%, siis

pole pinge U_{mm} võrdeline I_{mm}-ga ja järelikult ka liikuva osa pöördenurgaga. Seega pole pinge täpne mõõtmine võimalik.

Kui me lülitame mõõtemehhanismiga jadamisi suure eel- ehk lisatakisti ($r_{eel} \gg r_{mm}$), mis on valmistatud nullile lähedase temperatuuriteguriga manganiinist, saame, et voltmeetri takistus

$$r_v = r_{mm} + r_{eel}$$

on praktiliselt temperatuurist sõltumatu. Nii saavutame olukorra, kus voltmeetri liikuva osa pöördenurk pole mitte ainult võrdeline vooluga, vaid ka voltmeetri klemmipingega

$$U_v = I_{mm}(r_{mm} + r_{eel}) = I_{mm} r_v = I_{mm} \cdot \text{const.} \qquad (7\text{-}6)$$

Peale selle kasutatakse eeltakistit ka voltmeetri mõõtepiirkonna laiendamiseks, sest mõõtemehhanismi mõõteulatus on tavaliselt väike.

Kõrgepingelises vahelduvvooluringis kasutatakse voltmeetri mõõtepiirkonna laiendamiseks eeltakistite kõrval ka mõõteotstarbelisi pingetrafosid (§ 9-10).

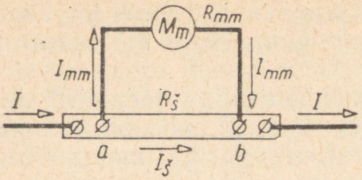
Sellest võime järeldada, et ampermeetri ja voltmeetri mõõtemehhanismid võivad olla ühesuguse ehitusega, erinedes teineteisest vaid parameetrite poolest. Vooluringi ühendatakse aga ampermeeter ja voltmeeter erinevalt ja neil on erinevad sisemised mõõteskeemid.

b) Magnetoelektrilised ampermeetrid ja voltmeetrid

Nagu juba mainitud, valmistatakse magnetoelektrilisi mõõtemehhanisme kuni 100-milliamprisele voolule. Seega kujutavad väikeste voolude mõõtmiseks mõeldud magnetoelektrilised mõõteriistad (galvanomeetrid, mikroampermeetrid, milliampermeetrid) endast mõõtemehhanisme, mille pool on ühendatud kere külge kinnitatud klemmidega ja mille skaalale on vahetult kantud mõõdetava voolu väärtused.

Magnetoelektriline ampermeeter kujutab endast sama süsteemi mõõtemehhanismi, mille mõõtepiirkonda on laiendatud šundi abil. Šunt ühendatakse mõõtemehhanismiga rööbiti (joon. 7-8).

Mõõdetav vool jaguneb sõlmes *a* kaheks osaks: šundi



Joon. 7-8. Šundiga mõõtemehhanism.

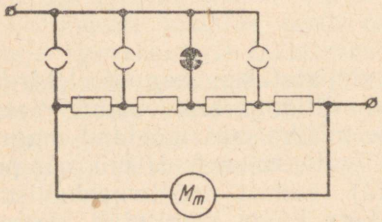
vooluks $I_š$ ja mõõtemehhanismi vooluks I_{mm}. Pingelang hargnenud osal ab (joon. 7-8)

$$U_{ab} = I_{mm} r_{mm} = I \frac{r_{mm} r_š}{r_{mm} + r_š},$$

millest

$$I = I_{mm} \frac{r_{mm} + r_š}{r_š} = I_{mm} p. \qquad (7\text{-}7)$$

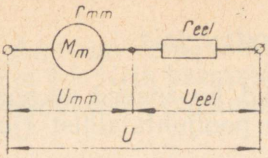
Konstantse šundi takistuse $r_š$ ja mõõtemehhanismi takistuse r_{mm} korral on mõõdetava voolu I ja mõõtemehhanismi voolu I_{mm} jagatiseks konstant p. Seega saab mõõdetavat voolu määrata mõõtemehhanismi liikuva osa pöördenurga järgi. Šundil peab olema piisavalt suur ristlõige, mis välistaks kuumenemise ja sellest tingitud vea. Šundid vooludele 25 ... 50 A ehitatakse tavaliselt mõõteriista korpusesse, suurematele vooludele mõeldud šundid paigutatakse aga eraldi väljapoole riista keret.



Joon. 7-9. Mitmepiirkonnalise šundiga ampermeeter.

Tehnilistel ampermeetritel on ühepiirkonnalised, taatel- ja laboratoorsetel ampermeetritel aga mitmepiirkonnalised šundid (joon. 7—9). Erinevad mõõtepiirkonnad saadakse šundi takistuse muutmisega pistiku ümberasetamisel ühest pesast teise.

Magnetoelektriline voltmeeter kujutab endast sama



Joon. 7-10. Eeltakistiga mõõtemehhanism.

süsteemi mõõtemehhanismi, millega on mõõtepiirkonna laiendamiseks ühendatud eeltakisti (joon. 7-10).

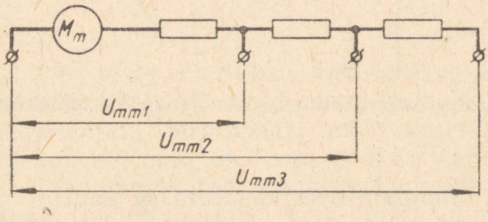
Voltmeetri skaalale kantakse jaotused, mis annavad meile tema klemmipinge väärtuse:

$$U = I(r_{mm} + r_{eel}),$$

mis on

$$p = \frac{r_{mm} + r_{eel.}}{r_{mm}},$$

korda suurem mõõtemehhanismi pingest $U_{mm} = Ir_{mm}$.



Joon. 7-11. Mitmepiirkonnalise eeltakistiga voltmeeter.

Tehnilistel voltmeetritel on ühepiirkonnalised, taatel- ja laboratoorsetel voltmeetritel aga mitmepiirkonnalised eeltakistid (joon. 7-11). Erinevad mõõtepiirkonnad saame erinevate eeltakistite kasutamisel, milleks üks voltmeetri juhtmeist tuleb viia ühelt eeltakisti klemmilt teisele, muuta lüliti asendit või tõsta pistik teise pessa.

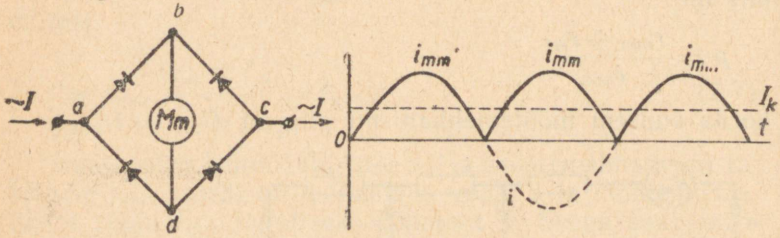
Valmistatakse nii taatel- ja laboratoorseid (täpsusklass 0,1 ... 0,5) kui ka tehnilisi (täpsusklass 1 ... 2,5) magnetoelektrilisi ampermeetreid ja voltmeetreid.

Neil on suur tundlikkus ja väike võimsuskadu. Välised magnetväljad ja temperatuur mõjuvad neile vähe, aga nad on tundlikud ülekoormuse suhtes.

c) Alaldiga ampermeetrid ja voltmeetrid

Alaldiga ampermeetrid koosnevad magnetoelektrilisest mõõtemehhanismist ja pooljuhtalaldist (joon. 7-12).

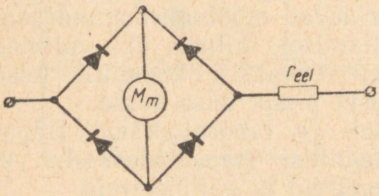
Ühel poolperioodil kulgeb vool mööda teed *a-b-d-c*, teisel poolperioodil mööda teed *c-b-d-a*. Seega läbib vahelduvvoolu poollaine mõõtemehhanismi igal poolperioodil ühes ja samas suunas. Pöördemomendi keskmine väärtus ja mehhanismi liikuva osa pöördenurk sõltuvad voolu keskväärtusest. Viimane on siinuselise voolu korral võrdeline voolu efektiivväärtusega, mille väärtused kantakse ka ampermeetri skaalale.



Joon. 7-12. Alaldiga ampermeetri lülitusskeem ja mõõtemehhanismi läbiva voolu kõver.

Mõõtepiirkonna laiendamiseks kasutatakse šunti.

Alaldiga voltmeetrid koosnevad magnetoelektrilisest mõõtemehhanismist koos pooljuhtalaldiga ja eeltakistist (joon. 7-13).



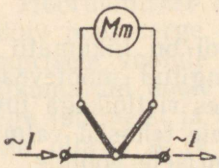
Joon. 7-13. Alaldiga voltmeetri lülitusskeem.

Mõõteriista liikuva osa pöördenurk on nagu ampermeetri puhul siinuselise mõõdetava suuruse korral võrdeline voolu efektiivväärtusega, kui aga voltmeetri takistus on konstantne, siis võrdeline ka pinge efektiivväärtusega. Voltmeetri skaala gradueeritakse pinge efektiivväärtustes.

Alaldiga ampermeetrite ja voltmeetrite täpsusklass on 1,5 ja 2,5. Neid kasutatakse peamiselt kõrgema sagedusega vahelduvvoolu mõõtmiseks (kuni 10 kHz).

d) Termoelektrilised ampermeetrid ja voltmeetrid

Termoelektriline ampermeeter koosneb magnetoelektrilisest mõõtemehhanismist ja termomuundurist (joon. 7-14), voltmeetris on aga lisaks veel eeltakisti.



Joon. 7-14. Termoelektriline ampermeeter.

Termopaariks nimetatakse kahte erinevast metallist juhet, mille ühed otsad on kokku keevitatud. Kokkukeevitamata termopaari otsi nimetatakse vabadeks, kokkukeevitatud otsi aga töötavaks otsaks.

Termopaari töötava otsa kuumutamisel tekib vabadel otstel potentsiaalide vahe, mida nimetatakse termoelektromotoorjõuks (termo-emj.). Termo-emj. sõltub termopaari moodustavatest metallidest ja termopaari töötava otsa ning vabade otsade temperatuuride vahest. Juhul kui vabade otste temperatuur on konstantne, sõltub termo-emj. vaid töötava otsa temperatuurist.

Kui me keevitame termopaari tööotsa külge kuumutusjuhtme, saame termomuunduri.

Vahelduvvoolu kulgemisel selles juhtmes juhe ja termopaari tööots kuumenevad, vabadel otstel tekib aga termo-emj. Kui nende otstega on ühendatud mõõtemehhanism, tekib viimases vool ja liikuv osa pöördub nurga võrra, mis sõltub termoelektromotoorjõust kui ka kuumutit läbivast vahelduvvoolust. Ampermeetri skaalale kantakse voolu efektiivväärtused.

Voltmeeter erineb ampermeetrist eeltakisti poolest, mis on ühendatud jadamisi termomuunduri kuumutusjuhtmega. Sel juhul ei sõltu liikuva osa pöördenurk mitte

ainult voolust, vaid ka voltmeetri klemmipingest. Skaalale kantakse selle pinge efektiivväärtused.

Termoelektriliste mõõteriistade täpsus vastab klassidele 1,5 ja 2,5.

Termoelektrilisi mõõteriistu kasutatakse kõrgema sagedusega ja kõrgsageduslikes (10 ... 50 MHz) vahelduvvooluringides.

e) Elektromagnetilised ampermeetrid ja voltmeetrid

Elektromagnetilise mõõtemehhanismi näit sõltub tema pooli läbivast voolust, mille väärtustes gradueeritakse ka ampermeetri skaala.

Elektromagnetilise ampermeetri pool on liikumatu ja tema mass ei mõju hõõrdumisest tingitud mõõteveale, järelikult võib teda valmistada mistahes ristlõikega juhtmest, s. t. kuitahes suurele voolule. Meie tehased valmistavad kilbiampermeetreid kuni 300-amprisele voolule.

Elektromagnetiline voltmeeter koosneb kuni 20 ... 30-milliamprisele voolule mõeldud sama süsteemi mõõtemehhanismist ja sellega jadamisi ühendatud manganiinist eeltakistist (joon. 7-10).

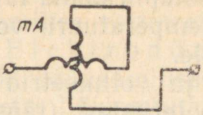
Eeltakisti aktiivtakistus on palju suurem mõõtemehhanismi pooli reaktiivtakistusest. Seega on voltmeetri näivtakistus praktiliselt aktiivtakistus ja ta ei sõltu voolu liigist ega sagedusest.

Voltmeetri konstantse takistuse korral sõltub tema liikuva osa pöördenurk mitte ainult pooli voolust, vaid ka viimasega võrdelisest voltmeetri klemmipingest, mille väärtused kantaksegi mõõteriista skaalale.

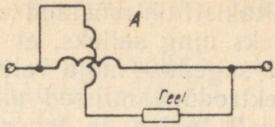
Elektromagnetilisi ampermeetreid ja voltmeetreid kasutatakse laialdaselt tehnilise sagedusega vahelduvvoolul töötavais seadmeis kilbiriistadena. Nende täpsusklass on 1,5 ja 2,5. Tehniliste mõõteriistade kõrval toodab meie tööstus ka kantavaid ampermeetreid ja voltmeetreid nii alalis- kui ka vahelduvvoolule täpsusklassiga 0,5.

f) Elektrodünaamilised ja ferrodünaamilised ampermeetrid ja voltmeetrid

Elektrodünaamiline ampermeeter kujutab endast sama süsteemi mõõtemehhanismi, mille poolid on ühendatud jadamisi või rööbiti sõltuvalt maksimaal-



Joon. 7-15. Elektrodünaamilise milliampermeetri lülitusskeem.



Joon. 7-16. Elektrodünaamilise ampermeetri lülitusskeem.

sest mõõdetavast voolust. Skaalale on kantud jaotused, mis vastavad ampermeetrit läbiva voolu väärtustele.

Hõõrdumisest tingitud vigade vähendamiseks tehakse liikuv pool kerge, ta valmistatakse vähem kui 100-milliamprisele voolule mõeldud väikese ristlõikega juhtmest. Liikumatuid poole valmistatakse küllaltki erineva ristlõikega juhtmeist ja seda sõltuvalt mõõdetavast voolust, mis võib olla 5 A ja enamgi. Seepärast ühendatakse milliampermeetrite poolid jadamisi (joon. 7-15), ampermeetrite omad aga rööbiti (7-16).

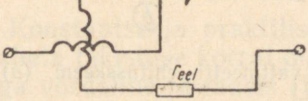
Poolide jadaühenduse korral on nende voolud võrdsed ja teineteisega faasis ning mõõteriista liikuva osa pöördenurk on võrdeline voolu ruuduga:

$$\alpha = k_1 I_1 I_2 \cos \psi = k_2 I^2. \qquad (7\text{-}8)$$

Ampermeetri poolide rööpühenduse ja harude konstantsete takistuste korral on mõlema pooli voolud I_1 ja I_2 võrdelised mõõdetava vooluga I. Juhul kui harude aktiiv- ja reaktiivtakistused on seejuures valitud nii, et voolud I_1 ja I_2 on faasis ($\psi = 0$), siis on ampermeetri liikuva osa pöördenurk nagu esimeselgi juhul võrdeline mõõdetava voolu ruuduga:

$$\alpha = k_1 I_1 I_2 \cos \psi = k_2 I^2.$$

Elektrodünaamilised voltmeetrid koosnevad sama süsteemi mõõtemehhanismist, mille poolid on valmistatud väikese ristlõikega 20 ... 50-milliamprisele voolule mõeldud traadist ja mis on ühendatud jadamisi nii teineteisega kui ka eeltakistiga (joon. 7-17).



Joon. 7-17. Elektrodünaamilise voltmeetri lülitusskeem.

Eeltakisti on mõeldud voltmeetri mõõtepiirkonna laiendamiseks ning selleks, et vähendada temperatuuri, voolu liigi ja sageduse mõju voltmeetri näidule.

Elektrodünaamilised ampermeetrid ja voltmeetrid on peamiselt taatel- ja laboratoorsed mõõteriistad (täpsusklassiga 0,1 ... 0,5), mis on mõeldud standardse ja kõrgema sagedusega (kuni 2000 Hz) vooluringide jaoks.

Elektrodünaamilised mõõteriistad on suure täpsusega ja sobivad nii alalis- kui vahelduvvooluringidesse. Nad on tundlikud ülekoormuse ja väliste magnetväljade mõju suhtes.

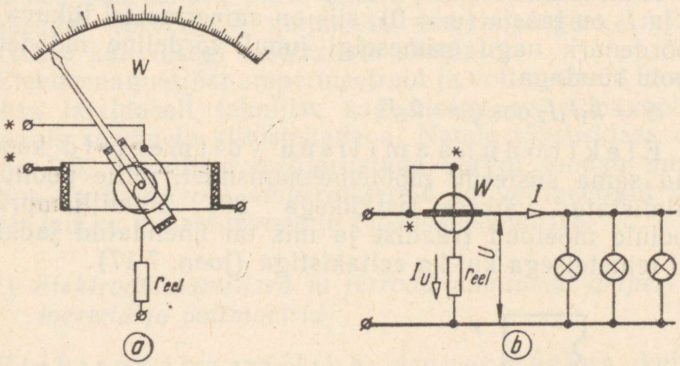
Ferrodünaamilistel ampermeetritel ja voltmeetritel on samasugused sisemised mõõteskeemid kui elektrodünaamilistel mõõteriistadel. Neid kasutatakse peamiselt isekirjutavate vahelduvvoolu-mõõteriistadena. Ferrodünaamiliste mõõteriistade täpsus pole suur (täpsusklass 1,5 ja 2,5), neil on aga suur pöördemoment, vastupidavus ja töökindlus. Välised magnetväljad neile praktiliselt ei mõju.

7-5. Võimsuse mõõtmine

Alalisvooluringi võimsuse P võime leida valemi

$$P = UI$$

abil, kusjuures voolu I mõõdame ampermeetriga ja pinget U voltmeetriga.



Joon. 7-18. Elektrodünaamilise vattmeetri ehitusskeem (*a*) ja lülitusskeem (*b*).

Lihtsam on alalisvooluringi võimsust mõõta elektrodünaamilise vattmeetriga.

Elektrodünaamiline vattmeeter koosneb elektrodünaamilisest mõõtemehhanismist (§ 7-3, *c*). Vattmeetri liikumatut pooli (joon. 7-18) nimetatakse jadaehk voolupooliks ja ta ühendatakse tarbijaga jadamisi. Liikuv pool ja eeltakisti r_{eel} moodustavad vattmeetri rööp- ehk pingeahela, mis ühendatakse rööbiti tarbijaga, mille võimsust mõõdetakse.

Alalisvooluringi lülitatud elektrodünaamilise mõõtemehhanismi liikuva osa pöördenurk on võrdeline voolupooli voolu I ja pingepooli voolu I_U korrutisega (7-4):

$$\alpha = k_1 I I_U.$$

Eeltakisti tagab pingeahela takistuse konstantsuse, mille tulemusena on pingeahela vool võrdeline vastava pingega ($I_U = U/r_U$). Järelikult

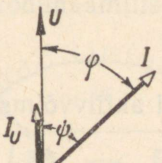
$$\alpha = k_1 I I_U = k_1 I \frac{U}{r_U} = k_3 I U = k_3 P. \qquad (7\text{-}9)$$

Seega on vattmeetri liikuva osa pöördenurk võrdeline võimsusega, mille väärtused kantaksegi vattmeetri skaalale.

Vahelduvvooluringis kasutatakse aktiivvõimsuse

$$P = UI \cos \varphi$$

mõõtmiseks elektrodünaamilisi ja ferrodünaamilisi vattmeetreid.



Joon. 7-19. Elektrodünaamilise vattmeetri vektordiagramm.

Sel juhul mõõtemehhanismi liikuva osa pöördenurk (7-5)

$$\alpha = k_1 I I_U \cos \psi.$$

Konstantse ja praktiliselt puhtaktiivse vattmeetri pingeahela takistuse korral on selle ahela vool $I_U = U/r_U$ pingega võrdeline ja faasis (joon. 7-19). Seega on vattmeetri

poolide voolude vaheline nihkenurk ψ võrdne pinge U ja voolu I vahelise nihkenurgaga.

Liikuva osa pöördenurk

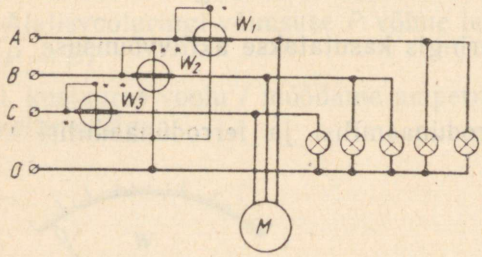
$$\alpha = k_1 I I_U \cos\psi = k_1 I \frac{U}{r_U} \cos\varphi = k_3 I U \cos\varphi = k_3 P \qquad (7\text{-}10)$$

on võrdeline aktiivvõimsusega.

Vattmeetri voolumähise klemmi, mis ühendatakse toiteallikapoolse juhtmega, nimetatakse generaatoriklemmiks. Vattmeetri pingeahela klemmi, mis on ühendatud voolumähise klemmiga, nimetatakse samuti generaatoriklemmiks. Generaatoriklemmid tähistatakse joonistel ja mõõteriistadel tärnikesega (*).

Lülituse koostamisel tuleb pöörata tähelepanu vattmeetri klemmide tähistusele, sest ühe pooli klemmide vahetamise korral muudame voolu suunda või muudame vastava pooli voolu faasi poole perioodi võrra. Selle tulemusena pöördub mõõteriista liikuv osa vastassuunas.

Võimsuse mõõtmisel vooluringides, kus vool on suurem kui 5 A ja pinge üle 220 V, lülitatakse vattmeetrid vooluringi läbi mõõtetrafode (§ 9-10).



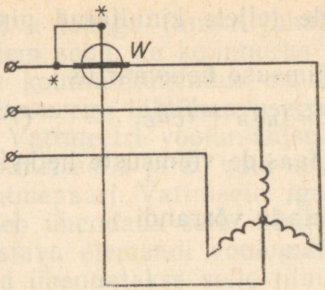
Joon. 7-20. Lülitusskeem võimsuse mõõtmiseks neljajuhtmelises kolmefaasilises süsteemis.

Neljajuhtmelise kolmefaasilise süsteemi aktiivvõimsuse

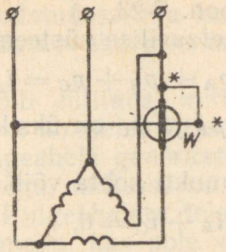
$$P = P_A + P_B + P_C =$$
$$= I_A U_A \cos\varphi_A + I_B U_B \cos\varphi_B + I_C U_C \cos\varphi_C \qquad (7\text{-}11)$$

mõõtmiseks kasutatakse kolme vattmeetrit, mis on lülitatud nii, et igaüks neist mõõdaks ühe faasi võimsust (joon. 7-20). Otsitava suuruse saame vattmeetrite näitude summana.

Mugavam on kasutada kolmeelemendilist (kolme mõõtesüsteemiga) vattmeetrit, mis koosneb kolmest liikumatust ja kolmest osutiga ühele teljele kinnitatud liikuvast



Joon. 7-21. Lülitusskeem mootori võimsuse mõõtmiseks väljatoodud nullpunkti korral.



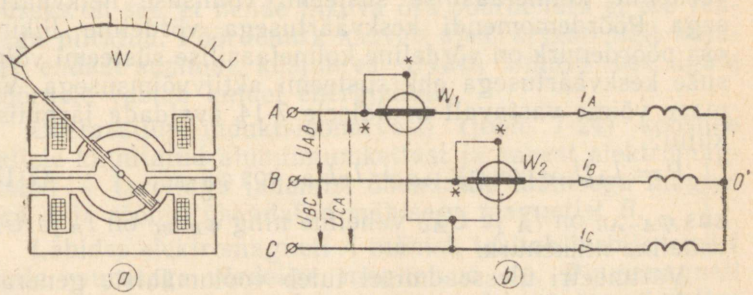
Joon. 7-22. Lülitusskeem kolmnurkühenduses mähistega mootori võimsuse mõõtmiseks.

poolist. Mõõteriista skaalale on kantud kolmefaasilise süsteemi võimsuse väärtused.

Kolmejuhtmelises kolmefaasilises süsteemis võime sümmeetrilisel koormusel mõõta ühe faasi võimsust ja, korrutades seda kolmega, saada kolmefaasilise süsteemi võimsuse. Joonisel 7-21 on lülitusskeem väljatoodud nullpunktiga mootori võimsuse mõõtmiseks.

Joonisel 7-22 on toodud lülitusskeem kolmnurka ühendatud elektrimootori võimsuse mõõtmiseks ühe vattmeetriga.

Kolmejuhtmelise kolmefaasilise süsteemi, mille koormus võib olla nii sümmeetriline kui ka mittesümmeetriline, võimsuse mõõtmiseks kasutatakse kaheelemendilist vattmeetrit. Kaheelemendilisel elektrodünaamilisel või ferrodünaamilisel vattmeetril on kaks liikumatut voolu-



Joon. 7-23. Kaheelemendilise vattmeetri ehitusskeem (*a*) ja lülitusskeem võimsuse mõõtmiseks kolmefaasilises kolmejuhtmelises süsteemis (*b*).

pooli ning kaks osutiga ühele teljele kinnitatud pingepooli (joon. 7-23, *a*).

Kolmefaasilise süsteemi võimsuse hetkväärtus

$$p = p_A + p_B + p_C = i_A u_A + i_B u_B + i_C u_C, \qquad (7\text{-}12)$$

kus p_A, p_B ja p_C on üksikute faaside võimsuste hetkväärtused.

Nullpunkti kohta võib kirjutada võrrandi

$$i_A + i_B + i_C = 0,$$

millest

$$i_C = -i_A - i_B. \qquad (7\text{-}13)$$

Tehes võimsuse avaldises asenduse (7-13), saame:

$$p = i_A u_A + i_B u_B - i_A u_C - i_B u_C =$$
$$= i_A (u_A - u_C) + i_B (u_B - u_C) = i_A u_{AC} + i_B u_{BC} =$$
$$= p_1 + p_2, \qquad (7\text{-}14)$$

sest faasipingete vahe on võrdne liinipingega:

$$u_A - u_C = u_{AC} \quad \text{ja} \quad u_B - u_C = u_{BC}.$$

Seega saab kolmefaasilise süsteemi võimsuse hetkväärtust avaldada kahe liidetava p_1 ja p_2 summana.

Ühendame kaheelemendilise vattmeetri (joon. 7-23, *b*) vastavalt avaldisele 7-14. Esimese elemendi voolumähise ühendame juhtmesse A (vool i_A), tema pingeahela aga juhtmete A ja C vahele (pinge u_{AC}), teise elemendi voolumähise ühendame juhtmesse B (vool i_B), tema pingeahela aga juhtmete B ja C vahele (pinge u_{BC}). Seega on vattmeetri liikuvale osale mõjuva pöördemomendi hetkväärtus võrdeline kolmefaasilise süsteemi võimsuse hetkväärtusega. Pöördemomendi keskväärtusega võrdeline liikuva osa pöördenurk on võrdeline kolmefaasilise süsteemi võimsuse keskväärtusega ehk süsteemi aktiivvõimsusega. Viimase võime vastavalt avaldisele 7-14 avaldada järgmisel kujul:

$$P = I_A U_{AC} \cos \varphi_{A-AC} + I_B U_{BC} \cos \varphi_{B-BC}, \qquad (7\text{-}15)$$

kus φ_{A-AC} on I_A ja U_{AC} vaheline ning φ_{B-BC} on I_B ja U_{BC} vaheline nihkenurk.

Vattmeetri ülesseadmisel tuleb voolumähiste generaatoriklemmid ühendada toiteallikate juurest tulevate juhtmetega, pingeahelate generaatoriklemmid aga juhtmetega, mis on tähistatud vastava pinge indeksis esimesel kohal

seisva tähega (antud juhul *A* ja *B*). Vaadeldud lülitusskeem sobib ka kolmnurka ühendatud tarbija korral, sest iga kolmnurkühendus on asendatav ekvivalentse aktiivvõimsusega tähtühendusega.

Vattmeetri voolumähiseid võib lülitada mitte ainult juhtmeisse *A* ja *B*, vaid suvalisse kolmefaasilise süsteemi juhtmepaari. Vattmeetri iga pingeahela generaatoriklemm tuleb ühendada selle liinijuhtmega, millesse on lülitatud vastava elemendi voolumähis. Pingeahelate teised klemmid ühendatakse selle liinijuhtmega, kus pole vattmeetri voolumähist.

Kaheelemendilise vattmeetri puudumise korral võib kasutada kahte ühefaasilist vattmeetrit analoogilises lülituses (joon. 7-23, *b*). Kolmefaasilise süsteemi aktiivvõimsuse saamiseks tuleb nende vattmeetrite näidud algebraliselt liita. Kui ühe vattmeetri osuti pöördub vales suunas, tuleb tema pingeahela klemmid ühendada vastupidiselt ja näitu lugeda negatiivseks.

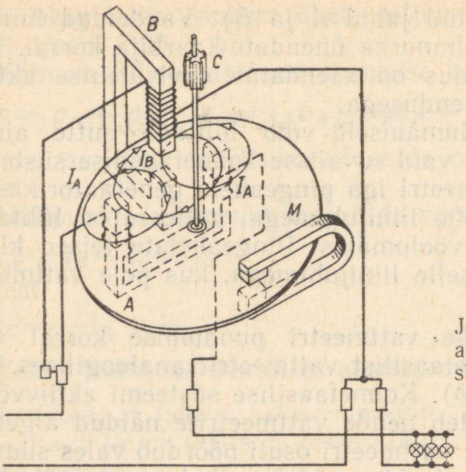
7-6. Elektrienergia mõõtmine

Elektrienergia mõõtmiseks kasutatakse elektrienergiaarvesteid. Mitmesuguste mõõtesüsteemidega arvestitest on levinumateks elektrodünaamilised arvestid alalisvooluenergia ja induktsioonarvestid vahelduvvooluenergia mõõtmiseks.

Elektriarvestid kujutavad endast summeerivaid mõõteriistu. Nende ja osutiriistade vaheliseks peamiseks erinevuseks on see, et nende liikuva osa pöördenurk ei ole vedruga piiratud. Pöördenurk kasvab ajas, arvesti näit kujutab endast summat, kusjuures arvesti liikuva osa igale pöördele vastab kindel energiahulk.

Ühefaasiline induktsioonarvesti (joon. 7-24) koosneb teljele kinnitatud alumiiniumkettast ja kahest elektromagnetist — tarbijaga jadamisi ühendatud mähisega magnetist *A* ja rööbiti ühendatud mähisega magnetist *B*.

Läbides elektromagneti *A* mähist, tekitab tarbija vool *I* enda suurusega võrdelise magnetvoo Φ_I. Pingemagneti mähist läbiv vool tekitab magnetvoo Φ_U, mis on võrdeline võrgupingega *U*. Need magnetvood läbivad ketast ja indutseerivad selles pöörisvoolud I_A ja I_B. Vool $I_A \equiv \Phi_I \equiv$



Joon. 7-24. Induktsioonarvesti ehitus- ja lülitusskeem.

$\equiv I$ ja $I_B \equiv \Phi_U \equiv U$. Voolu I_A ja magnetvoo Φ_U ning voolu I_B ja magnetvoo Φ_I vastastikuse mõju tulemusena tekib tarbija võimsusega võrdeline pöördemoment

$$M = k_1 IU \cos \varphi = k_1 P. \qquad (7\text{-}16)$$

See moment paneb arvesti ketta pöörlema. Ketta pöörlemisel indutseeritakse temas pidurdava püsimagneti M väljas pöörisvoolud (joon. 3-20), mis koos neid tekitanud magnetväljaga põhjustavad arvesti ketta pöörlemiskiirusega n võrdelise pidurdava momendi

$$M_p = k_2 n. \qquad (7\text{-}17)$$

Konstantsele koormusele vastab arvesti ketta konstantne pöörlemiskiirus, sest sel juhul on pöördemoment ja pidurdusmoment võrdsed:

$$M = M_p.$$

Seega

$$k_1 P = k_2 n,$$

millest järeldub, et

$$P = \frac{k_2}{k_1} n = kn,$$

s. t. arvesti ketta pöörlemiskiirus on võrdeline tarbija võimsusega.

Kui ajavahemiku t kestel tarbija võimsus on P, siis selle aja jooksul kulutatud energia

$$W = Pt = knt = kN. \tag{7-18}$$

Seega on tarbitud energia võrdeline arvesti ketta pöörete arvuga N.

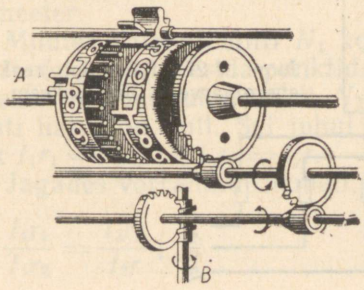
Arvesti konstandiks nimetatav tegur

$$k = \frac{W}{N} \tag{7-19}$$

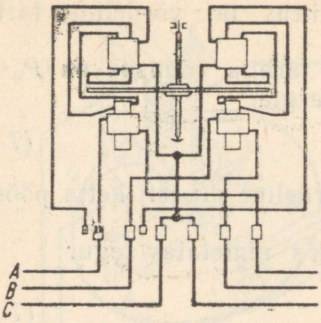
on arvuliselt võrdne arvesti ketta ühe pöörde vältel võrgust tarbitud energiaga.

Tarbitud energia registreerib arvestusmehhanism (joon. 7-25), mille paneb tiguülekande (või hammasülekande) B abil tööle arvesti ketta pöörlev telg. Arvesti ketta pöörlemisel hakkavad pöörlema ka viis rattakest, mille silindrilisele külgpinnale on kantud numbrid nullist üheksani. Rattakesed asuvad teljel A vabalt. Esimene neist (parempoolseim joonisel 7-25) on ühendatud hammasrattaga ja pöörleb arvesti ketta pöörlemisel pidevalt. Esimese rattakese täispööre põhjustab teise rattakese pöördumise 1/10 täispöörde võrra jne. Rattakeste ees on alumiiniumleht, milles olevatest akendest näeme igal rattakesel vaid ühte numbrit. Neist akendest loetud arv annabki meile energiahulga, mille arvesti on registreerinud kogu tööaja vältel alates hetkest, mil ta näitas vaid nulle.

Selleks et leida teatud ajavahemiku jooksul tarbitud



Joon. 7-25. Arvestusmehhanismi skeem.



Joon. 7-26. Kaheelemendilise ühekettalise arvesti ehitus- ja lülitusskeem.

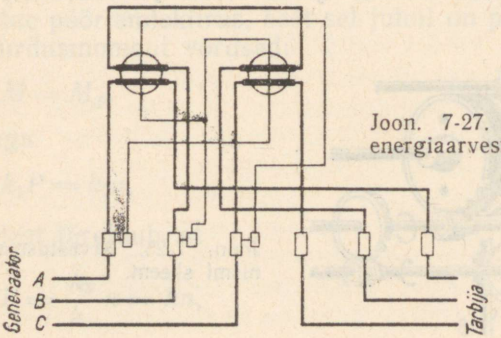
energiahulka, tuleb arvesti näidust kontrollitava ajavahemiku lõpul lahutada tema näit selle ajavahemiku algul.

Vastavalt standardile ГОСТ 6570-60 valmistatakse aktiivenergia arvesteid täpsusklassiga 1, 2 ja 2,5, reaktiivenergiaarvesteid aga täpsusklassiga 2 ja 3.

Elektrienergia mõõtmiseks neljajuhtmelises kolmefaasilises süsteemis kasutatakse kolmeelemendilist arvestit. Tal on kolm samasugust elektromagnetite komplekti nagu ühefaasilisel arvestil, mis mõjutavad kolme ühisele teljele kinnitatud ketast. Arvestil on üks arvestusmehhanism. Arvesti lülitusskeem on põhimõtteliselt sama mis kolmeelemendilisel vattmeetril (joon. 7-20).

Kolmejuhtmelises kolmefaasilises süsteemis kasutatakse energia mõõtmiseks kaheelemendilisi kahe- või ühekettalisi arvesteid (joon. 7-26).

Kaheelemendilise arvesti asemel võib kasutada ka kaht ühefaasilist arvestit (paari arvestid). Nii kaheelemendilise



Joon. 7-27. ИР-tüüpi reaktiivenergiaarvesti lülitusskeem.

arvesti kui ka paaris arvestite lülitusskeem ei erine kaheelemendilise vattmeetri lülitusskeemist (joon. 7-23, *b*).

Kolmefaasilise süsteemi reaktiivenergia mõõtmiseks kasutatakse reaktiivenergiaarvesteid. Joonisel 7-27 on toodud ühe sellise ИР-tüüpi arvesti lülitusskeem.

See arvesti on kaheelemendiline induktsioonarvesti. Tema igal voolumagnetil on kaks mähist, mis loovad südamikes sellise suuruse ja faasiga magnetvood, mis tekitavad koos pingemagnetite magnetvoogudega reaktiivvõimsusega võrdelise pöördemomendi. Arvestusmehhanism registreerib vahetult reaktiivenergiat.

Vattmeetrite ja arvestite voolu ja pinge mõõtepiirkonna laiendamiseks kasutatakse mõõtetrafosid (§ 9-10).

7-7. Takistuse mõõtmine

a) *Sildlülituses takistusmõõtur*

Takistuse mõõduks, s. o. takistuse ühiku etaloniks, on t a a t e l t a k i s t u s p o o l. Kindla lülitusskeemi järgi ühendatavat takistuspoolide komplekti nimetatakse t a k i s t u s s a l v e k s.

Takistussalvesid on nii p i s t i k u t e g a kui ka p ö ö r d l ü l i t i t e g a. Esimestes toimub poolide ümberühendamine pistikute, teistes pöördlülitite abil. Joonisel 7-28 on toodud ühe viiepoolilise pöördlülitiga takistussalve dekaadi lülitusskeem. Tema klemmide vahelist takistust võib pöördlüliti abil muuta 1 Ω kaupa 0-st kuni 9 Ω-ni.

Takistusmõõtesild, mille lülitusskeem on toodud joonisel 7-29, koosneb kolmest silla õlast — takistussalvedest r_1, r_2 ja r. Neljandas silla õlas on mõõdetav takistus r_x. Ühte silla diagonaali lülitatakse toiteallikas, teise galvanomeeter.

Muutes suletud lüliti N_1 korral kolme silla õla takistusi, võime reguleerida punktide A ja B potentsiaalid võrdseteks, millisel juhul lüliti N_2 sulgemisel galvanomeetri osuti hälve on null. Sel juhul $U_{CA} = U_{CB}$ ja $U_{AD} = U_{BD}$ ehk $I_1 r_1 = I_2 r_x$ ja $I_1 r_2 = I_2 r$.

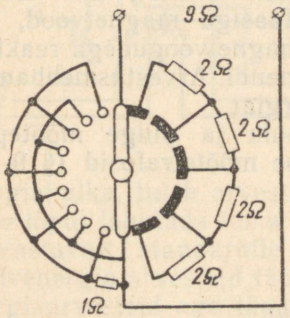
Jagades võrrandid liikmeti, saame:

$$\frac{I_1 r_1}{I_1 r_2} = \frac{I_2 r_x}{I_2 r},$$

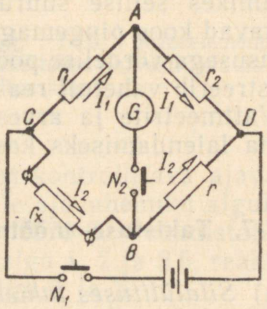
millest

$$r_x = r\frac{r_1}{r_2}. \qquad (7\text{-}20)$$

Selle tasakaalustatud silla jaoks tuletatud valemi abil arvutataksegi otsitav takistus.



Joon. 7-28. Viie pooliga pöördlülitiga takistussalv.



Joon. 7-29. Sildlülituses takistusmõõtur.

Kui silla kolme õla takistused ja toiteallika pinge on konstantsed, siis sõltub vool galvanomeetris vaid takistusest r_x. See lubab kanda galvanomeetri skaalale jaotused, mis annavad meile mõõdetava takistuse või mõne seda määrava või sellele mõjuva suuruse (näiteks temperatuur) väärtused. Selliseid mõõtesildu nimetatakse tasakaalustamata sildadeks.

b) Takistuse määramine ampermeetri ja voltmeetriga

Ampermeetri ja voltmeetri (joon. 7-30) näitude järgi leitud takistus

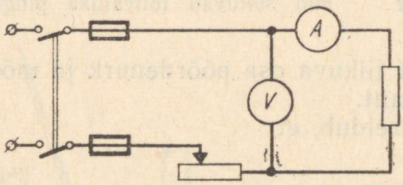
$$r'_x = \frac{U}{I}$$

on otsitava takistuse tegelikust väärtusest r_x ampermeetri takistuse võrra suurem, sest joonisel 7-30 toodud lülituse puhul mõõdab voltmeeter pingete summat ampermeetril ja takistil r_x. Mõõtmisviga on siin väike siis, kui mõõdetav takistus on palju suurem ampermeetri takistusest.

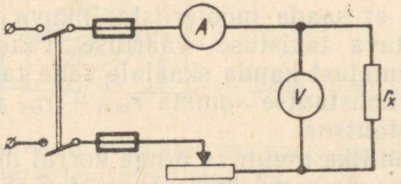
Mõõteriistade (joon. 7-31) näitude järgi leitud takistus

$$r''_x = \frac{U}{I}$$

on aga mõõdetava takistuse tegelikust väärtusest väik-



Joon. 7-30. Lülitusskeem takistuse mõõtmiseks ampermeetri ja voltmeetriga (suuremate takistuse väärtuste korral).



Joon. 7-31. Lülitusskeem takistuse mõõtmiseks ampermeetri ja voltmeetriga (väiksemate takistuse väärtuste korral).

sem, sest ampermeeter mõõdab takisti r_x ja voltmeetri voolude summat. Siin on mõõtmisviga väike siis, kui mõõdetav takistus on tunduvalt väiksem voltmeetri takistusest.

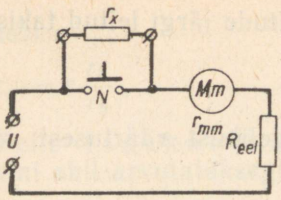
c) Oommeetrid

Takistuse vahetuks mõõtmiseks määratud mõõteriistu nimetatakse oommeetriteks või megaoommeetriteks (megeriteks). Nad jagunevad kahte rühma: oommeetrid, mille näit sõltub toiteallika pingest, ja oommeetrid, mille näit toitepingest ei sõltu.

Esimesse rühma (joon. 7-32) kuuluvad oommeetrid kujutavad endast eeltakistiga (r_{eel}) magnetoelektrilist mõõtemehhanismi, millega ühendatakse jadamisi mõõdetav takisti r_x. Nad on nn. jadaskeemiga. Oommeeter varustatakse sageli kuivelementidest patareiga.

Avatud survenupplüliti N korral vooluringi vool

$$I = Ca = \frac{U}{r_x + r_{mm} + r_{eel}}, \qquad (7\text{-}21)$$



Joon. 7-32. Jadaskeemiga oommeetri lülitusskeem (oommeetri näidud sõltuvad toiteallika pingest).

kus α ja C on vastavalt liikuva osa pöördenurk ja mõõtemehhanismi voolukonstant.

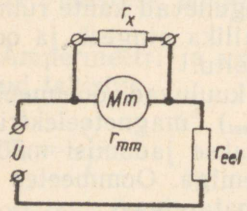
Avaldisest (7-21) järeldub, et

$$\alpha = \frac{U}{C} \frac{1}{r_x + r_{mm} + r_{eel}}.$$

Seega tuleb selleks, et saada mõõteriista liikuva osa pöördenurga ja mõõdetava takistuse väärtuse vahelist ühest sõltuvust, s. o. võimalust kanda skaalale selle takistuse väärtused, tagada konstantse summa $r_{mm} + r_{eel}$ juures veel suhte U/C konstantsus.

Selleks et hoida toiteallika muutuva pinge korral muutumatuna suhet U/C, on vaja reguleerida suurust C. Seda on võimalik teha, muutes magnetilise šundi abil magnetvoo tihedust mõõtemehhanismi õhupilus. Magnetiline šunt kujutab endast terasplaati, mida saab vastava kruvi pööramisega lähendada mõõtemehhanismi pooluskingadele N' ja S' (joon. 7-1) ning neist eemaldada.

Suuruse C reguleerimiseks tuleb oommeetriga ühendada patarei ja takisti r_x, seejärel sulgeda lüliti N ja reguleerida magnetilise šundi asend nii, et oommeetri osuti näitaks skaalal nulli. Seejärel avada lüliti ja lugeda skaalalt mõõdetava suuruse väärtus.

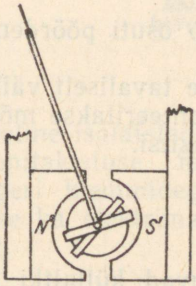


Joon. 7-33. Rööpskeemiga oommeetri lülitusskeem (oommeetri näidud ei sõltu toiteallika pingest).

Joonisel 7-33 on toodud nn. rööpskeemiga oommeetri lülitusskeem. Seal on mõõdetav takisti r_x lülitatud rööbiti mõõtemehhanismiga. Saab näidata, et konstantse

summa $r_{mm} + r_{eel}$ ja suhte U/C korral sõltub liikuva osa pöördenurk mõõdetava takistuse suurusest üheselt.

Teise rühma oommeetrites on mõõtemehhanismi teljel kaks mähisega raami (pöördpooli) (joon. 7-34). Vool juhitakse mähistesse momendivabade metall-lindikeste kaudu.



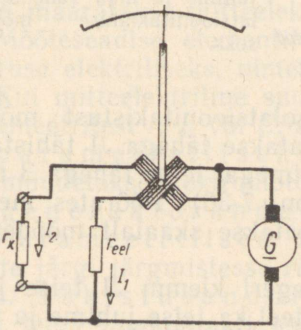
Joon. 7-34. Logomeetri mõõtemehhanism.

Voolud mähistes on vastassuunalised ja koos magnetväljaga tekitavad nad ka kaks vastassuunalist momenti. Nende momentide vahe toimel pöördub mehhanismi liikuv osa sellise nurga võrra, et momendid tasakaalustavad teineteist. Mehhanismi liikuva osa pöördenurk on määratud raamide mähiste voolude suhtega:

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right).$$

Mõõtemehhanisme, mille pöördenurk sõltub voolude suhtest, nimetatakse l o g o m e e t r i t e k s.

Logomeetrist oommeetri (joon. 7-35) üks rööpharu



Joon. 7-35. Logomeetrist oommeetri lülitusskeem.

koosneb raami mähisest ja mõõdetavast takistist r_x, teine aga teise raami mähisest ja eeltakistist r_{eel}. Pidades silmas, et voolud rööpharudes on pöördvõrdelised harude takistustega, võime kirjutada:

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left(\frac{r_x}{r_{eel}}\right).$$

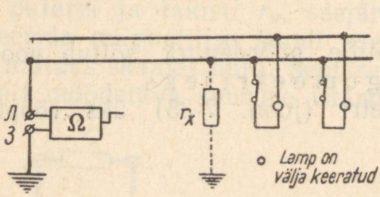
Kuna r_{eel} on konstantne, siis sõltub osuti pöördenurk vaid mõõdetava takistuse suurusest.

Oommeetri toiteallikana kasutatakse tavaliselt väikest magnetoelektrilist generaatorit, mis monteeritakse mõõteriista korpusesse ja mida käitatakse käsitsi.

d) Isolatsioonitakistuse mõõtmine

Elektriseadmete isolatsioonis toimuvad küllaltki kergesti mitmesugused muutused ja sellepärast tuleb elektriseadmete isolatsioonitakistust perioodiliselt kontrollida.

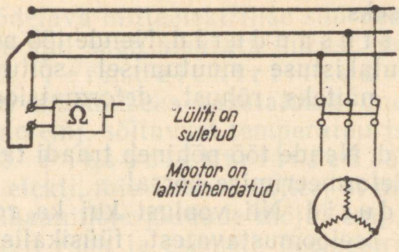
Elektriseadmete ehituse eeskirjade kohaselt peab madalpingeseadmetes isolatsioonitakistus mistahes elektrivõrgu osas, kas kahe teineteisele järgneva kaitsme vahel või viimaste kaitsmete järel, olema vähemalt 1000 Ω võrgupinge iga voldi kohta. Seega ei tohi 127-voldise pingega võrgus isolatsioonitakistus olla väiksem kui $1000 \cdot 127 = 127\,000$ Ω.



Joon. 7-36. Lülitusskeem juhtme ja maa vahelise isolatsioonitakistuse mõõtmiseks.

Pingevaba elektrivõrgu isolatsioonitakistust mõõdetakse megeriga. Selleks ühendatakse tähega Л tähistatud mõõteriista klemm vastava juhtmega, teine tähega З märgitud klemm aga maaga (joon. 7-36). Pöörates megeri vänta ettenähtud kiirusega, loetakse skaalalt mõõdetava takistuse väärtus.

Järgnevalt ühendatakse megeri klemm Л teise juhtmega ja leitakse analoogilisel teel ka teise juhtme ja maa



Joon. 7-37. Lülitusskeem juhtmetevahelise isolatsioonitakistuse mõõtmiseks.

vaheline isolatsioonitakistus. Kahe juhtme vahelise isolatsioonitakistuse mõõtmiseks tuleb juhtmed ühendada megeri klemmidega (joon. 7-37). Samal viisil mõõdetakse ka elektrimasinate ja -aparaatide isolatsioonitakistust.

7-8. Mitteelektriliste suuruste elektriline mõõtmine

Mitteelektriliste suuruste mõõtmine elektrilisel teel on üks laialdasemaid ja kiiremini arenevaid mõõtetehnika alasid.

Elektriliste mõõtmismeetodite kiire areng on seletatav võimalusega mõõta pidevalt ja kauge maa tagant, kusjuures elektrilistel mõõtmismeetoditel on suur täpsus ja tundlikkus.

Mistahes tehnoloogilise protsessi ranget kontrolli saab tagada vaid mõõtetehnika ja automaatika vahendite abil.

Enamasti taandub mitteelektrilise suuruse mõõtmine selle suuruse muundamiseks temast sõltuvaks elektriliseks suuruseks ja viimase mõõtmiseks. Saadud tulemuse järgi määratakse mitteelektrilise suuruse väärtus.

Mõõteseadise elementi, mis muundab mitteelektrilise suuruse elektriliseks, nimetatakse *anduriks*.

Kui mitteelektriline suurus muudab ühte elektrilistest parameetritest *r, L* või *C,* siis nimetatakse vastavat andurit *parameetriliseks*, kui aga mitteelektriline suurus muudetakse elektromotoorjõuks, siis nimetatakse andurit *generaatoranduriks*.

Parameetrilised andurid jagatakse tööpõhimõtte järgi järgmistesse rühmadesse.

1. *Takistusandurid*. Reostaadi takistuse sõltuvust tema liugkontakti asendit määravast mitteelektrili-

sest suurusest kasutatakse vedeliku mahu ja taseme, detailide nihete jms. mõõtmiseks.

2. Kontakt-takistusandurid. Nende töö põhineb kontakti üleminekutakistuse muutumisel sõltuvalt mõõdetavast suurusest, näiteks rõhust, deformatsioonidest jms.

3. Traatandurid. Nende töö põhineb traadi takistuse muutumisel tema deformeerimise korral.

4. Termistorandurid. Nii voolust kui ka reast ümbritsevat keskkonda iseloomustavatest füüsikalistest suurustest sõltuvat juhtme takistuse ja temperatuuri vahelist seost kasutatakse temperatuuri, gaaside liikumiskiiruse, gaaside koostise jms. määramiseks.

5. Elektrolüütandurid. Elektrolüüdi lahuse takistuse ja tema kontsentratsiooni vahelist seost kasutatakse elektrolüütide lahuste kontsentratsioonide mõõtmiseks ning vedelike ja vedelikes lahustunud gaaside kvantitatiivseks analüüsiks.

6. Induktiivandurid. Anduri induktiivsuse sõltuvust ühe anduri detaili asendist, mis muutub mõõdetava suuruse mõjul, kasutatakse jõu, rõhu ja joonnihete mõõtmiseks.

7. Magnetostriktsioonandurid. Anduri ferromagnetilise südamiku magnetilise läbitavuse ja mähise induktiivtakistuse sõltuvust südamikus esinevatest mehhaanilistest pingetest kasutatakse mehhaaniliste suuruste mõõtmiseks.

8. Mahtuvusandurid. Siin kasutatakse jõu, rõhu, joonnihke, pöördenurga, aine hulga või niiskusesisalduse mõõtmiseks mahtuvuse muutumist vastava suuruse mõjul.

9. Fotoelektrilised andurid. Mõõdetavast mitteelektrilisest suurusest sõltuva valgusvooga määratud fotovoolu või mõõdetavast suurusest sõltuva sagedusega fotovoolu impulsside abil on võimalik määrata kehade joonmõõtmeid, temperatuuri, vedelike ja gaaside läbipaistvust.

10. Ionisatsioonandurid. Ionisatsioonivoolu sõltuvust reast teguritest kasutatakse gaasi analüüsiks ja selle tiheduse määramiseks, esemete geomeetriliste mõõdete määramiseks jne.

Generaatorandurid jagunevad tööpõhimõtte järgi järgmisteks rühmadeks.

1. Induktsioonandurid. Neis indutseeritakse mõõdetava mitteelektrilise suuruse mõjul emj., mille mõõtmise abil saab määrata kiirust, joonnihet ja pöördenurka.

2. Termoelektrilised andurid. Temperatuuri mõõtmiseks kasutatakse anduri vooluringis tekkiva termo-emj. sõltuvust temperatuurist.

3. Piesoelektrilised andurid. Piesoelektrilist efekti, mis seisneb selles, et mõnedes kristallides tekib mehhaaniliste jõudude mõjul emj., kasutataksegi jõudude, samuti rõhu ja esemete geomeetriliste mõõdete määramiseks.

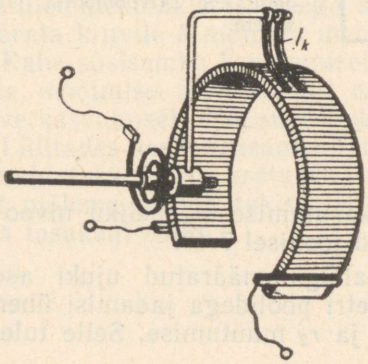
Seadis, mis on mõeldud mitteelektriliste suuruste elektriliseks mõõtmiseks, koosneb lihtsamal juhul andurist, ühendusjuhtmetest ja mõõtemehhanismist, mille skaalale kantakse tavaliselt mõõdetava mitteelektrilise suuruse väärtused. Enamasti on mõõteseade aga keerukam ja temas kasutatakse erilülitusi, toiteallikaid, stabilisaatoreid, alaldeid, võimendeid jms.

Vaatleme mõningate levinumate andurite tööpõhimõtteid ja lihtsustatud lülitusskeeme.

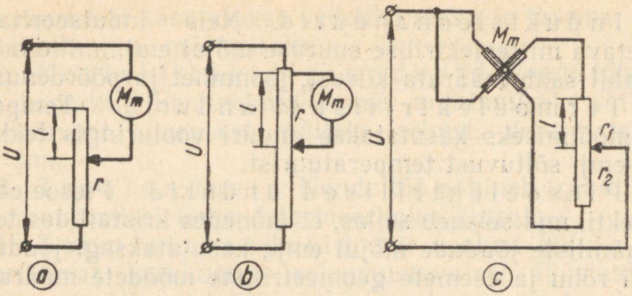
a) Takistusandurid

Takistusanduriks on reostaat (joon. 7-38), mille liugkontakt nihkub mõõdetava mitteelektrilise suuruse x toimel. Seega sõltub reostaadi takistus r suurusest x:

$$r = f(x).$$



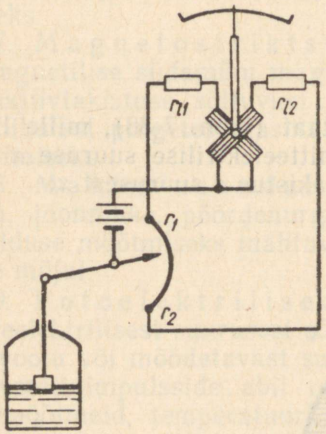
Joon. 7-38. Takistusandur.



Joon. 7-39. Reostaatanduriga lülitusskeeme.

Mõõtnud takistuse r, võib leida x.

Joonistel 7-39, *a* ja *b* toodud lülitusskeemides kasutatakse koos reostaatanduriga üheraamilist magnetoelektrilist mõõtemehhanismi, joonisel 7-39, *c* toodud skeemis aga kahe raamiga logomeetri mehhanismi.



Joon. 7-40. Nivoomõõturi lülitusskeem.

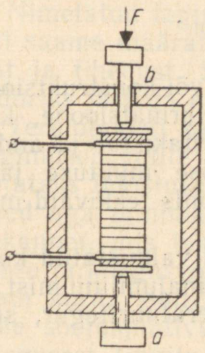
Näide reostaatanduri kasutamisest vedeliku nivoo või mahu mõõtmisel on toodud joonisel 7-40.

Vedeliku nivoo või mahuga määratud ujuki asendi muutus põhjustab logomeetri poolidega jadamisi ühendatud takistite takistuste r_1 ja r_2 muutumise. Selle tulemu-

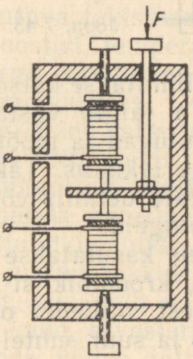
sena muutub poolide voolude suhe ja mõõteriista näit. Mõõteriista skaala gradueeritakse mõõdetava suuruse, s. o. kas pikkuse või mahu ühikutes.

b) Kontakt-takistusandurid

Kümnest kuni viieteistkümnest süsikettast ($d = 0{,}5 \ldots 1$ cm) koosneva samba otstel asuvad messingkettad, mille küljes on väljaviigud mõõteahelasse ühendamiseks. Messingketastele suruvad kruvid *a* ja *b* (joon. 7-41), mis on ketastest isoleeritud vilgust vahelehtedega.



Joon. 7-41. Süsiketastega takistusandur.



Joon. 7-42. Süsiketastega diferentsiaal-takistusandur.

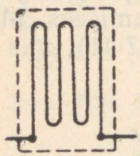
Süsisamba elektriline takistus sõltub sambale avaldatavast survest, sest selle muutumisel muutub ketastevaheline üleminekutakistus. Seega saab samba takistuse järgi määrata kruvile *b* mõjuvat mehhaanilist jõudu *F*.

Kahe süsisamba kasutamisel (joon. 7-42) saab suurendada mõõtmise täpsust, kui rakendada jõudu *F* nii, et surve kasvamisel ühes süsisambas see teises väheneb.

Lülitades need süsisambad mõõtesilla naaberõlgadesse, kõrvaldatakse temperatuuri mõju mõõtmistulemustele, sest mõlema samba takistused muutuvad ühesuguselt ja silla tasakaal säilib.

c) Traatandurid

Need andurid valmistatakse peenest traadist ($d = 0{,}02 \ldots 0{,}04$ mm), mille otsad keevitatakse vasest väljaviikude külge (joon. 7-43). Traat kinnitatakse spetsiaalse liimiga kahe 0,1 ... 10 cm^2 suuruse õhukese paberilehe vahele.



Joon. 7-43. Traatanduri skeem.

Andur liimitakse katsetatava detaili või konstruktsiooni pinnale. Ta jälgib vastava detaili deformatsioone, kusjuures muutuvad ta mõõtmed, traadi eritakistus ja anduri summaarne takistus. Takistuse suhtelise muutuse järgi saab määrata detailis või konstruktsioonis tekkivaid mehhaanilisi pingeid.

Andureis kasutatakse traati, mis on valmistatud konstantaanist, kroomniklist või raud-kroomalumiiniumist — materjalidest, milledel on väike temperatuuritegur, suur eritakistus ja suur suhteline tundlikkus

$$k = \frac{\Delta r/r}{\Delta l/l},$$

kus Δr on takistuse muutus traadi pikenemisel Δl võrra.

Anduri takistus on tavaliselt mõnisada oomi, takistuse suhteline muutus aga mõni kümnendik protsenti.

Selleks et kõrvaldada temperatuuri mõju, kasutatakse kahte ühesugust andurit, mis lülitatakse mõõtesilla naaberõlgadesse. Üks neist on «töötav», teine «mittetöötav». Esimene liimitakse katsetatava detaili pinnale, teine aga katsetatava detailiga samast materjalist keha pinnale.

Traatandurid kõlbavad vaid ühekordseks kasutamiseks (s. t. neid saab liimida ainult üks kord).

Ühest ja samast traadist ühesuguse tehnoloogia järgi valmistatud ja ühesuguse takistusega andurite partii karakteristikute $r = f(\Delta l/l)$ erinevus ei ületa 1%. See lubab ühe anduri jaoks ülesvõetud karakteristikut kasutada ka teiste samasse partiisse kuuluvate andurite puhul.

d) Termotakistid

Elektrivool tekitab juhet läbides soojust, millest osa läheb juhtme temperatuuri tõstmiseks, osa aga siirdub konvektsiooni, soojusjuhtivuse ja kiirguse teel ümbritsevasse keskkonda.

Soojusliku tasakaalu korral sõltuvad juhtme temperatuur ja takistus juhet läbivast voolust ning mitmesugustest teguritest, mis mõjutavad soojusvahetust ümbrusega. Viimaste hulka kuuluvad juhtme mõõtmed, konfiguratsioon, armatuur, juhtme ja keskkonna temperatuur, keskkonna liikumise kiirus, koostis, tihedus jms.

Nimetatud tegurite mõjul muutuva takistuse mõõtmise abil saame määrata gaasisegu koostist, temperatuuri, kiirust ja tihedust. Sellisel eesmärgil kasutatav juhe ongi anduriks ja teda nimetatakse termotakistiks.

Termotakisti kasutamise korral tuleb talle tagada töötingimused, mille puhul mõõdetav mitteelektriline suurus mõjutaks takistuse suurust maksimaalselt, ülejäänud suurused aga minimaalselt. Tuleb püüda vähendada soojusülekannet, mis tekib juhtme väljundklemmide soojusjuhtivuse ja kiirgusvõime tõttu. Kui juhtme pikkus on 500 või enam korda suurem läbimõõdust, siis võib väljundklemmide soojusjuhtivusest tingitud kaod arvestamata jätta. Kiirgusest tingitud soojusülekande võime jätta arvestamata, kui juhtme ja keskkonna temperatuuride vahe ei ületa 100° C.

Vaatleme gaasianalüsaatoreid, milles termotakistit kasutatakse gaaside segus teatava gaasi sisalduse määramiseks.

Kahe teineteisega mitte reageeriva gaasi segu soojusjuhtivus on võrdne komponentide soojusjuhtivuste aritmeetilise keskmisega:

$$\lambda_{12} = \frac{\lambda_1 a + \lambda_2 b}{100},$$

kus λ_{12}, λ_1 ja λ_2 on segu ja komponentide soojusjuhtivused ning a ja b gaasisegu komponentide protsendilised hulgad.

Kuna $b = 100 - a$, siis

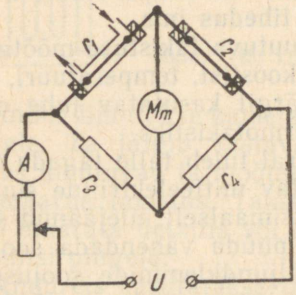
$$\lambda_{12} = \frac{\lambda_1 a + \lambda_2 (100 - a)}{100},$$

millest

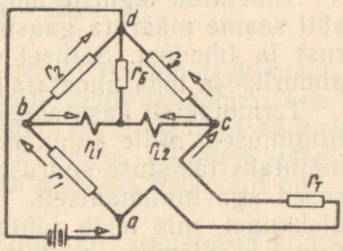
$$a = 100\,\frac{\lambda_{12} - \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}.$$

Mõõtnud segu soojusjuhtivuse λ_{12} ja teades soojusjuhtivusi λ_1 ja λ_2, saab määrata ühe komponendi protsentuaalse sisalduse gaasisegus. Selleks on vaja, et termotakisti temperatuur ja ka takistus sõltuksid termotakistis kulgeva voolu korral vaid segu soojusjuhtivusest λ_{12}, s. o.

$r = f(\lambda_{12})$ või $r = f_1(a)$.



Joon. 7-44. Süsihappegaasi analüsaatori lülitusskeem.



Joon. 7-45. Logomeetriga takistustermomeetri sildlülitus.

Süsihappegaasi analüsaatoris (joon. 7-44) on mõõtesilla naaberõlgadesse lülitatud kaks ühesugust termotakistit r_1 ja r_2. Esimene neist on töötav ja ta asub kambris, mida läbib gaasisegu, teine — mittetöötav — asub õhuga täidetud kinnises kambris. Mõõteriista skaalale kantud jaotused annavad meile CO_2 sisalduse.

Takistustermomeetreis kasutatakse temperatuuri mõõtmiseks termotakisteid. Neid valmistatakse tavaliselt suure takistuse temperatuuriteguriga metallidest: plaatinast (kuni 500° C), niklist (kuni 300° C), vasest (kuni 150° C). Traat keritakse plastmassist või vilgust alusele, mis paigutatakse kaitsekesta. Viimase mõõtmed ja kuju sõltuvad termomeetri otstarbest.

Termomeetri takistus on tavaliselt 50 või 100 Ω.

Anduri ja ka teda ümbritseva keskkonna temperatuuri määratakse anduri takistuse suuruse järgi.

Mõõtmisteks kasutatakse sageli magnetoelektrilise

logomeetriga tasakaalustamata sildlülitust (joon. 7-45). Silla kolm õlga r_1, r_2 ja r_3 on valmistatud manganiinist, neljandaks õlaks on aga termotakisti r_T. Logomeetri raamide mähised (r_{L1} ja r_{L2}) on lülitatud silla diagonaali ja nende ühine punkt on läbi takisti r_5 ühendatud silla tipuga *d*.

Silla tasakaalu korral ($r_2 = r_3$, $r_1 = r_T$; $r_{L1} = r_{L2}$), s. t. kui punktide *b* ja *c* potentsiaalid on võrdsed, on logomeetri mähiste voolud võrdsed ja vastassuunalised. Tasakaalu rikkumise korral logomeetri mähiste voolud muutuvad. Nende juurdekasvud ΔI_{L1} ja ΔI_{L2} on suuruselt erinevad ja vastupidise märgiga, mis põhjustab logomeetri osuti pöördumise. Pöördenurk

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left(\frac{I_{L1} + \Delta I_{L1}}{I_{L2} + \Delta I_{L2}}\right) = f_1(r_T) = f_2(\Theta).$$

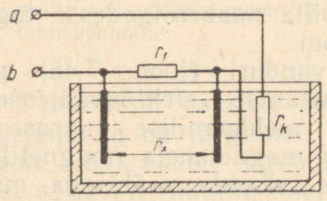
Pooljuht-termotakistite kasutamisest vt. ptk. 13.

e) Elektrolüütandurid

Elektrolüüdi erijuhtivus sõltub kontsentratsioonist; seepärast võibki tema kontsentratsiooni määrata ta takistuse suuruse järgi.

Elektrolüütandur kujutab endast uuritava elektrolüüdiga anumat, milles on kaks elektroodi (joon. 7-46).

Selleks et vältida elektrolüüsi, mõõdetakse elektrolüüdi takistust vahelduvvoolule. Temperatuuri mõju kõrvaldamiseks kasutatakse vastavaid kompensatsioonilülitusi. Üks termokompensaator on kujutatud joonisel 7-46. Kompensaatoriks on lahusesse paigutatud vasknikkeltakistus r_k, mis on ühendatud sõlmpunkti, millega on ühenduses mõõdetava elektrolüüdisamba takistus r_x ja viimast šunteeriv manganiintakisti r_1. Takistused r_1 ja r_k on valitud nõnda, et temperatuuri kõikumisest tingitud elektrolüüdi takis-



Joon. 7-46. Elektrolüütanduri skeem.

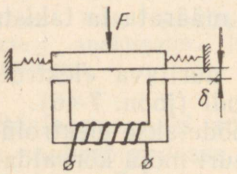
tuse muutus oleks takistuse r_k muutumisega kompenseeritud täpsusega 1 ... 2%.

Mõõdetav takistus r_x leitakse skeemi punktide *a* ja *b* vahelise takistuse $r_{a,b}$ järgi, see aga määratakse tasakaalustamata mõõtesilla abil (§ 7-7, *a*), mille ühte õlga lülitatakse andur (klemmid *a*, *b*). Silda toidetakse läbi stabilisaatori vahelduvvooluvõrgust. Silla väljunddiagonaali lülitatakse alaldiga milliampermeeter, mille skaala on gradueeritud elektrolüüdi lahuse kontsentratsiooni väärtustes.

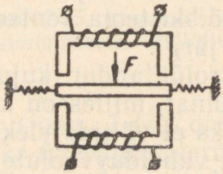
f) Induktiivandurid

Induktiivandur (joon. 7-47, *a*) kujutab endast elektromagnetit, mille ankur liigub mõõdetava mehhaanilise suuruse F mõjul. Viimaseks võib olla jõud, rõhk, joonnihe vms. Ankru asendi muutumisel muutub õhupilu δ ja seega ka elektromagneti pooli induktiivsus ning näivtakistus, s. t.

$$z = f(F);$$



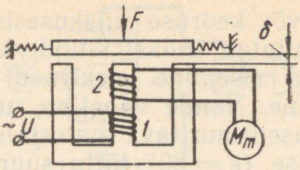
Joon. 7-47, *a*. Induktiivanduri skeem.



Joon. 7-47, *b*. Diferentsiaal-induktiivanduri skeem.

Diferentsiaalanduris (joon. 7-47, *b*) põhjustab ankru nihkumine ühe pooli induktiivsuse kasvu ja teise pooli induktiivsuse vähenemise; nii suureneb anduri tundlikkus. Kahe pooli lülitamine mõõtesilla naaberõlgadesse tagab ka temperatuurikompensatsiooni.

Transformatoorse induktiivanduri (joon. 7-48) primaarmähist toidetakse konstantse efektiivväärtusega vahelduvvooluga. Mõõdetava mehhaanilise suuruse F mõjul muutub õhupilu δ ja magnetahela magnetiline takistus. Järelikult muutub ka sekundaarmähisega, mille



Joon. 7-48. Transformatoorse induktiivanduri skeem.

klemmidega on ühendatud voltmeeter, aheldatud magnetvoog. Seega sekundaarmähise emj. ja voltmeetri näit sõltuvad mõõdetavast suurusest, s. o.

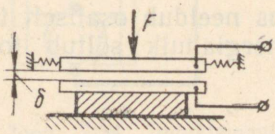
$$E_2 \approx U_2 = f(F).$$

g) Mahtuvusandurid

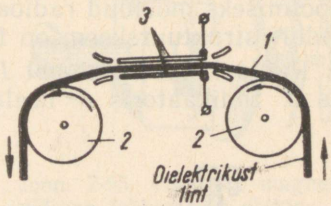
Mahtuvusandur kujutab endast kondensaatorit, mille mahtuvus muutub sõltuvalt mõõdetavast mitteelektrilisest suurusest.

Kuna kondensaatori mahtuvus sõltub elektroodide pindalast, kujust ja nendevahelisest kaugusest ning samuti dielektriku mõõtmetest ja dielektrilisest läbitavusest, siis võib neid andureid kasutada nende mitteelektriliste suuruste mõõtmiseks, mis mõjutavad ülalloetletud anduri parameetreid.

Mahtuvuslikes manomeetrites ja dünamomeetrites muutub mõõdetava rõhu P või jõu F mõjul kondensaatori plaatide vaheline õhupilu δ (joon. 7-49).



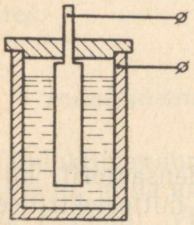
Joon. 7-49. Mahtuvusmanomeetri või -dünamomeetri töötamispõhimõte.



Joon. 7-50. Mahtuvusanduriga paksusemõõturi ehitus.

Kummilindi paksuse mõõtmiseks kasutatava anduri tööpõhimõte on järgmine: kahe liikumatu elektroodi *3* (joon. 7-50) vahelt liigub läbi kummilint *1*, mille paksusest sõltuvalt muutub õhupilu laius ja anduri mahtuvus.

Teravilja, pulbri, kiudaine või kedruse niiskusesisalduse mõõturi mahtuvusandur kujutab endast silinderkondensaatorit (joon. 7-51). Tema sisemine elektrood on varda-, väline aga kannukujuline. Nende vaheline ruum kannus täidetakse teatava kõrguseni uuritava materjaliga. Vee suure dielektrilise läbitavuse ($\varepsilon = 80$) tõttu suurendab uuritava materjali niiskusesisaldus järsult anduri mahtuvust.



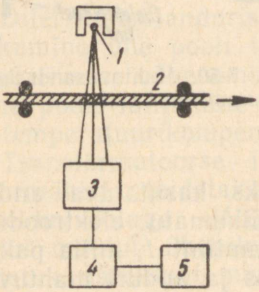
Joon. 7-51. Mahtuvusanduriga niiskusemõõturi ehitus.

Mahtuvusandurite mahtuvus on enamasti väike ja seepärast mõõdetakse seda kas kõrgema sagedusega voolu või kõrgsagedusvoolu abil, kasutades seejuures elektronvõimendeid.

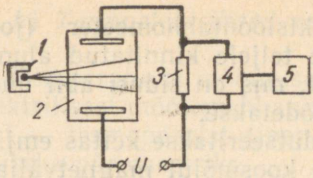
h) Ionisatsioonandurid

Ühe liikuva teraslindi või valtsterase paksuse pidevaks mõõtmiseks mõeldud radioaktiivse isotoobiga ionisatsioonanduri struktuurskeem on toodud joonisel 7-52.

Radioaktiivse isotoobi *1* kiirgus neeldub osaliselt tootes *2*. Indikaatoris *3* neelduv energiahulk sõltub toote



Joon. 7-52. Ionisatsioonanduriga paksusemõõturi põhimõtteskeem.



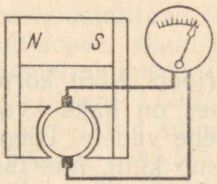
Joon. 7-53. Gaasi rõhku mõõtva seadme põhimõtteskeem.

paksusest ja materjalist. Indikaator *3* on läbi võimendi *4* ühendatud mõõtemehhanismiga *5*, mis annab meile vahetult mõõdetava suuruse väärtuse.

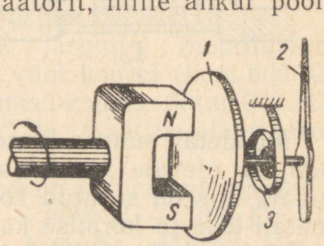
Gaasi rõhumõõturis ioniseerib radioaktiivse isotoobi *1* (joon. 7-53) kiirgus anumas *2* oleva gaasi. Ionisatsiooni intensiivsus ja pinge *U* mõjul vooluringis tekkiv ionisatsioonivool sõltuvad gaasi rõhust. Mõõtemehhanism *5* on ühendatud läbi võimendi *4* takistiga *3*, millel tekib ionisatsioonivooluga võrdeline pingelang.

i) Induktsioonandurid

Kiiruse mõõtmiseks mõeldud induktsioontahhomeetris muundatakse mõõdetav suurus temaga võrdeliseks elektromotoorjõuks. Tahhomeeter (joon. 7-54) kujutab endast väikest magnetoelektrilist generaatorit, mille ankur pöör-



Joon. 7-54. Induktsioontahhomeetri põhimõtteskeem.



Joon. 7-55. Pöörleva magnetväljaga tahhomeetri ehitus.

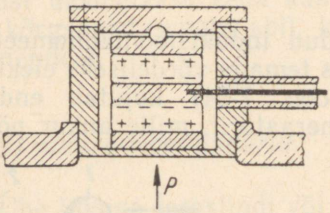
leb püsimagneti pooluste vahel ja mille klemmipinge on järelikult võrdeline ankru pöörlemiskiirusega. Ankru võll on siduri abil ühendatud masina võlliga, mille kiirust mõõdetakse, ja seepärast on ankrumähise klemmidega ühendatud voltmeetri näit võrdeline mõõdetava pöörlemiskiirusega.

Pöörleva magnetiga induktsioontahhomeeter (joon. 7-55) koosneb osutiga *2* ühele teljele kinnitatud alumiiniumkettast *1* ja püsimagnetist, mis on siduri abil ühendatud võlliga, mille kiirust mõõdetakse.

Püsimagneti pöörlemisel indutseeritakse kettas emj. ja tekivad pöörisvoolud. Viimaste koosmõjul magnetväljaga tekib pöördemoment, mis pöörab ketast sellise nurga võrra, mille juures vedru *3* moment tasakaalustab pöördemomendi. Igale pöörlemiskiirusele vastab kindel mõõtemehhanismi liikuva osa pöördenurk.

j) Piesoelektrilised andurid

Neis andureis kasutatav piesoelektriline efekt ilmneb mõnedel kristallilistel dielektrikutel (kvarts) ja seisneb selles, et mehhaaniliste pingete või deformatsioonide mõjul tekivad vastavate kristallide pinnal elektrilaengud.



Joon. 7-56. Paksuse mõõtmiseks kasutatav piesoelektriline kvartsandur.

Mõõdetav suurus *P* mõjub anduri (joon. 7-56) korpuse põhjaks olevale membraanile. Korpuses on kaks kvartsplaati, mis on surutud kolme metall-lehe vahele. Ülemise metall-lehe ja korpuse kaane vahel asub kuul, mis tagab mõõdetava rõhu ühtlase jaotumise. Negatiivseks elektroodiks oleva keskmise metall-lehe külge on ühendatud korpusest isoleerainest puksiga eraldatud juhe.

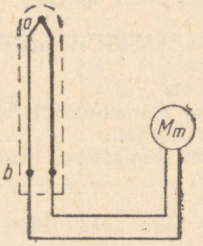
Negatiivse elektroodi ja korpuse potentsiaalide vahe on võrdeline rõhuga *P*. Viimane määrataksegi potentsiaalide vahe järgi.

Rõhu kadumisel kaovad ka laengud ja sellepärast on negatiivse elektroodi hea isoleerimine hädavajalik.

Negatiivne elektrood ühendatakse lampvõimendi (§ 13-11) esimese lambi võrega ja mõõtemehhanism lülitatakse võimendi väljundile.

k) Termoelektrilised andurid

Temperatuuri mõõtmise seadist, mis koosneb magnetoelektrilisest mõõtemehhanismist ja termoelektrilisest andurist — termopaarist (joon. 7-57), nimetatakse termoelektriliseks püromeetriks.



Joon. 7-57. Termoelektrilise püromeetri skeem.

Termopaari töötava otsa kuumutamine tekitab mõõtemehhanismi vooluringis emj. ja voolu. Mehhanismi liikuva osa pöördenurga järgi määrataksegi temperatuur. Termopaari juhtmed peavad olema küllalt pikad, et nende vabad otsad oleksid sellise temperatuuriga keskkonnas, mille juures püromeeter gradueeriti. Madalate temperatuuride mõõtmisel võib vabade otste temperatuuri mõju osutuda väga suureks. Selle vältimiseks paigutatakse vabad otsad konstantse temperatuuriga termostaati.

Termopaarides kasutatakse järgmisi metallipaare: vask-konstantaan (kuni 300 °C), vask-kopeel (kuni 600 °C), raud-kopeel (kuni 800 °C), kromeel-kopeel (kuni 800 °C), kromeel-alumeel (kuni 1 300 °C), plaatina-plaatinaroodium (kuni 1 600 °C).

Nimetatud sulamite koostised on järgmised: kopeel — 56,5% Cu + 43,5% Ni; kromeel — 90% Ni + 10% Cr; alumeel — 1% Si + 2% Al + 17% Fe + 2 % Mn + + 78% Ni.

Selleks et kaitsta termopaari mehhaaniliste vigastuste ja kuumade gaaside toime eest, paigutatakse ta kas messingist, terasest, portselanist või mõnest muust materjalist valmistatud kaitsekesta.

7-9. Laboratoorne töö. Isolatsioonitakistuse mõõtmine

Enne töö tegemist tutvuda § 7-7, *c* ja *d* sisuga.

Tööplaan

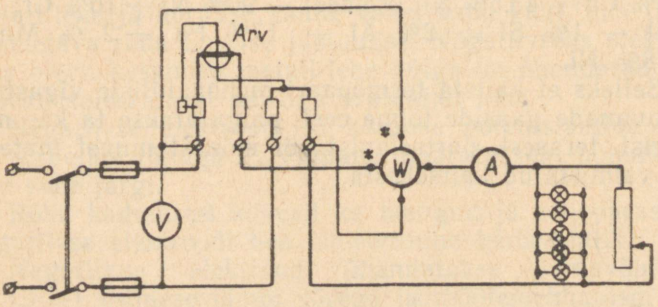
1. Märkida üles mõõteriistade põhilised tehnilised andmed.
2. Mõõta megeri abil:
a) valgustusseadme kummagi juhtme ja maa vahelist isolatsioonitakistust (joon. 7-36);
b) juhtmetevahelist isolatsioonitakistust (joon. 7-37).
Enne mõõtmist tuleb sulgeda kõik lülitid (ka vinnaklülitid), välja keerata hõõglambid ja eraldada võrgust teised tarbijad.
3. Selgitada, kas katsetatava elektriseadme isolatsioon vastab ekspluatatsioonieeskirjadele.
4. Mõõta megeri abil:
a) kolmefaasilise asünkroonmootori staatori iga faasimähise ja kere (maa) vahelist isolatsioonitakistust;
b) sama mootori iga faasimähiste paari vahelist isolatsioonitakistust.
5. Selgitada, kas mootori isolatsioonitakistus vastab ekspluatatsioonieeskirjadele.

7-10. Laboratoorne töö. Induktsioonarvesti kontrollimine

Enne töö tegemist tutvuda § 7-6 sisuga.

Tööplaan

1. Märkida üles mõõteriistade põhilised tehnilised andmed.
2. Koostada lülitus arvesti taatlemiseks (joon. 7-58) ja näidata seda juhendajale.
3. Veenduda, et arvesti ketas ei pöörle, kui voolumähises puu-



Joon. 7-58. Lülitusskeem arvesti taatlemiseks.

dub vool ja pingeahelale on rakendatud nimipinge, s. t. tuleb veenduda selles, et arvestil puudub tühijooks.

4. a) Nimipingel reguleerida koormus selliseks, et ta oleks 10 % nimikoormusest, ja lugeda ära arvesti ketta täispöörete arv 100...150 sekundi kestel. Märkida vattmeetri, ampermeetri, voltmeetri ja ajamõõtja näidud tabelisse 7-3.

Tabel 7-3

Katse nr.	P	U	I	$\cos\varphi$	t	N	k	k_n	γ	Märkusi
	W	V	A	—	s	p	Ws/p	Ws/p	%	

b) Leida valemi

$$k = \frac{Pt}{N}$$

abil arvesti tegelik konstant, s. o. arvesti ketta ühe pöörde vältel tarbitav tegelik aktiivenergia.

c) Leida arvesti viga antud koormusel valemi

$$\gamma = \frac{k_n - k}{k} 100\%$$

abil, kus k_n on arvesti sildil toodud nimikonstant.

5. Korrata punktis 4 nimetatud katseid ja arvutusi koormustel, mis moodustavad 25, 50, 75 ja 100% arvesti nimikoormusest.

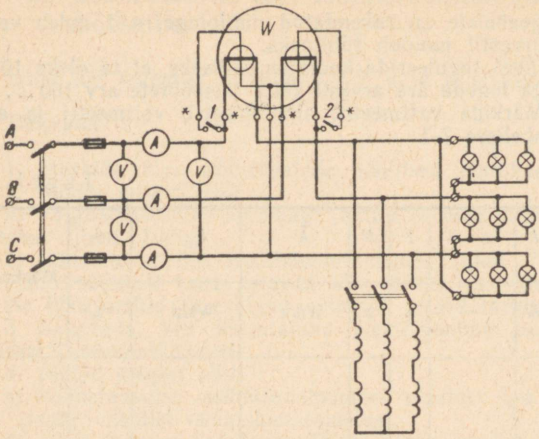
6. Selgitada, kas arvesti vastab standardi nõuetele vea suhtes, kui on teada, et standardi kohaselt peab täpsusklassi 2,5 kuuluva arvesti viga nimetatud koormustel olema vähem kui $\pm 2{,}5\%$.

7-11. Laboratoorne töö. Võimsuse mõõtmine kolmefaasilises süsteemis

Enne töö tegemist tutvuda § 7-5 sisuga.

Tööplaan

1. Märkida üles mõõteriistade põhilised andmed.
2. Koostada lülitus (joon. 7-59) ja näidata seda juhendajale.
3. Pingestada lülitus, reguleerida välja ühtlane sümmeetriline



Joon. 7-59. Kolmefaasilise süsteemi võimsuse mõõtmine.

aktiivkoormus ja märkida tabelisse 7-4 voolude ja pingete väärtused, kaheelemendilise vattmeetriga mõõdetud võimsus P (vinnaklülitid *1* ja *2* on suletud), vattmeetri esimese elemendiga mõõdetud võimsus P' (vinnaklüliti *2* on avatud) ja teise vattmeetri elemendiga mõõdetud võimsus P'' (vinnaklüliti *1* on avatud).

Veenduda, et

$$P = P' + P'' = \sqrt{3}\,IU.$$

Leida suhted

P/P' ja P/P''.

Tabel 7-4

Katse nr.	I_A	I_B	I_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	P	P'	P''	$P'+P''$	$\sqrt{3}\,UI$	P/P'	P/P''	$\cos\varphi$	φ	Märkusi
	A	A	A	V	V	V	W	W	W	W	W	—	—	—	°	

4. Korrata 3. punktis nimetatud mõõtmisi ja arvutusi teistsugusel ühtlasel aktiivkoormusel.

5. Reguleerida välja ühtlane induktiivse iseloomuga segakoormus ja märkida tabelisse 7-4 punktis *3* nimetatud suuruste väärtused.

Veenduda, et

$$P = P' + P''.$$

Leida

$$\cos\varphi = \frac{P}{\sqrt{3}UI}; \quad \varphi; \quad P/P' \text{ ja } P/P''.$$

6. Muutes reaktiivkoormust, korrata 5. punktis nimetatud mõõtmisi ja arvutusi kolm korda.

Võrreldes jagatisi P/P' ja P/P'' mitmesuguste koormuste korral, võime kergesti veenduda, et nad muutuvad ja pole võrdsed. See lubab meil väita, et ühe vattmeetri elemendi näidu alusel ei saa otsustada kolmefaasilise süsteemi võimsuse üle.

7. Teostada kaks võimsuse mõõtmist erineva mitteühtlase segakoormuse korral. Mõõteriistade näidud märkida tabelisse 7-4.

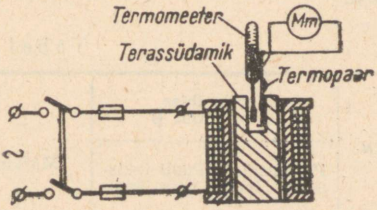
7-12. Laboratoorne töö. Termoelektrilise püromeetri gradueerimine ja tema kasutamine temperatuuri mõõtmiseks

Enne töö tegemist tutvuda § 7-8, *k* ja § 7-7, *b* sisuga.

Tööplaan

1. Märkida üles mõõteriistade põhilised tehnilised andmed.

2. Koostada lülitus termoelektrilise püromeetri gradueerimiseks (joon. 7-60) ja näidata seda juhendajale.



Joon. 7-60. Termoelektrilise püromeetri gradueerimise lülitusskeem.

Märkus. Termopaar ja termomeeter, mille järgi püromeetrit gradueeritakse, paigutatakse pooli terassüdamikku treitud õõnsusse. Pooli mähist läbib vahelduvvool. Südamikus tekkivad pöörisvoolud põhjustavad pooli soojenemist.

3. Sulgeda lüliti ja märkida termomeetri ning püromeetri mõõtemehhanismi näidud mitmesugustel temperatuuridel tabelisse 7-5.

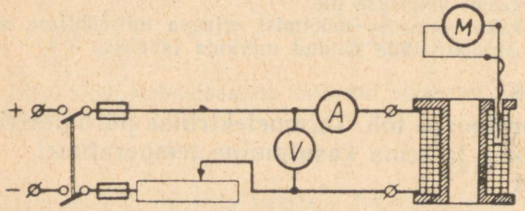
4. Saadud andmete alusel konstrueerida gradueerimisköver $n = f(\Theta)$.

Tabel 7-5

Termomeetriga mõõdetud temperatuur Θ °C										
Mõõtemehhanismi näit n jaotustes										

5. Pooli temperatuuri mõõtmiseks koostada joonisel 7-61 toodud lülitus ja näidata seda juhendajale.

Märkus. Termopaar paigutada keerdudevahelisse pilusse.



Joon. 7-61. Lülitusskeem pooli temperatuuri mõõtmiseks.

6. Sulgeda lüliti ja märkida mõõteriistade näidud iga 5 minuti järel 60 minuti kestel tabelisse 7-6. Esimesed näidud märkida tabelisse kohe pärast lüliti sulgemist.

Tabel 7-6

Katse nr.	U	I	$r=\frac{U}{I}$	t	n	Poolimähise temperatuur Θ		Märkusi
						Pürometri näidu järgi	Pooli takistuse järgi	
	V	A	Ω	min.	—	°C	°C	

Saadud andmete alusel leida:

1) pooli temperatuur erinevatel hetkedel termoelektrilise pürometri näidu järgi;

2) pooli temperatuur samadel hetkedel tema takistuse muutumise järgi [valem (1-21)].

Takistus r_1 temperatuuril Θ ja takistus r_n temperatuuril Θ_n leitakse ampermeetri ja voltmeetri näitude järgi valemi $r = U/I$ abil.

7. Saadud andmete alusel joonestada mähise soojenemiskõver, s. o. pooli temperatuuri sõltuvus ajast:

$\Theta = f(t)$.

8. Leida, kas pooli mähist läbinud vool oli pooli nimivoolust suurem või väiksem, kui lubatav mähise temperatuur on 90° C.

8. ALALISVOOLUMASINAD

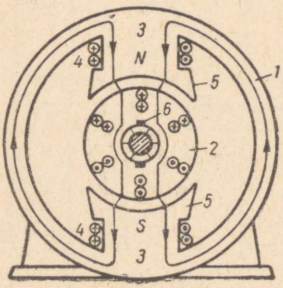
8-1. Alalisvoolumasinate otstarve

Seadmeid, mis on määratud mehhaanilise energia muundamiseks elektrienergiaks või vastupidi, nimetatakse elektrimasinateks. Mehhaanilist energiat elektrienergiaks muundavat masinat nimetatakse generaatoriks, kui aga masin muundab elektrienergiat mehhaaniliseks energiaks, nimetatakse teda mootoriks.

Alalisvoolumasinaid kasutatakse elektrolüüsiseadmetes, samuti aga seal, kus on vaja tekitada suurt pöördemomenti või reguleerida kiirust suurtes piirides, s. o. elekterveos (elektertranspordis), kaevanduse tõsteseadmetes, valtsmasinates. Automaatikaseadmeis kasutatakse neid pöörlemiskiiruse mõõturitena, täiturmootoritena ja signaalide muunduritena.

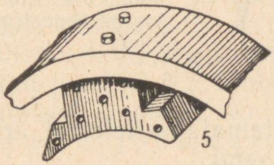
8-2. Alalisvoolumasina ehitus

Alalisvoolumasina töö põhineb paragrahvides 3-9 ja 3-10 esitatud põhimõtetel. Joonisel 8-1 on toodud ühe pooluspaariga alalisvoolumasina eskiis. Masin koosneb



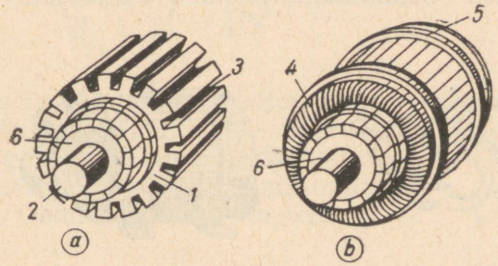
Joon. 8-1. Kahepooluseline alalisvoolumasin.

kahest põhilisest osast: liikumatust ikkest *1* ja pöörlevast ankrust *2*. Ikke külge on kinnitatud poolused *3*, milledele on paigutatud ergutusmähis *4*. Kui ergutusmähist läbib ergutusvool I_e, siis tekitab mähise magneetimisergutus magnetvoo Φ, mis, nagu näidatud joonisel 8-1, sulgub läbi pooluste, ankru ja ikke.



Joon. 8-2. Masina poolus.

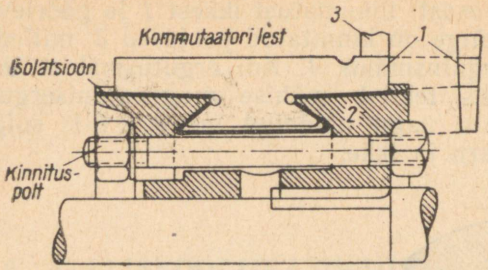
Masina ike on terasest, poolused koostatakse aga elektrotehnilisest terasplekist (joon. 8-2). Poolused lõpevad pooluskingadega *5*, mis tagavad ergutusmähiste hea kinnituse ja annavad võimaluse jaotada magnetvoo tihedust *B* pooluste ja ankru vahelises õhupilus soovitava seaduspärasuse järgi.



Joon. 8-3. Masina ankur.

a — mähiseta;
b — mähisega.

Masina ankur on kujutatud joonisel 8-3. See on elektrotehnilisest terasplekist stantsitud ketastest koostatud silinder *1*, mis on pressitud võllile *2* ja mille välispinnal on uurded *3*. Uuretesse paigutatakse ankru juhtmed, mis moodustavad ankrumähise *4*. Mähis kinnitatakse uuretesse spetsiaalsete kiilude ja bandaažide *5* abil ning ühendatakse elektriliselt kommutaatoriga *6*, mis on isoleerituna kinnitatud võllile. Kommutaatori ja liikumatute harjade *6* (joon. 8-1) abil ühendatakse pöörlev ankrumähis elektriliselt välisahelaga. Peale selle saame kommutaatori abil harjadelt muutumatu



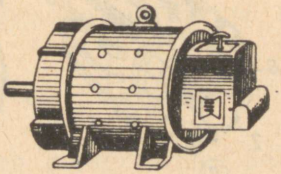
Joon. 8-4. Kommutaatori konstruktsioon.

suuruse ja suunaga emj. *E*, vaatamata sellele, et ankru mähistes indutseeritakse vahelduv-emj.

Silindriline kommutaator (joon. 8-4) koosneb kiilukujulistest vaskplaatidest *1* (lestadest), mis on paigutatud kommutaatori alusele *2* ja kinnitatud sinna poltide abil. Plaadid on üksteisest ja ka alusest isoleeritud mikaniidiga. Viimasel ajal pressitakse väikeste elektrimasinate kommutaatorilestad koos mikaniidist isolatsiooniga termiliselt töödeldavasse plastmassi. Ankrumähiste teatud punktid joodetakse kommutaatorilestade väljaulatuvate otste *3* külge.



Joon. 8-5. Hari ja harjahoidja.



Joon. 8-6. Väikesevõimsuselise alalisvoolumasina väliskuju.

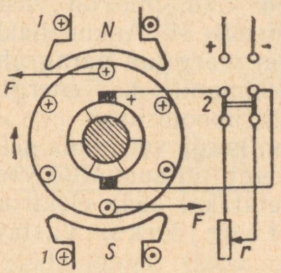
Masina harjad (joon. 8-5) kujutavad endast söest või grafiidist prismasid *1*, mis on asetatud harjahoidjate pesadesse *2*. Hari surutakse vastu kommutaatorit vedru *3* abil. Harjahoidja on paigutatud ava *4* läbivale isoleeritud poldile ja on selle abil kinnitatud masina kere külge. Harjahoidjad on juhtmete abil ühendatud masina klemmidega.

K l e m m i d on tähistatud järgmiselt $Я_1Я_2$ — ankru-

mähis; $Ш_1Ш_2$ — rööpergutusmähis; C_1C_2 — jadaergutusmähis; $Д_1Д_2$ — lisapooluste mähis. Alalisvoolumasina väliskuju on näidatud joonisel 8-6.

8-3. Alalisvoolumasina töötamispõhimõte

Joonisel 8-7 on toodud alalisvoolumasina põhimõtteskeem. Sõltumatu toiteallika poolt tekitatud ergutusmähist *1* läbiv ergutusvool I_e olgu suunatud nii, nagu näidatud joonisel 8-7, ümberlüliti *2* aga ühendagu vooluringi alumised klemmid. Kui nüüd panna elektrimasina ankur p r i m a a r j õ u m a s i n a abil (selleks võib olla auru-



Joon. 8-7. Alalisvoolumasina töötamispõhimõte.

masin, sisepõlemismootor jne.) pöörlema, siis tekib ankrumähises emj. *E*, mille tulemusena läbib tarbijat takistusega *r* ja ankrumähist takistusega r_a alalisvool *I*, mis on elektromotoorjõuga samasuunaline.

Ohmi seaduse kohaselt

$$I = I_a = \frac{E}{r + r_a}, \tag{8-1}$$

millest järeldub, et

$$E = Ir + Ir_a = U + Ir_a, \tag{8-2}$$

s. t. masina emj. on võrdne tema klemmipinge ja ankrumähisel esineva pingelangu summaga.

Magnetväljas asuvatele vooluga juhtmetele mõjuvad elektromagnetilised jõud *F*, mille suunad määratakse vasaku käe juhise abil (nooled joonisel 8-7). Elektromotoorjõu ja ankru voolu I_a suund on määratud parema käe

juhise abil. Jõud F takistavad ankru pöörlemist, s. o. tekitavad masina võllile rakendatud pidurdusmomendi M_p. Pidurdusmomendi M_p ületamiseks peab primaarjõumasin tekitama temale vastassuunalise pöördemomendi M. Järelikult, nagu on selgitatud paragrahvis 3-10, muundab elektrimasin mehhaanilist energiat elektriliseks ja töötab generaatorina. Selles tööolukorras on emj. E pingest U suurem pingelangu võrra ankrumähisel Ir_a.

Oletame nüüd, et ümberlüliti *2* (joon. 8-7) on lülitatud ülemistele kontaktklemmidele ja masina ankur ei ole primaarjõumasinaga sidurdatud. Välisest energiaallikast kulgeb ankrumähisesse vool $I = I_a$, mis on suunatud vastupidiselt voolule generaatoris. Selle voolu ja magnetvälja mõjul tekivad elektromagnetilised jõud, mis on vastassuunalised ja loovad pöördemomendi M. Ankur hakkab pöörlema endises suunas. Nagu on märgitud paragrahvis 3-10, toimub elektrienergia mehhaaniliseks energiaks muundamine ja masin töötab elektrimootorina.

Parema käe juhist kasutades on kerge veenduda selles, et ankru juhtmetes indutseeritav emj. on suunatud vastupidi voolule I_a. Nagu teada, nimetatakse seda elektromotoorjõudu vastuelektromotoorjõuks. Vastavalt Kirchhoffi teisele seadusele

$$U - E = I_a r_a \quad \text{ehk} \quad E = U - I_a r_a \tag{8-3}$$

ja vool

$$I_a = \frac{U - E}{r_a}. \tag{8-4}$$

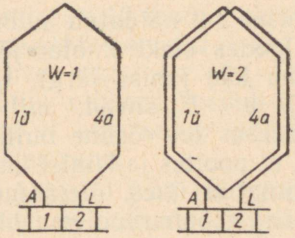
Elektrimootorina töötavas masinas on emj. E väiksem klemmipingest U pingelangu võrra ankrumähistel Ir_a.

Elektrimootori pöörlemissuuna muutmiseks piisab ankrumähise või ergutusmähiste voolu suuna muutmisest, milles on kerge veenduda, kui vaadata joonist 8-7. Kui muuta voolu suunda mõlemas mähises korraga, siis pöörlemissuund ei muutu.

Seega on üks ja sama masin kasutatav nii generaatorina kui ka elektrimootorina. Seda tõestas esimesena H. F. E. Lenz.

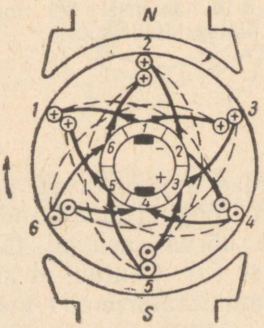
8-4. Ankrumähise ehitus

Alalisvoolumasina ankrumähis koosneb ühesugustest osadest, mida nimetatakse sektsiooniideks. Joonisel 8-8 on kujutatud üks sektsioon, mis koosneb ühest keerust ($w = 1$), ja teine, milles on kaks keerdu ($w = 2$). Keerdude arv sektsioonis võib olla ka suurem. Iga sektsiooni algus ja lõpp joodetakse kahe kõrvuti või teineteisest mingil kaugusel oleva kommutaatorilesta väljaulatuvate otste külge. Kuna iga sektsiooni algus ja eelnenud sektsiooni lõpp joodetakse ühe ja sama kommutaatorilesta külge, siis saadakse suletud mähis.



Joon. 8-8. Ankrumähise sektsioon.

Sektsioonide (joon. 8-8) küljed paiknevad uuretes. Pöörlemise korral indutseeritakse neis emj. ja seepärast nimetatakse neid sektsiooni aktiivkülgedeks. Ülejäänud osad sektsiooni mähisest asuvad väljaspool uurdeid ankru otstel. Neid nimetatakse laupühendusteks ja elektromotoorjõudu neis ei indutseerita. Mähise aktiivküljed asuvad uuretes kahes kihis: paaritud

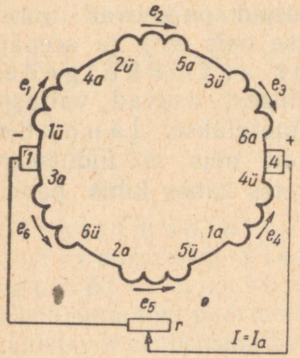


Joon. 8-9. Ankrumähise skeem.

ülal ja paaris all, uurde põhjas. Sektsioonidest koostatud ankrumähise lihtsustatud skeem on toodud joonisel 8-9. Keerdude arvuks sektsioonis on võetud üks.

Uuretesse sängitatud aktiivjuhtmed, mis kulgevad risti joonise tasapinnaga, on joonisel kujutatud ringikestena, ankru vaatajapoolses otsas olevad laupühendused aga rasvaste joontena ning teises otsas olevad laupühendused punktiirjoontena. Seega läheb juhe kommutaatorilestalt nr. *1* uurde *1* ülemisse kihti, sealt aga ankru varjatud otsa tagant (punktiirjoon) uurde *4* alumisse kihti ning sealt kommutaatorilestale nr. *2*. Viimaselt läheb juhe uurde *2* ülemisse kihti jne. Teinud täisringi ümber ankru, sulgub mähis kommutaatorilestal nr. *1*.

Kui ankrumähis pöörleb joonisel 8-9 näidatud suunas, tekivad tema juhtmete aktiivkülgedes elektromotoorjõud, mille suund on määratav parema käe juhise järgi. Igas sektsioonis indutseeritakse emj. $e = E_m \sin \omega t$, millede summa kogu suletud mähise ulatuses on võrdne nulliga. Kogu mähise vaatlemisel näeme, et pooltes jadamisi ühendatud sektsioonides on emj. suunatud ühes, ülejäänutes aga teises suunas. See viitab kahe rööpharu olemasolule mähises.



Joon. 8-10. Joonisel 8-9 toodud skeemi lihtsustatud kujutis.

Joonisel 8-10 on näidatud, kuidas moodustuvad kommutaatorilestade *1* ja *4* vahelised rööpharud. Numbrid tähistavad joonisel uurdeid, nende kõrval asuvad tähed aga kihte — ülemist (*ü*) ja alumist (*a*). Osutub, et kommutaatorilest *4* on kõrgeima ja kommutaatorilest *1* mada-

laima potentsiaaliga. Nende kohale paigutatakse harjad. Joonisel 8-9 on harjad kujutatud tinglikult kommutaatori sees asetsevatena, kuid tegelikult paiknevad nad selle välispinnal.

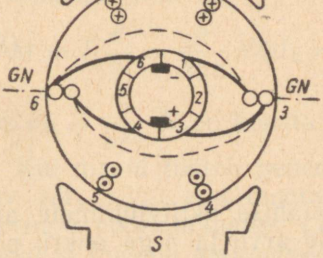
Joonisel 8-9 kujutatud ankru asendile vastaval hetkel toimib harjade vahel potentsiaalide vahe, mis on võrdne masina pingega

$$U = e_1 + e_2 + e_3 = e_6 + e_5 + e_4.$$

On näha, et ankru pöördumisel 60° võrra jääb nii pinge U suurus kui ka harjade polaarsus endiseks, sest kuues uure asub esimese kohale, esimene teise kohale jne. Joonisel 8-10 toodud skeemi kohaselt lülitub ülemise rööpharu sektsioon ($3ü - 6a$) alumisse harusse, temaga samaväärne sektsioon ($3a - 6ü$) läheb aga ülemisse harusse. Selline olukord kordub iga 60° pöördenurga järel.

Kui aga ankur pöördub vähem kui 60°, on olukord teistsugune.

Joonisel 8-11 on näidatud ankur pööratuna 30° võrra. Lihtsuse mõttes on laupühendused näidatud vaid sektsioonidele ($3ü - 6a$) ja ($3a - 6ü$). Sellises asendis on nimetatud sektsioonid harjadega lühistatud ja seega ankru-



Joon. 8-11. Mähise paigutus ankru pööramisel 30° võrra (võrdle joon. 8-9).

mähise rööpharudest välja jäetud. Masina pinge on sel juhul määratud elektromotoorjõudude summana:

$$U = e_1 + e_2 = e_4 + e_5,$$

kus e_1 ja e_2 väärtused pole enam samad, mis esimeses ankru asendis. Pinge on ilmselt väiksem kui sellise ankru

asendi korral, mis on toodud joonisel 8-10. Masina töötamisel muutub tema pinge pidevalt teatud piirides

$$U_{max} \geqslant U \geqslant U_{min}.$$

Mida rohkem on rööpharudes sektsioone, seda väiksem on pinge U pulsatsioon. Kaasaegsetes masinates on pulsatsioon niivõrd väike, et pinge loetakse alalispingeks.

Masina geomeetriliseks neutraaliks (*GN*) nimetatakse masina võlli telge läbivat tasapinda, mis lõikab ankru välispinda võrdsel kaugusel mõlemast poolusest. Geomeetrilist neutraali läbivas mähise sektsioonis indutseeritav emj. on kas võrdne nulliga või väga väike. Sel hetkel hari lühistabki sektsiooni. Protsesse, mis toimuvad sektsiooni lülitamisel ühest rööpharust teise, käsitletakse lähemalt paragrahvis 8-9.

8-5. Ankrumähise elektromotoorjõud

Viiendas peatükis tõime valemi (5-29) mähisega aheldatud magnetvoo muutumisel mähises indutseeritava emj. efektiivväärtuse jaoks; selle emj. maksimaalväärtus

$$E_m = 2\pi\Phi_m w f.$$

Alalisvoolumasinais on emj. kõigi ühte rööpharusse kuuluvate keerdude elektromotoorjõudude summa. Ta võib avaldada kujul

$$E = E_k = \frac{2}{\pi} E_m \tag{8-5}$$

või kujul

$$E = \frac{2 \cdot 2\pi}{\pi} \Phi w f = 4\Phi w f.$$

Tähistame N-ga kõigi ankrumähise aktiivjuhtmete arvu, $2a$-ga ankrumähise rööpharude arvu ja n-ga ankru pöörlemiskiiruse p/min, siis

$$w = \frac{N}{2 \cdot 2a} \quad \text{ja} \quad f = \frac{pn}{60}.$$

Asendades need suurused emj. valemis, saame:

$$E = 4\Phi \frac{N}{2 \cdot 2a} \cdot \frac{pn}{60} = \Phi N \frac{pn}{a60}. \tag{8-6}$$

Siin $N\frac{p}{a60}$ on konstant; tähistades ta c_E-ga, saame:

$$E = c_E \Phi n, \tag{8-7}$$

s. t. masina emj. on võrdeline tema magnetvooga ja ankru pöörlemiskiirusega.

8-6. Pöördemoment masina võllil

Sõltumatult sellest, kas masin töötab generaatorina või mootorina, mõjub igale ankrujuhtmele elektromagnetiline jõud

$$F_j = B_k l I = \frac{\Phi 2p}{\pi d l} l I,$$

kus B_k on magnetvoo tiheduse keskväärtus, d ja l vastavalt ankru läbimõõt ja pikkus, $2p$ masina pooluste arv, Φ ühe pooluse magnetvoog ja $I = \frac{I_a}{2a}$ ühe rööpharu, s. o. ühe juhtme vool.

N ankrujuhtmele mõjuvate jõudude resultant, mis on suunatud mööda silindrilise ankru puutujat,

$$F = F_j N = \frac{\Phi 2p}{\pi d} \frac{I_a}{2a} N = \frac{p}{\pi d a} N \Phi I_a.$$

Masina moment

$$M = F\frac{d}{2} = \frac{p}{2\pi a} N \Phi I_a = c_M \Phi I_a, \tag{8-8}$$

kus $c_M = \frac{p}{2\pi a} N$ on konstantne suurus.

Kui masin töötab generaatorina, on ta moment pidurdav (M_p), kui aga mootorina, siis on ta moment mootorne *e.* pöörlemapanev (M). Moment on võrdeline ankru voolu ja masina magnetvoo korrutisega.

8-7. Alalisvoolumasina mehhaaniline võimsus

Elektrimasin muundab kas mehhaanilist energiat elektriliseks või elektrilist mehhaaniliseks. Seejuures mehhaaniline võimsus

$$P_m = Fv.$$

Kuna $F = \frac{2M}{d}$ ja $v = \omega \frac{d}{2}$, siis

$$P_m = \frac{2M}{d} \omega \frac{d}{2} = M\omega. \qquad (8\text{-}9)$$

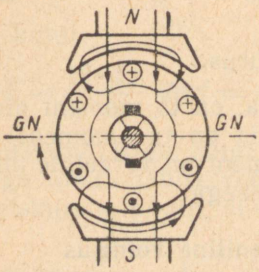
Asendades siin momendi tema avaldisega (8-8), saame:

$$P_m = \frac{p}{2\pi a} N\Phi I_a \frac{2\pi n}{60} = \Phi N \frac{p}{a} \frac{n}{60} I_a = EI_a. \qquad (8\text{-}10)$$

Seega on masina ankru poolt arendatav mehhaaniline võimsus võrdne tema elektrilise võimsusega, s. o. ankru emj. ja voolu korrutisega. Kui masin töötab generaatorina, siis on võimsus EI_a suurem kui tarbijale antav võimsus UI_a, sest $E > U$. Kui masin töötab mootorina, s. o. $E < U$, siis võimsus EI_a on väiksem kui võrgust saadav võimsus UI_a. See võimsuste vahe on arvuliselt võrdne võimsuskaoga I^2r_a ankrumähises.

8-8. Ankrureaktsioon

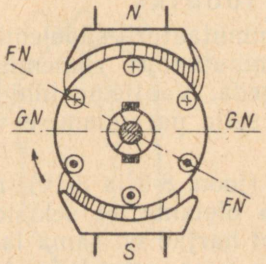
Kui masin töötab generaatorina tühijooksul, s. o. $I_a = 0$, esineb vaid magneetimisergutusest F_e tingitud ergutusmähiste magnetvoog Φ_e, mis kulgeb läbi ankru põhjapooluselt lõunapoolusele (joon. 8-12). Sel juhul jääb magnetvoo tihedus õhupilus B_δ pooluskinga ulatuses praktiliselt konstantseks.



Joon. 8-12. Ristsuunaline ankrureaktsioon.

Kui generaator on koormatud, s. t. tema ankrumähist läbib vool, muutub ankur elektromagnetiks ja tema magneetimisergutus F_a tekitab teise magnetvoo — ankru ristsuunalise magnetvoo Φ_a. See sulgub läbi

masina õhupilu, kulgedes pooluskingades risti ergutusvooga ja vähendades magnetvoo tihedust õhupilus B_δ pooluskinga ühe (põhjapoolusel vasaku, lõunapoolusel parema) serva all ning suurendades vootihedust B_δ pooluskinga teise (põhjapoolusel parema ja lõunapoolusel vasaku) serva all (joon. 8-13). Ankru pöörlemissuunda silmas pidades võime öelda, et pooluskinga pealejooksev serv demagneetub, mahajooksev serv aga magneetub veelgi tugevamini.



Joon. 8-13. Magnetvoo tiheduse jaotuse muutumine ankrureaktsiooni mõjul.

Masina summaarne magnetvoog Φ pöördub ankru pöörlemise suunas, samuti pöördub ka masina neutraaltasapind, mida sel juhul nimetatakse füüsikaliseks neutraaliks *FN*. Selle tulemusena koormatud masina magnetvoog Φ väheneb pisut, sest küllastuse tekkimise tõttu osutub pooluskinga pealejooksva serva demagneetumine suuremaks kui mahajooksva serva täiendav magneetumine. Ankru magneetimisergutuse mõju masina magnetvoole masina koormusel nimetatakse ankrureaktsiooniks.

Tänapäeva normaal-alalisvoolumasinates pole magnetvoo vähenemine ankrureaktsiooni mõjul märkimisväärne.

Nagu hiljem ilmneb, seisneb selle nähtusega kaasnev peamine oht selles, et magnetvoo tihedus võib õhupilus pooluskinga serva all väga järsult kasvada.

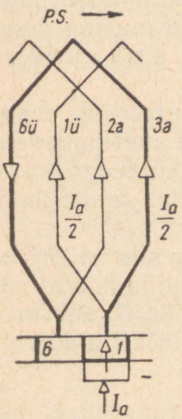
Kui masin töötab elektrimootorina, siis pöörleb ta ankur joonisel 8-12 toodud ankruvoolu suuna korral näidatule vastupidises suunas. Järelikult pöörab ankrureaktsioon magnetvoogu Φ ja füüsikalist neutraali ankru pöörlemisele vastassuunas.

8-9. Voolu kommuteerimine

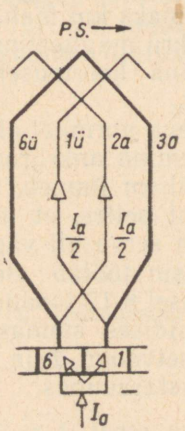
Eelmistes paragrahvides (joon. 8-9 ja 8-10) näitasime, et ankru pöörlemisel lülitatakse igat mähise sektsiooni harjade abil ühest rööpharust teise, mille käigus sektsioon hetkeks lühistatakse. Sektsioonide ümberlülitamist ja kõiki sellega kaasnevaid nähtusi kokku nimetatakse kommutatsiooniks ehk kommuteerimisprotsessiks. Aega T, mille vältel sektsioon on lühistatud, nimetatakse kommuteerimisperioodiks.

Kui kommuteerimisel esineb kommutaatoril sädelemine, siis võib see viia harjade ja kommutaatori riknemisele ning masin võib rivist välja langeda. Vaatleme lühidalt halva kommuteerimise põhjusi ja selle parandamise võimalusi.

Vaatleme sektsiooni ($3a - 6ü$) (joon. 8-9 ja 8-10), mis on toodud eraldi joonisel 8-14, ja oletame, et sektsioon pöörleb väga aeglaselt ($T \approx \infty$), et harjad on sama laiad kui kommutaatorilestad ning pole vaja arvestada teisi takistusi peale harja ja kommutaatori vahelise ülemineku takistuse. Vool I_a kulgeb harjalt läbi ülemineku takistuse $r_ü = R$ kommutaatorilesta 1 ja jaotub seal kaheks võrdseks osaks $I = 0{,}5\ I_a$, millest üks kulgeb ühe



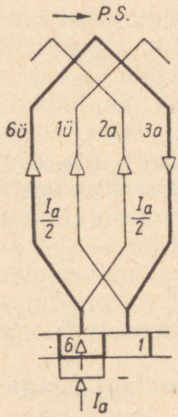
Joon. 8-14. Kommuteerimise algus ($t = 0$).



Joon. 8-15. Kommuteerimise keskfaas ($t = T/2$).

rööpharu juhtmetes $3a - 6ü - 2a$ jne., teine aga juhtmetes $1ü$ jne.

Niipea kui hari puutub kommutaatorilesta *6*, algab kommutatsioon ja vool sektsioonis väheneb. Tõepoolest, kui $t = T/10$, siis 0,9 harja kontaktpinnast on vastu kommutaatorilesta *1*, 0,1 sellest aga vastu kommutaatorilesta *6*. Kommutaatorilesta *1* läbiv vool on seejuures 0,9 I_a ja

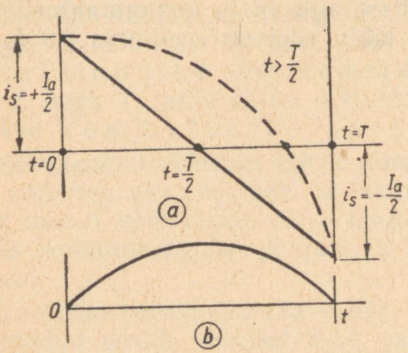


Joon. 8-16. Kommuteerimise lõpp ($t = T$).

kommutaatorilesta *6* läbiv vool 0,1 I_a. Muutumatu I_a korral peaksid rööpharude voolud olema võrdsed 0,5 I_a-ga, järelikult on lühistatud sektsiooni voolu i_a suund endine ja ta suurus on $0{,}9\,I_a - 0{,}5\,I_a = 0{,}4\,I_a$. Vool teises rööpharus koosneb lühistatud sektsiooni voolust $0{,}4\,I_a$ ja harjalt kommutaatorilesta *6* kulgevast voolust $0{,}1\,I_a$, seega ta suurus on $0{,}4\,I_a + 0{,}1\,I_a = 0{,}5\,I_a$. Seega väheneb vool lühistatud sektsioonis võrdeliselt ajaga t ja saab joonisel 8-15 näidatud asendi korral, s. o. hetkel $t = \frac{T}{2}$, võrdseks nulliga. Edasi vool sektsioonis kasvab jällegi, olles muutnud suunda, ja hetkel $t = T$ (vastav asend on kujutatud joonisel 8-16) on ta jälle võrdne 0,5 I_a-ga, sest sektsioon on siis avatud ja lülitatud paremasse rööpharusse. Sõltuvus $i_s = f(t)$ on näidatud joonisel 8-17, *a* ja kujutab endast sirgjoont. Selline peaks kommutatsioon olema igas hästi ehitatud masinas.

Kuid meenutagem, et lineaarse kommutatsiooni saami-

seks eeldasime, et $T \approx \infty$. Tegelikkuses kestab kommutatsiooniprotsess vaid mõne tuhandiku sekundi ja sektsiooni vool i_s muutub seega väga kiiresti. Seejuures, nagu teada, tekib sektsioonis endainduktsiooni emj. e_e. Kuna sõltuvus



Joon. 8-17. Kommuteerimine reaalsetes tingimustes.

$i_s = f(t)$ on graafiliselt kujutatav sirgjoonena, s. o. $\frac{di_s}{dt} = \text{tg}\,\alpha = \text{const}$, siis $e_e = -L_s \frac{di_s}{dt}$ on konstant. Jagades suuruse e_e lühistatud sektsiooni takistusega, saame endainduktsiooni elektromotoorjõust e_e põhjustatud lisavoolu

$$i_e = \frac{e_e}{r_6 + r_1},$$

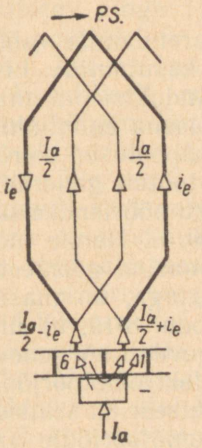
kus r_6 ja r_1 on harja pinna kuuendale kommutaatorilestale pealejooksva osa ja esimeselt lestalt mahajooksva ülejäänud osa üleminekutakistused. Sektsiooni enda takistus on r_6 ja r_1-ga võrreldes tühine.

Hetkel $t = T/2$ (joon. 8-15) $r_6 + r_1 = 2R + 2R = 4R$, aga $t = 0$ ja $t = T$ korral $r_6 + r_1 = \infty$. Nende kaalutluste alusel arvutatud voolu väärtused $i_s = f(t)$ on kujutatud joonisel 8-17, *b*. Sektsiooni voolude summa $(i_s + i_e)$ endainduktsiooni emj. olemasolu korral, s. o. reaalsetes tingimustes, on joonisel 8-17, *a* näidatud punktiirjoonega.

Sel juhul nimetatakse kommutatsiooni a e g l u s t a t u k s, sest emj. e_e pikendab voolu muutumise protsessi sektsioonis, tugevdades voolu tema vähendamise korral ja takistades tema kasvu kommutatsiooniperioodi lõpul. Joo-

nisel 8-18 on näidatud voolude jagunemine hetkel $t = T/2$ emj. e_e esinemise korral. Osutub, et sel juhul voolutihedus harja pealejooksvas servas väheneb, mahajooksvas servas aga kasvab, põhjustades täiendavat kuumenemist ja harjade ettenähtust kiiremat kulumist.

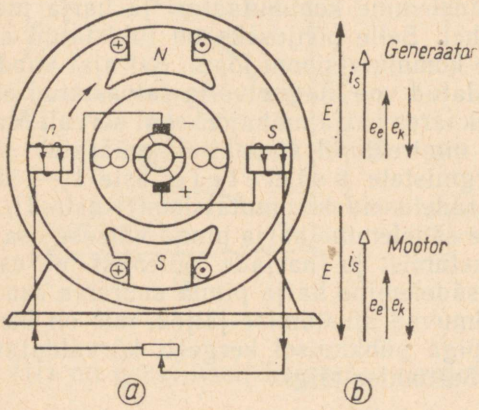
Peamiseks hädaks, mida põhjustab aeglustatud kommutatsioon, on sädelemine kommutaatori ja harja mahajooksva serva vahel. Selle põhjuseks on lühistatud sektsiooni lahutumine kommutatsiooni lõpul. Sel ajal vabaneb sektsiooniga aheldatud voo magnetvälja salvestatud energia $^1/_2 L_s i_e^2$ elektrikaares harja mahajooksval serval. Masin võib töötada, kui nimirežiimil visuaalselt määratav sädelemine vastab järgmistele a s t m e t e l e: aste 1 — sädelemist pole (nn. sädeluseta kommutatsioon); aste $1^1/_4$ — nõrk punktitaoline sädelemine harja pinna väikese osa all, kommutaatori mustumist ja harjade põlemist ei esine; aste $1^1/_2$ — nõrk sädelemine harja pinna suurema osa all, kommutaatorile ilmuvad mustumise jäljed, mis on bensiinis niisutatud lapiga pühkimisel kergesti kõrvaldatavad, harjadel ilmneb söestumise jälgi.



Joon. 8-18. Voolude jaotus aeglustatud kommutatsiooni korral.

Kommutatsiooni parendamiseks kasutatakse tervet rida abinõusid. Selleks et vähendada voolu i_e, tehakse ülemine-kutakistus hästi suur, kasutades normaalmasinates grafiitharju ja veo- ning kraanamootorites ja valtsmasinate mootorites süsigrafiit- või elektrografiitharju.

Madalapingeliste (autode, traktorite, elektrolüüsiseadmete jne.) masinates kasutatakse vaskgrafiitharju. Harjad valitakse tehases vastaval stendil katsetamisel ja seepärast võib kulunud harja asendada vaid täpselt sama liiki harjaga.



Joon. 8-19. Lisapoolused.

Kõige tõhusamaks kommutatsiooni parendamise vahendiks on lisapooluste (joon. 8-19) kasutamine. Lisapooluste magnetvoog suunatakse endainduktsiooni magnetvooga vastassuunaliselt, mille tulemusena endainduktsiooni emj. ja täiendav vool i_e kaob. Lisapoolused asuvad geomeetrilisel neutraalil ja, kui masin töötab generaatorina, vahelduvad nad peapoolustega ankru pöörlemise suunas nii, nagu on näidatud joonisel 8-19, *a*. Nende mõju seisneb järgnevas: kui sektsioon jõuab masina geomeetrilisele neutraalile ja ta lühistatakse harjaga, on masina emj. E ja vähenev sektsiooni vool i_s (joon. 8-19, *b*) ühesuunalised. Endainduktsiooni emj. e_e tugevdab nõrgenevat voolu ja on järelikult samasuunaline elektromotoorjõuga E. Seega tuleb e_e kompenseerimiseks indutseerida sektsioonis täiendavalt endainduktsiooni elektromotoorjõule vastassuunaline kommutatsiooni emj. e_k. See on kujutatud tinglikult joonisel 8-19, *b*. Kõik see toimub, kui lisapoolus *s* (joon. 8-19, *a*) paigutada ankru pöörlemise suunas peapooluse N järele. Kui reguleerida $e_k = e_e$, siis on sektsiooni täiendav vool i_e võrdne nulliga ja kommutatsioon muutub lineaarseks.

Kui masin töötab mootorina, pöörleb ankur sama ankruvoolu suuna ning peapooluste polaarsuse korral vastupidises suunas ja emj. E on vastassuunaline voolule. Järelikult peab emj. e_k olema emj. E-ga (joon. 8-19, *b*) samasuunaline ja poolused vahelduvad siis järgmiselt: $N - n - S - s$.

Selleks et endainduktsiooni emj. kompenseerimine toimuks automaatselt mistahes koormusel, tuleb lisapooluste mähised ühendada jadamisi ankrumähisega (joon. 8-19, *a*) ja poolused tuleb teha mitteküllastuvatena. Sel juhul $e_k \equiv \Phi_l \equiv I_a$. Kuna $e_e \equiv I_a$, siis ta kompenseeritakse elektromotoorjõuga e_k igal koormusel. Tegelikkuses on kommutatsiooniprotsess muidugi tunduvalt keerulisem kui siin vaadeldud juhul.

Alalisvoolumasinate ekspluateerimisel tuleb arvestada kommutaatoril ringtule tekkimise võimalust, mis viib masina tõsise avariini. Nähtuse olemusest allpool.

Kui magnetvoo tihedus õhupilus B_δ on konstantne, siis leitakse, jagades masina pinge kahe erinimelise harja vahel olevate kommutaatorilestade arvuga, keskmine pinge kahe kõrvutiasuva lesta vahel (U_k), s. o. sektsiooni poolt tekitatav pinge (joon. 8-9). See pinge peab olema väiksem pingest, mis suudab säilitada elektrikaart kahe lesta vahel, kui see kaar mingil põhjusel peaks tekkima.

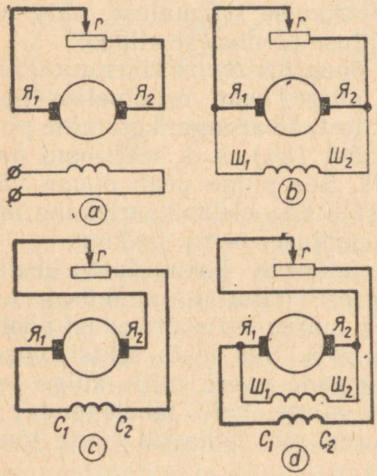
Praktiliselt on pinge mõnede kommutaatorilestade vahel kõrgem kui U_k, seda eriti tänu ristsuunalisele ankrureaktsioonile (§ 8-8), mis suurendab vootihedust pooluskinga ühe serva all 30 . . . 50%. Siis tekib sektsioonis ja muidugi ka kommutaatorilestade vahel, mille külge sektsioon on joodetud, kõrgem pinge. Eriti tähelepandav on see võimsate masinate juures, mis töötavad suure tõukelise ülekoormusega.

Ülekoormusel tekib harja mahajooksva serva all tugev sädelemine, mis ioniseerib kommutaatori ümber olevat õhku. Kui kommutaatorilestade vaheline pinge suudab elektrikaart alal hoida, siis tekibki ringtuli. Elektrikaar levib kommutaatorilestade vahel, võib lühistada erinimelised harjad ja isegi üle minna masina kerele. Selle vältimiseks kasutatakse alalisvoolumasinais konstruktiivseid eriabinõusid.

8-10. Alalisvoolugeneraatorite tüübid

Generaatorid jaotatakse mitmesse tüüpi. Nad erinevad üksteisest ekspluatatsiooniomaduste poolest, mis sõltuvad peamiselt nende ergutusmähiste toitmise viisist.

Võõr- ehk *välisergutusgeneraatoriks* (joon. 8-20, *a*) nimetatakse generaatorit, mille ergutusmähis saab voolu I_e kõrvalisest sõltumatust toiteallikast. Neid generaatoreid kasutatakse automaatikaseadmetes ja seal, kus ankru klemmipinge on väike (6 ... 8 V) või suur (üle 500 V). Kõiki ülejäänud joonisel 8-20 näidatud masinaid nimetatakse *endaergutusega* generaatoriteks. Nende ergutusmähiseid toidavad ankrumähised.



Joon. 8-20. Ergutusmähise ja ankrumähise ühendusviisid.
a — eraldi; *b* — rööpühendus; *c* — jadaühendus; *d* — segaühendus.

Rööpergutusgeneraatoriks ehk haruvoolugeneraatoriks (joon. 8-20, *b*) nimetatakse generaatorit, mille ergutusmähis ühendatakse ankru klemmidega *Я* rööbiti välisahelaga *r*. Selle generaatori eeliseks on see, et ta ei vaja täiendavat energiaallikat ergutusmähise toitmiseks, ja seepärast on ta väga laialt levinud.

Jadaergutusgeneraatoril ehk peavoolugeneraatoril (joon. 8-20, *c*) on ergutusmähis ühendatud jadamisi välisahelaga. Teda kasutatakse ainult eriotstarbelise masinana.

Kompaund- ehk liitergutusgeneraatoril (joon. 8-20, *d*) on kaks ergutusmähist: jadamähis (*C*) ja rööpmähis (*III*). Ta omadused on paremad kui rööpergutusgeneraatoril, kuid ta on kallim.

Elektrimasinate ekspluatatsioonilisi omadusi iseloomustatakse vastavate kõveratega (graafikutega), mida nimetatakse karakteristikuteks. Need näitavad kahe suuruse vahelist sõltuvust, kui kõik ülejäänud suurused on konstantsed. Näiteks võiks tuua generaatori pinge U ja koormusvoolu I vahelise sõltuvuse konstantse pöörlemiskiiruse n ja ergutusvoolu I_e juures, s. o.

$$U = f(I),$$

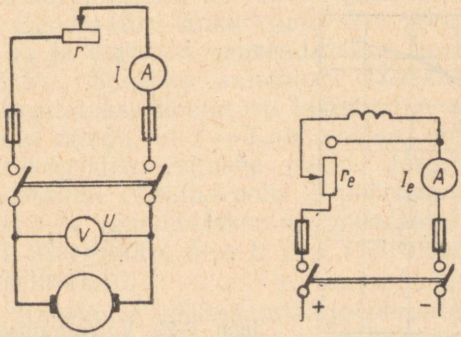
kui $n = \text{const}$ ja $I_e = \text{const}$.

Abstsiss- ja ordinaatteljele kantakse vastavate suuruste absoluutväärtused või suhtelised väärtused (nn. nimiväärtuste murdosades või protsentides).

Nimiväärtusteks nimetatakse masina sildil või passis märgitud suuruste väärtusi, mille juures on kindlaksmääratud välistingimuste korral tagatud masina normaalsed ekspluatatsioonitingimused. Neid suurusi tähistatakse indeksiga n, näiteks nimivõimsus P_n, -pinge U_n, -vool I_n, -pöörlemiskiirus n_n jne.

8-11. Võõrergutusgeneraator

Generaatori lülitusskeem on toodud joonisel 8-21. Vool I_e tuleb ergutusmähisesse sõltumatust energiaallikast. Ergutusvoolu reguleerimiseks kasutatakse reostaati r_e,



Joon. 8-21. Võõrergutusgeneraatori lülitusskeem.

millel on lisakontakt. Reostaadi liugkontakti viimisel sellele kontaktile lühistame ergutusmähise. Selle lisakontakti puudumise korral tekitaks magnetvälja salvestatud energia vooluringi katkestamisel reostaadi liugkontakti ja viimase kontakti vahel elektrikaare, mille tulemusena kontaktid sulaksid. Peale selle võib ergutusmähise suure induktiivsuse korral temas vooluringi katkestamisel tekkiv endainduktsiooni emj. olla niivõrd suur, et tekib mähise keerdude vahelise isolatsiooni läbilöök. See emj. võib ohustada ka teenindavat personali.

Ankru klemmidega ühendatakse voltmeeter ja ampermeeter, mis mõõdavad pinget U ja koormust (r) läbivat voolu $I = I_a$. Eeldatakse, et generaatori paneb pöörlema primaarjõumasin, mida joonisel 8-21 pole näidatud.

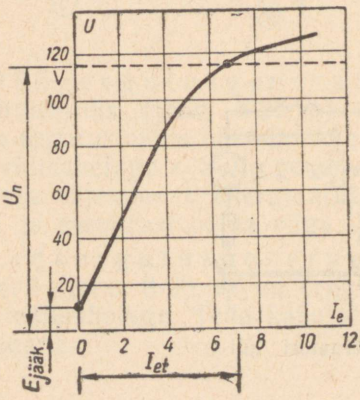
T ü h i j o o k s u k a r a k t e r i s t i k kujutab tühijooksu emj. $E_0 = U_0$ ja ergutusvoolu I_e vahelist sõltuvust konstantse pöörlemiskiiruse ja koormusvoolu $I = 0$ korral, s. o.

$$E_0 = f(I_e),$$

kui $n = \text{const}$ ja $I = 0$.

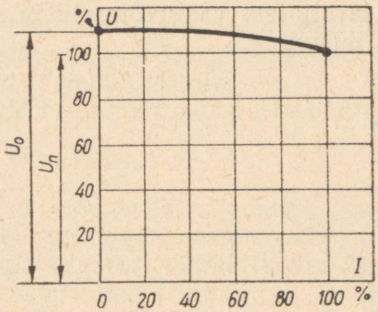
Kuna $E_0 \equiv \Phi$, siis on see karakteristik teises mastaabis masina magneetimiskõveraks. Ta võetakse üles, et kontrollida masina magnetahela arvutust.

Selleks pannakse generaatori ankur pöörlema konstantse kiirusega $n = n_n$, kusjuures ankruahel on avatud. Suletakse ergutusahela vinnaklüliti ja suurendatakse ergutusvoolu I_e seni, kuni generaatori pinge U_0 saavutab väärtuse $(1{,}1 \ldots 1{,}2)\,U_n$. Märkides pidevalt üles I_e ja U_0



Joon. 8-22. Võõrergutusgeneraatori tühijooksukarakteristik.

väärtusi, hakatakse nüüd vähendama ergutusvoolu. Saadud andmete alusel joonestatakse joonisel 8-22 toodud graafik. Nagu näha, on avatud ergutusahela korral ($I_e = 0$) pinge $U_0 = (0{,}02 \ldots 0{,}025) U_n$. Seda nimetatakse *jääkelektromotoorjõuks* $E_{jääk}$. Nimipingele U_n vastav punkt asub tavaliselt kõvera «põlvel» ja vastab voolule I_{et}, mida nimetatakse tühijooksu ergutusvooluks nimipingel.



Joon. 8-23. Võõrergutusgeneraatori väliskarakteristik.

Generaatori *väliskarakteristik* kujutab generaatori pinge sõltuvust koormusest, s. o. välisahela voolust, kusjuures pöörlemiskiirus ja ergutusvool on konstantsed:

$$U = f(I),$$

kui $I_e = \text{const}$ ja $n = \text{const}$.
See karakteristik on toodud joonisel 8-23.

Generaatori ankur pannakse pöörlema kiirusega $n = n_n$ ja ergutust suurendatakse, kuni pinge $U \approx (1{,}1 \ldots 1{,}2) U_n$. Seejärel suletakse välisahela vinnaklüliti ja vähendatakse koormuse takistust r, reguleerides ergutusvoolu nõnda, et $I = I_n$-le vastaks nimipinge U_n. See on karakteristiku esimene punkt. Järgnevalt suurendatakse konstantse ergutusvoolu ja pöörlemiskiiruse juures takistust r ja vähendatakse nii generaatori koormust tühijooksul. Märgitakse üles U ja I väärtused ja konstrueeritakse karakteristik.

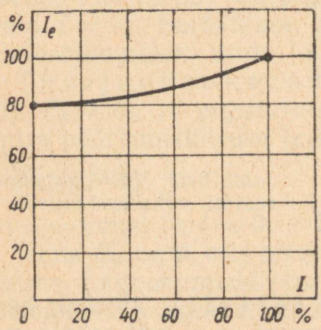
Koormuse vähendamisel generaatori emj. ja pinge kasvavad ankrureaktsiooni lahtimagneetiva mõju ja ankrumähise pingelangu Ir_a vähenemise tõttu, sest $U = E -$

$-Ir_a$. Karakteristik (joon. 8-23) on joonestatud protsentides, kusjuures 100%-le vastavad nimiväärtused U_n ja I_n.

Igat tüüpi generaatorit iseloomustatakse suurusega

$$\Delta U\% = \frac{U_0 - U_n}{U_n} 100\%, \qquad (8\text{-}11)$$

mida nimetatakse suhteliseks ehk protsentuaalseks pingemuutuseks. Võõrergutusgeneraatoritel $\Delta U\% = 5 \ldots 10\%$. Selline pinge kõikumine koormuse muutumisel on enamikule tarbijatest vastuvõtmatu ja siit tekib vajadus hoida pinget püsivana.



Joon. 8-24. Võõrergutusgeneraatori reguleerimiskarakteristik.

Reguleerimiskarakteristik näitab, kuidas tuleb reguleerida ergutusvoolu I_e, et voolu I muutumisel pinge U jääks konstantseks, s. o.

$$I_e = f(I),$$

kui $U = \text{const}$ ja $n = \text{const}$.

Reguleerinud $U = U_n$, kui $I = I_n$, vähendatakse generaatori koormust tühijooksul, kusjuures ergutusvoolu I_e vähendatakse nii, et pinge jääks muutumatuks. Märgitakse üles voolude I ja I_e väärtused ning konstrueeritakse reguleerimiskarakteristik (joon. 8-24).

8-12. Rööpergutusgeneraator

Rööpergutusgeneraatori lülitusskeem on toodud joonisel 8-25. Ergutusmähis ühendatakse ankrumähise klemmidega ja nimipingel on ergutusvool temas 2 ... 3% ankru nimivoolust.

Niisugune generaator ergutub vaid siis, kui ergutusvoolu tekitatud magnetvoog on samasuunaline jääkmagnetismi vooga. Sel juhul jääkelektromotoorjõust $E_{jääk}$ tingitud ergutusmähise vool magneedib masina magnetahelat ning generaatori magnetvoog ja emj. kasvavad. Selle tulemusena kasvab ergutusvool, mis tingib jälle magnetvoo kasvu. Selline endaergutus toimub seni, kuni emj. saab võrdseks pingelanguga ergutusmähisel, s. o.

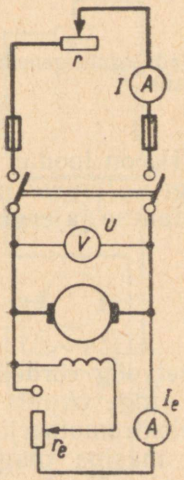
$$E = I_e r_e.$$

Haruvoolugeneraatori tühijooksukarakteristik on samasugune kui võõrergutusgeneraatoril ja selle saame eespool kirjeldatud viisil.

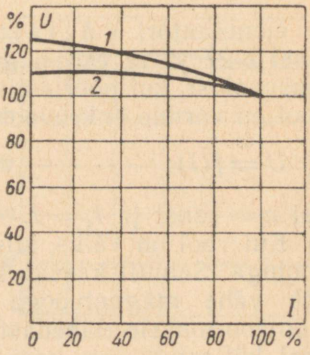
Väliskarakteristik

$$U = f(I),$$

kui $n = \text{const}$ ja $r_e = \text{const}$ (joon. 8-26, kõver *1*), võetakse rööpergutusgeneraatori puhul üles samuti nagu võõrergutusgeneraatori puhul (kõver *2*). Ta langeb ainult viimase karakteristikust kiiremini. Asi on selles, et vool rööpergutusmähises ei jää generaatori koormuse vähendamisel



Joon. 8-25. Rööpergutusgeneraatori lülitusskeem.



Joon. 8-26. Rööpergutusgeneraatori väliskarakteristik.

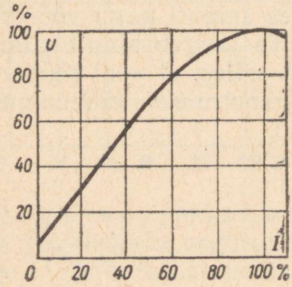
muutumatuks, vaid kasvab koos pingega, sest takistus r_e on konstantne. See põhjustab generaatori magnetvoo ja emj. kasvu, kusjuures suhteline pingemuutus $\Delta U\%$ ulatub 30%-ni.

Reguleerimiskarakteristikud võetakse ülalkirjeldatud generaatoritel üles ühtemoodi ja neil on ühesugune kuju.

8-13. Jadaergutusgeneraator

Jadaergutusgeneraatori lülitusskeem on toodud joonisel 8-20, *c*. Et ergutusmähist läbib kogu ankruvool, siis on tema takistus ankru takistusega samas suurusjärgus. Selle generaatori klemmipinge määratakse emj. ja mähiste pingelangude summa vahena:

$$U = E - I(r_a + r_e). \qquad (8\text{-}12)$$



Joon. 8-27. Jadaergutusgeneraatori väliskarakteristik.

Generaatori väliskarakteristik on toodud joonisel 8-27 ja ta esitab generaatori pinge sõltuvust koormusvoolust, kui pöörlemiskiirus on konstantne ja ergutusvool on võrdne ankruvooluga, s. o.

$$U = f(I),$$

kui $n = \text{const}$ ja $I_e = I$.

Kui vool on väike, siis kasvab magnetvoog võrdeliselt vooluga. Samuti kasvab ka generaatori pinge U, mis erineb vähe magnetvooga võrdelisest elektromotoorjõust. Nimikoormusele lähedastel koormustel masina magnetahel küllastub, mis koos ankrureaktsiooni mõju kasvuga pidurdabki magnetvoo ja seega ka emj. kasvu. Pingelang ankru- ja ergutusmähisel kasvab järsult ja vastavalt

avaldisele (8-12) hakkab pinge vähenema. Seega muutub generaatori pinge koormuse muutumisel tugevasti, mis takistabki jadaergutusgeneraatori kasutamist tavalistes tingimustes.

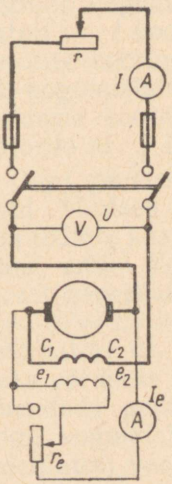
8-14. Kompaundgeneraator

Generaatori kaks ergutusmähist — rööp- ja jadamähis asuvad ühtedel ja samadel pooluste südamikel. Seega on selles generaatoris ühendatud jada- ja rööpergutusgeneraatori omadused. Tavaliselt ühendatakse mähised ankrumähisega nii, et nende magneetimisergutused liituksid. Sellist ühendust nimetatakse *pärikompaundühenduseks*.

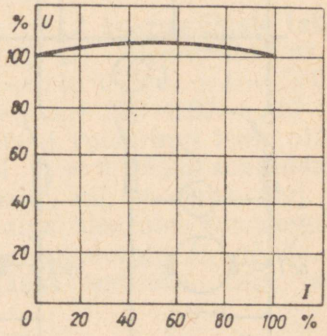
Selle generaatori *väliskarakteristik*, s. o.

$$U = f(I),$$

kui $n = \text{const}$ ja $r_e = \text{const}$, on näidatud joonisel 8-29. Nagu näeme, jääb generaatori pinge koormuse muutumisel nullist nimiväärtuseni peaaegu konstantseks. See on tingitud sellest, et koormuse kasvamisel jadamähis magneedib magnetahelat tugevamini, suurendades elektromotoor-



Joon. 8-28. Kompaundgeneraatori lülitusskeem.



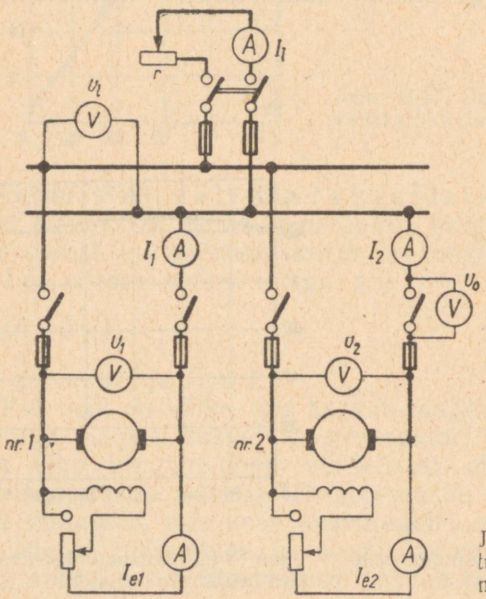
Joon. 8-29. Kompaundgeneraatori väliskarakteristik.

jõudu. Generaatori omadus hoida pinget automaatselt peaaegu konstantsena on väga oluline suurtes piirides ja sageli muutuva koormusega võrgus.

8-15. Generaatorite rööptalitlus

Vajadus rakendada generaatoreid tööle rööpühenduses on tingitud kahest põhjusest. Esimeseks on generaatorite kasuteguri tõstmine. Tõepoolest, võib seada üles ühe generaatori, mille võimsus vastab tarbija omale, või kaks poole väiksema võimsusega generaatorit. Kui ööpäeva kestel koormus muutub, siis esimesel juhul töötab võimas generaator palju tunde alakoormusega, s. o. väiksema kasuteguriga. Teisel juhul võivad täiskoormuse korral töötada kaks rööpset generaatorit, koormuse vähenemisel võib aga ühe neist välja lülitada, koormates seega teist maksimaalselt. Selline töö on säästlikum.

Teiseks põhjuseks on vajadus vähendada avariireservi. Esimesel juhul vajame tarbija võimsusega võrdse võim-



Joon. 8-30. Rööpergutusgeneraatorite lülitamine rööptööle.

susega reservgeneraatorit, teisel juhul aga poole väiksema võimsusega generaatorit.

Generaatorite rööptalitluseks nimetatakse nende tööd sellises lülituses, kus nende ühenimelised klemmid on ühendatud ühiste kogumislattide külge. Allpool vaadeldakse rööpergutusgeneraatorite rööptalitlust.

Joonisel 8-30 on kujutatud kaks generaatorit, mis peavad töötama rööbiti. Selleks tuleb nad esmalt vooluringi lülitada. Kui generaator nr. *1* on juba lülitatud kogumislattidele ja töötab, tuleb generaatori nr. *2* ankur panna nimikiirusega pöörlema ja suurendada ergutusvoolu I_{e2} seni, kuni pinge U_2 on võrdne pingega $U_1 = U_l$. Sulgenud vasakpoolse vinnaklüliti, kontrollitakse potentsiaalide vahet parempoolsete ühendamata klemmide vahel. Kui $U_1 = U_2$, peab voltmeetri näit U_0 võrduma nulliga. Siis võib sulgeda parempoolse vinnaklüliti ja lülitamisoperatsioon ongi lõppenud. Kui voltmeeter näitab, et $U_0 = U_1 + U_2$, ei tohi generaatorit nr. *2* vooluringi lülitada. Tema kogumislattidega ühendatud juhtmete otsad tuleb ümber vahetada.

Pärast lülitamisoperatsiooni lõppu on teise generaatori vool I_2 võrdne nulliga, sest tema emj. $E_2 = U_2$ on võrdne U_l-ga. Juurdelülitatud generaatorit tuleb koormata, kui koormus kogumislattidel kasvab või kui tahetakse generaatori nr. *1* koormamist lõpetada. Seejuures ei tohi generaatorite koormuse muutumisel olla häireid tarbija töös, s. t. kogumislattidevaheline pinge peab olema konstantne. Vaatleme koormuse lülitamist generaatorilt nr. *1* generaatorile nr. *2* lihtsa näite põhjal.

Olgu generaatorite nr. *1* ja nr. *2* ankrumähiste takistused võrdsed ($r_{a1} = r_{a2} = 0{,}02\ \Omega$). Generaator nr. *1* juba töötab, kusjuures $U_1 = U_l = 115$ V ja $I_1 = I_l = 200$ A. Tema emj. $E_1 = U_l + I_1 r_{a1} = 115 + 200 \cdot 0{,}02 = 119$ V. Pärast generaatori nr. *2* lülitamist vooluringi tema pinge $U_2 = U_l = E_2 = 115$ V ja vool $I_2 = 0$. Kui suurendada generaatori nr. *2* ergutusvoolu I_{e2} nii, et tema emj. E_2 saaks võrdseks näiteks 116 voldiga, siis tuleb samaaegselt vähendada generaatori nr. *1* ergutusvoolu I_{e1} nõnda, et pinge kogumislattide vahel jääks endiseks. Siis teise generaatori vool

$$I_2 = \frac{E_2 - U_1}{r_{a2}} = \frac{116 - 115}{0{,}02} = 50 \text{ A}.$$

Kuna pinge $U_l = \text{const}$, siis ka $I_l = 200\ A = \text{const}$, järelikult väheneb esimese rööpharu (generaatori nr. *1*) vool väärtuseni $I_1 = I_l - I_2 = 200 - 50 = 150$ A. See on tingitud sellest, et voolu I_{e1} vähendamisel väheneb emj. E_1 väärtuseni $E_1 = U_l + I_1 r_1 = 115 + 150 \cdot 0{,}02 = 118$ V.

Seega suurendatakse koormuse ümberlülitamise käigus koormatava generaatori ergutusvoolu, teise ergutusvoolu aga vähendatakse, et pinge kogumislattide vahel jääks endiseks.

On loomulik, et koormataval generaatoril nr. *2* pidurdusmoment kasvab, esimesel generaatoril aga väheneb. Primaarjõumasinate automaatregulaatorid suurendavad teisele ja vähendavad esimesele masinale antavat energiahulka.

Kui generaatorite ergutusvoole mitte muuta, siis jaguneb ühine koormus generaatorite vahel umbes pöördvõrdeliselt nende ankrumähiste takistustega. Tavaliselt on generaatorite ankurmähiste takistused pöördvõrdelised generaatorite nimivõimsusega:

$$\frac{r_{a2}}{r_{a1}} : \frac{I_1}{I_2} : \frac{P_{1n}}{P_{2n}}.$$

Seega, kui generaatorite võimsused on ühes suurusjärgus, jaguneb koormus nende vahel võrdeliselt nimivõimsustega.

8-16. Alalisvoolumootorid

Elektrimootori leiutas 1834. aastal M. H. Jacobi.

Nagu eespool näidatud, võib üks ja sama masin töötada nii generaatorina kui ka elektrimootorina. Pingelang generaatorina töötava masina ankrumähisel on nimivoolu (I_n) korral 4 ... 10% nimipingest (U_n). Oleks nagu loomulik, et masina töötamisel mootorina on pingelang samasugune, kuid kui lülitada paigalseisev elektrimootor pingele $U = U_n$, siis selle vool

$$I_a = \frac{U_n}{r_a}$$

on nimivoolust 10 ... 25 korda suurem. Kuna see on lubamatu, tuleb käivitamisel ankruklemmidele antavat pinget vähendada 96 ... 90% võrra nimipingest. Seadmeks, mis

vähendab mootori ankrumähisele antavat pinget, on käivitusreostaat, mis ühendatakse jadamisi ankrumähisega.

Siis käivitusvool

$$I_k = \frac{U_n}{r_a + r_k}. \tag{8-13}$$

Reostaadi takistus r_k valitakse nii, et käivitusvool I_k oleks (1,5 ... 2,0) I_n.

Kui ankur hakkab pöörlema, siis tema mähistes indutseeritav vastu-emj. kasvab. Sel juhul vool

$$I_a = \frac{U - E}{r_a + r_k}.$$

Mida suurem on pöörlemiskiirus ja emj., seda väiksem on vool ja seda kiiremini kaob vajadus reostaadi takistuse r_k järele. Käivitamise lõpul lülitatakse reostaat täielikult välja ja ankruvool [valem (8-4)]

$$I_a = \frac{U - E}{r_a}. \tag{8-14}$$

Püsitöörežiimis moodustab ankrus indutseeritav vastu-emj. $I_a = I_n$ korral (0,96 ... 0,9) U_n, tühijooksul aga (koormus võllil on võrdne nulliga), kui ankruvool $I_a = I_0 \approx (0{,}05 \ldots 0{,}1)\ I_n$, on vastu-emj. suurem, ulatudes 99%-ni U_n-st.

Vastavalt valemile (8-7)

$$E = c_E n \Phi.$$

Elektrimootori pöörlemiskiirus

$$n = \frac{1}{c_E} \frac{E}{\Phi}. \tag{8-15}$$

Pöörlemiskiirus on võrdeline ankrus indutseeritava elektromotoorjõuga ja pöördvõrdeline magnetvooga.

Võrreldes valemeid (8-14) ja (8-15), saame:

$$n = \frac{1}{c_E} \frac{U - I_a r_a}{\Phi}. \tag{8-16}$$

Arvestades kadusid hõõrdumisel, võib valemite (8-8)

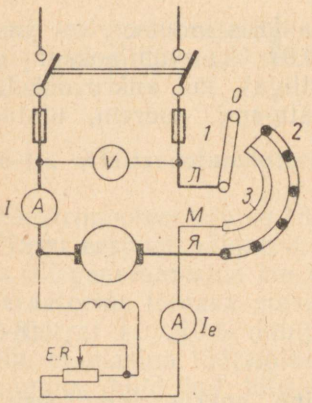
ja (8-10) abil avaldada elektrimootori poolt arendatava pöördemomendi ja võimsuse:

$$M = c_M I_a \Phi;$$
$$P = EI_a = c_E I_a \Phi n.$$

Koormuse suurenemisel võllil elektrimootori vool I kasvab, sest kasvab tarbitav võimsus $P_1 = UI_a$, pinge U aga jääb konstantseks. Vool kasvab seni, kuni pidurdusmoment võllil tasakaalustab üha kasvava pöördemomendi. Mootori igale koormusele vastab kindel pöörlemiskiirus. Ekspluatatsiooniliste omaduste alusel jaotatakse elektrimootorid nagu generaatoridki nelja tüüpi: võõrergutus-, rööpergutus-, jadaergutus- ja kompaundmootoriteks.

8-17. Rööpergutusmootor

Rööpergutusmootori lülitusskeem on toodud joonisel 8-31. Enne vinnaklüliti sulgemist tuleb veenduda, et käivitusreostaadi *2* vänt *1* asub tühijooksu kontaktil 0. Ergutusahelas oleva reostaadi (*E. R.*) vänt peab olema asendis, kus reostaadi takistus on vähim (joon. 8-31).



Joon. 8-31. Rööpergutusmootori lülitusskeem.

Kui vinnaklüliti on suletud, viiakse vänt *1* esimesele töökontaktile. Mootori poolt tarbitav vool *I* jaguneb kaheks — vooluks I_a, mis kulgeb läbi kõigi käivitusreostaadi sektsioonide takistusega r_r ja ankrumähise, ning vooluks I_e, mis kulgeb mööda metallkaart *3* ergutusmähisesse.

Seega

$$I = I_a + I_e, \qquad (8\text{-}17)$$

kus $I_e \approx (0{,}01 \ldots 0{,}07)\ I_n$.

Pärast esimest voolutõuget $I_k \approx (1{,}5 \ldots 2{,}0)\ I_n$ hakkab ankruvool pöörlemiskiiruse kasvamisel vähenema ja käivitusreostaadi vänt *1* viiakse teisele kontaktile. Vool kasvab jälle hüppeliselt ning seejärel väheneb. Reostaadi vänt viiakse jälle järgmisele kontaktile jne. Käivitamisprotsess lõpeb, kui kogu takistus r_r on vooluringist välja lülitatud. Käivitusreostaati ei või pikaks ajaks voolu alla jätta, sest ta on mõeldud vaid lühiajaliseks tööks.

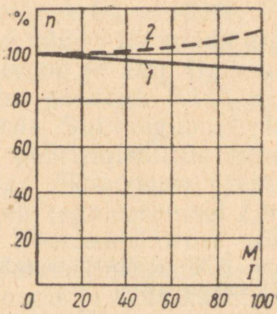
Käivitamisel peab elektrimootor arendama suurt pöördemomenti, mis on võrdeline magnetvooga [valem (8-8)]. Sellest tingituna tekitataksegi käivitamisel maksimaalne magnetvoog Φ, reguleerides $I_e = I_{e\,max}$. Käivitamisel on veel soovitav, et vool I väheneks hästi kiiresti. Selleks peab kiiresti kasvama vastu-emj., mis on samuti võrdeline magnetvooga.

Elektrimootori väljalülitamiseks viiakse käivitusreostaadi vänt algul nullkontaktile, seejärel avatakse vinnaklüliti. Nii välditakse lüliti kontaktide põlemist. Mootori lülitusskeem peab olema selline, et ergutusmähise ahela katkemine oleks välistatud (joon. 8-31).

Montaaži lihtsustamiseks tähistatakse käivitusreostaadi klemmid järgmiselt: *Л* — võrgujuhtme klemm, *Я* — ankrumähise klemm ja *М* — ergutusmähise klemm.

Enamik elektrimootori karakteristikuid kujutab endast masina mehhaaniliste omaduste muutumise graafikuid.

Kiiruskarakteristikuks nimetatakse pöörlemis-



Joon. 8-32. Rööpergutusmootori kiiruskarakteristik.

kiiruse n ja voolu I vahelist sõltuvust tingimusel, et pinge U ja ergutusvool I_e on konstantsed, s. o.

$$n = f(I),$$

kui $U = \text{const}$ ja $I_e = \text{const}$. See sõltuvus on kujutatud joonisel 8-32 kõveraga 1. Tühijooksul, kui $I_0 < 0{,}1\ I_n$, on kiirus maksimaalne, sest $I_0 r_a \approx 0$:

$$n_0 = \frac{1}{c_E} \frac{U - I_0 r_a}{\Phi} \approx \frac{1}{c_E} \frac{U}{\Phi}. \qquad (8\text{-}18)$$

Kui koormus võllil kasvab, kasvab ka Ir_a ja pöörlemiskiirus peab vähenema. Samal ajal vähendab ankrureaktsioon magnetvoogu Φ, mille tulemusena kiirus peaks kasvama. Olemasolevais elektrimootoreis mõjutab pingelangu kasv kiirust rohkem ja koormuse kasvamisel viimane väheneb alati, kuigi üsna vähe — $(0{,}05 \ldots 0{,}1)\ n_n$, sest $I_n r_a$ pole suurem kui $0{,}1\ U_n$. Sellist kiiruskarakteristikut nimetatakse jäigaks.

Kui $I_e = \text{const}$, siis ka magnetvoog $\Phi \approx \text{const}$ ja elektrimootori pöördemoment

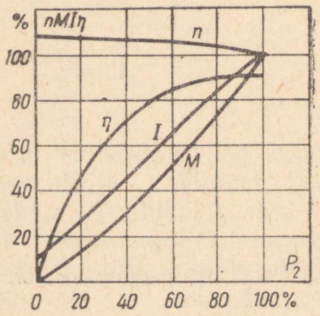
$$M = c_M I \Phi \approx (c_M \Phi) I \qquad (8\text{-}19)$$

on võrdeline vooluga I. Seega saadakse joonisel 8-32 abstsisstelje mastaabi vastaval muutmisel elektrimootori mehhaaniline karakteristik, s. o.

$$n = f(M),$$

kui $U = \text{const}$ ja $I_e = \text{const}$.

Töökarakteristikud antakse tavaliselt kõigis kataloogides ja elektrimootorite kirjeldustes. Eriti vajalikud on nad ekspluatatsiooni jaoks, kujutades n, M, I ja η



Joon. 8-33. Rööpergutusmootori töökarakteristikud.

sõltuvust P_2-st, kusjuures $U = \text{const}$ ja $I_e = \text{const}$ ning kus η tähistab masina kasutegurit, P_2 aga kasulikku võimsust masina võllil (joon. 8-33).

Elektrimootori võllil arendatav (kasulik) võimsus

$$P_2 = \frac{M 2\pi n}{60}$$

ja pöördemoment

$$M = \frac{P_2 \cdot 60}{2\pi n}. \qquad (8\text{-}20)$$

Konstantse pöörlemiskiiruse korral oleks sõltuvus $M = f(P_2)$ sirgjooneline ($M \equiv P_2$), läbides koordinaatide alguspunkti. Tegelikult P_2 kasvamisel kiirus väheneb pisut ja moment kasvab kiiremini kui lineaarse sõltuvuse korral. Vool I on samuti peaaegu võrdeline võimsusega võllil P_2, sest konstantse pinge korral on vool võrdeline tarbitava võimsusega $P_1 = UI$, kaod mootoris ($P_1 - P_2$) on aga väikesed. Tühijooksul, kui $P_2 = 0$, pole vool I_0 võrdne nulliga ja vastav kõver ei läbi koordinaatide alguspunkti.

Rööpergutusmootor on reguleeritavatest elektrimootoritest parim. Ta võimaldab muuta pöörlemiskiirust sujuvalt ja ökonoomselt, mis toimub peaaegu eranditult ergutusvoolu abil. Seda võimaldavad järgmised asjaolud: elektrimootori pöördemoment $M = c_M I \Phi$ on konstantse magnetvoo Φ korral võrdeline vooluga I. Vool on omakorda määratud järgmiselt:

$$I = \frac{U - E}{r_a},$$

s. o. vahe $U - E$ kaudu, mis ei ületa $(0{,}06 \ldots 0{,}1)\, U_n$. Oletame, et $U_n = 100\%$, $E = 95\%\ U_n$ ja $(U - E) = 0{,}05\ U_n$. Kui nüüd vähendada ergutusvoolu 5%, vähenevad ka magnetvoog ja emj. ligikaudu 5%. Siis suureneb vahe $U - E$ juba peaaegu $0{,}1 U_n$-ni, vool aga kasvab peaaegu kaks korda. Siit selgub, et elektrimootori pöördemoment kasvab ja pöörlemiskiirus suureneb. Selline reguleerimisviis on väga ökonoomne, sest $I_e \approx (0{,}01 \ldots 0{,}07)\ I_n$ ja energiakadu reguleerimisel $I_e^2 r_e$ on väike.

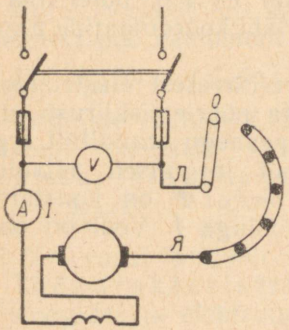
Pöörlemiskiirust võib reguleerida ka ankrumähisega jadamisi lülitatud lisatakisti abil. See viis pole aga ökonoomne ja seda kasutatakse harva, vaid eriseadmetes.

Rööpergutusmootoreid kasutatakse seal, kus on vaja konstantset kiirust erinevate koormuste väärtuste korral või kus on vaja kiirust muuta piirides 1 : 1,5, spetsiaalmootorite puhul isegi piirides 1 : 4.

8-18. Jadaergutusmootor

Jadaergutusmootori lülitusskeem on toodud joonisel 8-34. Elektrimootori käivitamiseks tuleb kasutada käivitusreostaati, sest ankru- ja ergutusmähise kogutakistus on väga väike. Kõik, millest oli eespool juttu seoses elektrimootorite käivitamisega, käib ka selle mootori kohta. Vool, mida tarbib töötav elektrimootor,

$$I = I_a = I_e = \frac{U - E}{r_a + r_e}. \qquad (8\text{-}21)$$



Joon. 8-34. Jadaergutusmootori lülitusskeem.

Väikese voolu korral (20 ... 50% nimivoolust) on masina magnetvoog võrdeline vooluga ($\Phi \equiv I$) ja

$$M = c_M I\Phi = cII = cI^2, \qquad (8\text{-}22)$$

s. o. pöördemoment on võrdeline voolu ruuduga. Kui voolu väärtus ulatub nimiväärtuseni ja üle selle, muutub moment võrdeliseks voolu esimese astmega, nagu see on haruvoolumootoris.

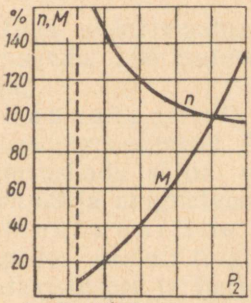
Koormuse suurenemisel elektrimootori pöörlemiskiirus

$$n = \frac{1}{c_E} \frac{U - I(r_a + r_e)}{\Phi} \qquad (8\text{-}23)$$

väheneb järsult, sest üheaegselt suurenevad nii magnetvoog Φ kui ka pingelang $I\,(r_a + r_e)$. Sellist karakteristikut nimetatakse pehmeks. Niisugust elektrimootorit kasutatakse seadmetes, kus on lubatud kiiruse tunduv vähenemine koormuse kasvamisel, samuti ka seal, kus elektrimootor peab arendama suurt pöördemomenti väikesel kiirusel. Näitena võib nimetada tõstukeid, kraanasid, elektertranspordiseadmeid.

Pöörlemiskiiruse ja momendi sõltuvus kasulikust võimsusest mootori võllil, millest oli juttu eespool, on näidatud joonisel 8-35.

Koormustel, mis on väiksemad kui $(0{,}25 \ldots 0{,}3)P_{2n}$, pöörleb elektrimootor lubamatult suure kiirusega, sest ta magnetvoog väheneb tugevasti. Ohu tõttu, et tsentrifugaaljõud võivad tekitada ankrule mehhaanilisi vigastusi,



Joon. 8-35. Jadaergutusmootori kiiruskarakteristik ja momendikarakteristik.

on selline töörežiim lubatud vaid neile elektrimootoreile, mille võimsus on mõnikümmend vatti.

Jadaergutusmootori kiiruse muutmine on ökonoomsem mitmemootorilistes seadmetes, kus kasutatakse nende ühendamist jadamisi ja rööbiti. Kiiruse muutmine ankurmähisega jadamisi lülitatud takisti abil või ergutusmähise šunteerimisega magnetvoo vähendamise eesmärgil on vähem ökonoomne, kuid leiab kasutamist kiiruse muutmiseks väiksemate astmete kaupa.

8-19. Kompaundmootor

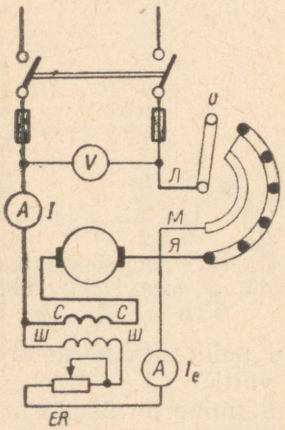
Kompaund- ehk liitergutusmootoris peavad ilmselt olema ühendatud rööp- ja jadaergutusmootori omadused (joon. 8-36). Mõlemad ergutusmähised ühendatakse nii, et nende magneetimisergutused ja seega ka magnetvood Φ_r ja Φ_j liituksid. Siis

$$n = \frac{1}{c_E} \frac{U - I_a(r_a + r_j)}{\Phi_r + \Phi_j} \tag{8-24}$$

ja

$$M = c_M I_a (\Phi_r + \Phi_j). \tag{8-25}$$

Elektrimootori liitergutust kasutatakse kahel juhul.



Joon. 8-36. Kompaundmootori lülitusskeem.

Esiteks, kui kiiruskarakteristik peab olema pehme, kuid siiski jäigem kui jadaergutusmootoril. Seda on vaja hooratastega elektriajamites (käärid, pressid jms.). Teatavasti pöörleva hooratta energia kasutamisel muutub pöörlemiskiirus. Kui koormus kasvab järsult (löökkoormus), siis pehme karakteristikuga mootori kiirus väheneb, hooratas püüab aga pöörlemiskiirust säilitada ja tema kineetiline energia muundub mehhanismi poolt tehtavaks tööks. Selline hooratta ja mootori koostöö lubab valida mootori minimaalselt vajaliku võimsusega.

Teisel juhul on elektrimootori kiiruskarakteristik jäik,

tegemist on stabiliseerimismähisega rööpergutusmootoriga. On alalisvoolumootoreid, mille ankru ja pooluste vaheline õhupilu on väike ning ankru ümbermõõdu ühe pikkusühiku kohta tulev ankruvool suur. Sellistes elektrimootorites on ankrureaktsiooni mõju pöörlemiskiirusele suurem kui ankrumähise pingelangu mõju [vt. valemit (8—18)] ja koormuse kasvades pöörlemiskiirus ei vähene, vaid suureneb (joon. 8—32, kõver *2*), mis on lubamatu. Elektrimootorit on võimalik muuta stabiilseks täiendava jadamähise (stabiliseeriva mähise) abil.

Võõrergutusega alalisvoolumootorid kuuluvad eriotstarbeliste mootorite hulka, mida käsitletakse 12. peatükis.

8-20. Kaod ja kasutegur

Igas elektrimasinas tekivad töötamisel energiakaod: rauaskadu, hõõrdumisest tingitud kadu, vases- ja lisakadu.

Rauaskadu P_r tekib ankrukeha ja pooluskingade ümbermagneetimisel hüstereesi ja pöörisvoolude tõttu. Võimsuskadu sõltub ümbermagneetimise sagedusest $f = pn/60$ ja magnetvoo tiheduse maksimaalväärtusest B_m.

Mehhaaniline ehk hõõrdekadu P_{meh} tekib laagrites, samuti tingituna pöörlevatele osadele mõjuvast õhutakistusest ja harjade hõõrdumisest vastu kommutaatorit. Mehhaaniliste kadude suurus on võrdeline masina pöörlemiskiirusega n. Võimsuskadu $P_r + P_{meh}$ on konstantse pöörlemiskiiruse ja ergutusvoolu I_e korral konstantne ja ei sõltu masina koormusest. Teda nimetatakse tühijooksukaoks P_0.

Elektriline kadu tekib voolu kulgemisel läbi ankrumähise, harjade ja kommutaatori vahelise kontaktpinna ning kõigis ergutusmähistes ja lisapooluste mähistes, seega

$$P_e = I_a^2 r_a + P_h + I_a^2 r_{lp} + I_a^2 r_p + UI_e.$$

Kadu harjadel $P_h = 2\Delta U_h I_a$ määratakse pingelangu $2\Delta U_h$ järgi, mis on süsi-, grafiit- ja elektrografiitharjadel 2 V ning metallgrafiitharjadel 0,6 V.

Lisakadu P_l mähises ja ankru teraskehas on tingitud ankrureaktsiooni ja kommuteeritavate sektsioonide ümber tekkivate väljade poolt põhjustatud magnetvälja

moonutustest. Selle kao suuruseks hinnatakse (0,01 ... ... 0,005) $U_n I_n$ ja ta loetakse võrdeliseks I_a^2-ga.

Teatavasti nimetatakse kasuteguriks masina kasuliku võimsuse P_2 ja masinale antava koguvõimsuse P_1 suhet. Sel juhul generaatori kasutegur

$$\eta_G = \frac{P_2}{P_1} = \frac{UI}{UI + (P_r + P_{meh} + P_e + P_l)} 100\%. \quad (8\text{-}26)$$

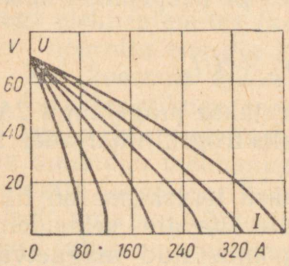
Elektrimootoril

$$\eta_M = \frac{P_2}{P_1} = \frac{UI - (P_r + P_{meh} + P_e + P_l)}{UI} 100\%. \quad (8\text{-}27)$$

Kasuteguri muutumine sõltuvalt koormusest on näidatud joonisel 8-33. Väikestel koormustel on kasutegur väike, sest kasulik võimsus P_2 on väike, tühijooksukadu P_0 aga P_2-ga võrreldes küllaltki suur. Tühijooksukadu on konstantne ja seepärast suureneb kasutegur kasuliku võimsuse kasvamisel kiiresti. Edaspidi aga suureneb elektriline kadu P_e võrdeliselt voolu ruuduga, kasuteguri kasv aeglustub, ta saavutab maksimumi ja hakkab seejärel vähenema. Tavaliselt on kasuteguri maksimum võimsusel $(0{,}75 \ldots 1{,}0) P_n$. Alalisvoolumasinatel maksimaalne kasutegur on 70 ... 93%, kusjuures suurema võimsusega masinatele vastavad suuremad väärtused.

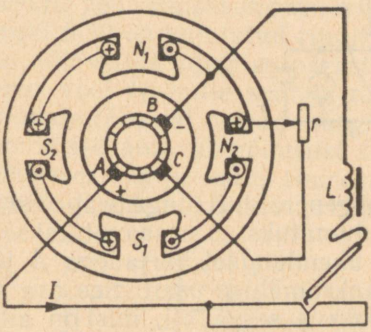
8-21. Keevitusgeneraatorid

Elektrikaarkeevitusel muutub elektroodi ja keevitatava detaili vaheline pinge järsult. Kui elektrood puudutab detaili, tekib lühis ja pinge on võrdne nulliga. Pärast elektrikaare tekkimist on pinge seda suurem, mida kaugemal on elektrood detailist. Kvaliteetse keevitamise huvides tuleb hoida voolu võimalikult püsivana. Generaatori



Joon. 8-37. Elektrikaarkeevituseks kasutatava generaatori väliskarakteristikud.

väliskarakteristikul peab sel juhul olema joonisel 8-37 näidatud kuju. Järsult langeva karakteristikuga masinas jääb vool peaaegu muutumatuks ka küllaltki suurte pinge kõikumiste korral.



Joon. 8-38. Elektrikaarkeevituseks kasutatav generaator.

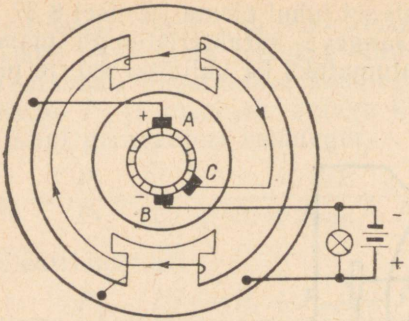
Sellise karakteristikuga generaator on kujutatud joonisel 8-38. Generaatoril on kaheosalised poolused N_1N_2 ja S_1S_2. Pooluste ergutusmähised on ühendatud jadamisi ja lülitatud harjadele B ja C. Poolused N_1S_1 on nõrgalt küllastatud, poolused N_2S_2 aga tugevasti küllastatud, milleks on vähendatud viimaste südamike ristlõiget.

Kui peaharjadelt A ja B võetakse keevitamiseks voolu I_a, siis magneedib ankrureaktsioon poolused N_1S_1 tugevasti lahti, kuid ei mõju peaaegu üldse pooluste N_2S_2 magnetvoole. Harjade A ja B vaheline pinge väheneb tugevasti, harjade B ja C vaheline pinge aga praktiliselt ei muutu, mille tõttu jääb ka ergutusvool konstantseks. Suurima keevitusvoolu reguleerimine toimub reostaadi r abil ja voolu pulseerimise vähendamiseks kasutatakse drosselit (paispooli) L.

8-22. Kolme harjaga generaator

Kolme harjaga generaatorit kasutatakse vooluallikana autodel (joon. 8-39). Tema peaharjad A ja B on alati ühendatud rööbiti lülitatud akupatareist ja valgusallikatest koosneva ahelaga. Akupatareita generaator töötada ei saa.

Autodes muutub generaatori pöörlemiskiirus laiades



Joon. 8-39. Autogeneraator.

piirides (umbes 6 : 1), kuid generaatori pinge peab mistahes kiiruse juures jääma muutumatuks. See saavutatakse generaatori ergutusmähiste ühendamisel harjadega *A* ja *C*, mis saavad pinge ühelt ankrumähise osalt. See osa asub alati pooluskinga pealejooksva serva all, mis on ankrureaktsiooni toimel tugevasti lahti magneeditud. Kui kiirus kasvab, kasvab ka emj. ja vool; samaaegselt suureneb ka ankrureaktsiooni lahtimagneetiv mõju. Viimane vähendab harjade *A* ja *C* vahel oleva ankrumähise osa elektromotoorjõudu, s. t. vähendab ka ergutusvoolu. Tänu sellele jääb harjade *A* ja *B* vaheline pinge konstantseks.

Kui pöörlemiskiirus on niivõrd väike, et generaatori emj. saab väiksemaks akupatarei pingest, lülitatakse generaator spetsiaalse relee abil vooluringist välja. Sel juhul toidetakse valgusallikaid, käivitit ja signaaliseadist akust; suurema pöörlemiskiiruse korral aga rööbiti töötavast akupatareist ja generaatorist. Kui viimasel juhul generaatori emj. saab suuremaks akupatarei pingest, siis generaator laeb akut.

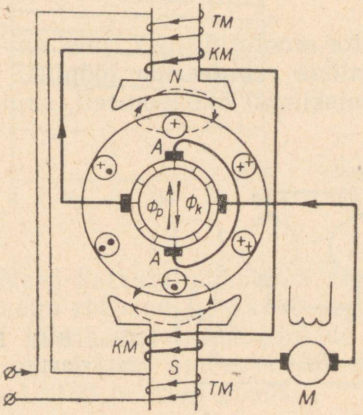
Viimasel ajal kasutatakse autodel tavalisi generaatoreid, nende pinget aga hoitakse konstantsena spetsiaalsete vibratsioontüüpi regulaatorite abil.

8-23. Masinvõimendi

Reas tööstusharudes tuleb suuri võimsusi tüürida andurite (§ 7-8) nõrkade signaalide abil. Neid signaale tuleb võimendite abil võimendada ja üheks neist seadmetest on masinvõimendi, mis on kujutatud joonisel 8-40.

See on alalisvoolumasin, mille ankur on tavalist

tüüpi, staator (ike) aga väljaulatuvate poolustega, nagu on näidatud joonisel 8-40, või silindriline. Ikkele võib olla paigutatud mitu tüürimismähist, milledest üks (*TM*) on näidatud joonisel 8-40. Anduri tüürimisvool I_t tekitab pikimagnetvoo, mis on suunatud pooluselt *N* poolusele *S*. Ankru pöörlemisel indutseeritakse selle juhtmeis, mis joonisel 8-40 on kujutatud ringikestena, emj. E_1. Harjad *A*, *A* on lühistatud ning seepärast läbib ankrumähist küllaltki suur vool I_1, mille suunda näitavad joonisel ankru välispinnale lähemal olevad märgid. Seega võimendatakse võimendisse antavat võimsust U_tI_t võimsuseni E_1I_1, mis on esimesest palju kordi suurem. See võimendamine toimub muidugi ankrut käitava primaarjõumasina võimsuse arvel.



Joon. 8-40. Masinvõimendi.

Vool I_1 tekitab ankru ristsuunalise magnetvälja (vt. § 8-8), mis on ruumis liikumatu ja on n.-ö. töötavaks väljaks. Ankrumähis pöörleb selles väljas ja temas indutseeritakse teine emj. E_2 ja vool I_2, mille suund on joonisel 8-40 tähistatud ankru teljele lähemal olevate märkidega. Et ristsuunaline magnetvoog on suur, on täiturmootorile antav võimsus E_2I_2 tunduvalt suurem kui E_1I_1. Signaali üldine võimendus

$$k_t = \frac{E_2I_2}{U_tI_t}$$

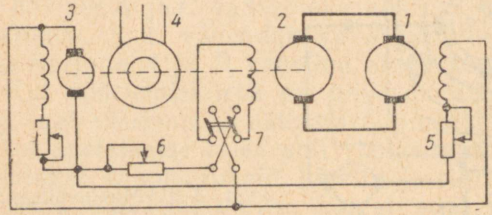
võib ulatuda 10 000-ni. Seega saab 1-vatist signaali võimendada 10 kW-ni. Tänapäeval ehitatakse masinvõimen-

deid võimsustele kilovati kümnendikosast kümnete kilovattideni. Masinvõimendi väga väärtuslikuks omaduseks on tema väike inerts, s. t. ta reageerib kiiresti signaali muutumisele.

Masinvõimendi poolustele (joon. 8-40) on paigutatud veel üks mähis, mis ühendatakse jadamisi töömähisega. Seda nimetatakse kompensatsioonimähiseks (*KM*) ja ilma selleta võimendi töötada ei saa. Tema magneetimisergutus on vastassuunaline voolu I_2 tekitatud magneetimisergutusele ning kompenseerib viimase automaatselt. Vastasel juhul mõjuks voolu I_2 tekitatud pooluste magnetvooga vastassuunaline ankru pikivoog masinale demagneetivalt.

8-24. Leonardajam

Leonardajam (generaator-mootorlülitus), mis on näidatud joonisel 8-41, võimaldab reguleerida tööpinki käitava elektrimootori pöörlemiskiirust ökonoomselt, sujuvalt ja laiades piirides.



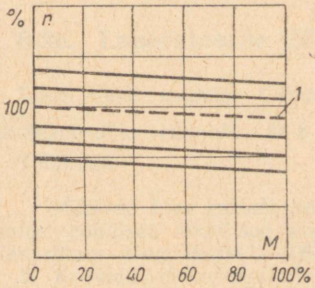
Joon. 8-41. Leonardajam.

Elektrimootor *1* ühendatakse tema toitmiseks mõeldud generaatoriga *2*, kasutamata käivitusreostaati. Generaatoril ja mootoril on võõrergutus, mille allikaks on alalisvoolugeneraator *3*, mida nimetatakse ergutiks. Generaatorist *2* ja ergutist *3* koosneva seadme paneb pöörlema asünkroonmootor *4*.

Elektrimootori *1* pöörlemiskiirust saab muuta, kui reguleerida reostaadi *5* abil tema ergutusvoolu või muuta reostaadi *6* abil generaatori *2* ergutusvoolu ning seega ka pinget.

Muutes lüliti *7* abil generaatori *2* ergutusvoolu suunda, võib muuta generaatori harjade polaarsust ja seega ka elektrimootori *1* pöörlemissuunda.

Seda lülitust kasutatakse laialdaselt kaevandusseadmeis, laevakruvide ajameis, metallurgiatehastes ja metallilõikepinkide ajameis. Joonisel 8-42 on toodud leonardajami mehhaanilised karakteristikud, mis sarnanevad joonisel 8-32 toodud karakteristikutega. Kõver *1* kujutab endast puhtteoreetilist karakteristikut, mille saaksime, kui mootori r_a oleks null. Sellest allpool asuvad karakteristikud, mis on saadud kiiruse reguleerimisel generaatori pinge muutmise abil, ülalpool aga need, mis on saadud mootori ergutusvoolu muutmisel.



Joon. 8-42. Leonardajami mehhaanilised karakteristikud.

Need karakteristikud on sirgjooned, mis on omavahel peaaegu rööpsed ja jäävad reguleerimisel jäigaks. See on eriti tähtis metallilõikepinkide ajamite puhul. Reguleerimisvahemik on umbes 1 : 20, masinvõimendi kasutamisel aga 1 : 100 ja isegi enam.

8-25. Laboratoorne töö. Rööpergutusmootor

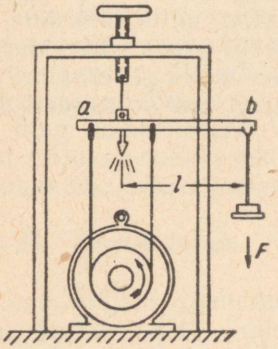
Enne tööle asumist tutvuda paragrahvide 8-16 ja 8-17 sisuga.

Tööplaan

1. Märkida üles katsetatava elektrimootori põhilised tehnilised andmed. Valida nende alusel vajalik mõõte- ja abiaparatuur ning märkida üles selle tehnilised andmed.
2. Koostada lülitus (joon. 8-31) ja näidata seda juhendajale.
3. Käivitada elektrimootor. Kindlaks teha tema pöörlemissuund. Peatada elektrimootor.
4. Muuta elektrimootori pöörlemissuunda:
a) voolu suuna muutmisega ergutusmähises;
b) voolu suuna muutmisega ankrumähises.
5. Käivitada elektrimootor. Nimipinge ja nimiergutusvoolu kor-

ral muuta elektrimootori koormust nullist nimiväärtuseni, reguleerides pidurilindi pingutust (joon. 8-43).

Mitmesugustel koormustel märkida üles U, I, I_e, n ja F väärtused; F on siin kangi õlale l rakendatud jõud, mis hoiab kangi ab horisontaalasendis.



Joon. 8-43. Mootori pidurdusseadme skeem.

6. Saadud andmete alusel määrata

a) elektrimootori pöördemoment

$M = Fl$ (kG · m),

kus F on jõukilogrammides ja l meetrites;

b) elektrimootori poolt arendatav võimsus

$$P_2 = \frac{M2\pi n}{60} = F\frac{2\pi nl}{60} \text{ (kG · m/s)};$$

avaldades P_2 vattides, saame:

$$P_2 = \frac{M2\pi n}{60 \cdot 0{,}102} = 1{,}03Mn;$$

Tabel 8-1

Jrk. nr.	Mõõtmistulemused						Arvutustulemused				Märkusi
	U	I	I_e	n	F	l	M	$P_1 = UI$	P_2	η	
	V	A	A	p/min	kG	m	kG · m	W	W	%	

c) elektrimootori kasutegur

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% = \frac{1{,}03Mn}{IU} 100\%.$$

Mõõtmis- ja arvutustulemused märkida tabelisse 8-1.

7. Mõõtmis- ja arvutustulemuste alusel konstrueerida elektrimootori töökarakteristikud: n, I, M ja η sõltuvalt P_2-st, kui $U = \text{const}$ ja $I_e = \text{const}$.

8. Nimipingel muuta elektrimootori koormust nullist nimiväärtuseni, reguleerides seejuures ergutusvoolu nii, et mootori pöörlemiskiirus ei muutuks.

Saadud andmete alusel konstrueerida mootori reguleerimiskarakteristik, s. o. $I_e = f(I)$, kui $U = \text{const}$ ja $n = \text{const}$.

8-26. Laboratoorne töö. Rööpergutusgeneraator

Enne tööle asumist tutvuda paragrahvide 8-10, 8-11 ja 8-12 sisuga.

Tööplaan

1. Märkida üles katsetatava generaatori ja teda käitava elektrimootori põhilised tehnilised andmed. Nende alusel valida mõõte- ja abiaparatuur ning märkida üles ka nende tehnilised andmed.

2. Koostada elektrimootori (joon. 8-31) ja generaatori (joon. 8-25) lülitused ning näidata neid juhendajale.

3. Generaatori pöörlemisel nimikiirusega n_n muuta ergutusvoolu I_e nullist I_{en}-ni, sealjuures märkida emj. ja ergutusvoolu väärtused tabelisse 8-2.

Tabel 8-2

Jrk. nr.	E	I_e	n	Märkusi
	V	A	p/min	

Saadud andmete alusel konstrueerida tühijooksukarakteristik, s. o. $E = f(I_e)$, kui $n = \text{const}$ ja $I = 0$.

4. Kasutades sama lülitust, reguleerida välja generaatori nimipöörlemiskiirus, nimivool ja nimipinge. Seejärel, hoides konstantsena generaatori ergutusvoolu ja pöörlemiskiirust, vähendada generaatori voolu I nimiväärtusest I_n nullini ja märkida tabelisse 8-3 I, U, I_e ja n väärtused erinevatel koormustel.

5. Korrata katset, hoides konstantsena ergutusahela takistust ja generaatori pöörlemiskiirust.

6. Saadud andmete alusel konstrueerida 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 suhteline pingemuutus [valem (8-11)].

7. Kasutades sama lülitust ja hoides generaatori nimipöörlemiskiirust, muuta ergutusvoolu suurust nii, et pinge generaatori klemmidel jääks voolu erinevatele väärtustele ($I = 0$ kuni $I = I_n$) vaatamata konstantseks.

Tabel 8-3

Jrk. nr.	U	I	I_e	n	Märkusi
	V	A	A	p/min	

Märkida tabelisse 8-3 suuruste U, I, I_e ja n väärtused.

Saadud andmete alusel konstrueerida generaatori reguleerimiskarakteristik, s. o. $I_e = f(I)$, kui $U = \text{const}$ ja $n = \text{const}$.

9. TRANSFORMAATORID

9-1. Trafo otstarve

Elektrijaamade generaatorite toodetud elektrienergia tuleb kanda üle enamasti küllaltki suurte kauguste taha (vt. § 19-1). Selleks et vähendada elektrienergia ülekandega seotud kulutusi ja samuti kadusid, tuleb tõsta elektriülekandeliinide pinget sadade kilovoltideni. Energia jaotamiseks tarbijate vahel tuleb pinget madaldada sadade ja kümnete voltideni. Kõigest sellest ongi tingitud vajadus pinget mitu korda muuta (transformeerida), mis saab teoks transformaatorite abil.

Transformaatoriks ehk lühidalt trafoks nimetatakse staatilist aparaati, millel on kaks (vahel ka enam) mähist, mis on aheldatud vahelduva magnetväljaga. Viimase vahendusel toimubki ühe pingega vahelduvvoolu



P. N. Jablotškov (1847—1894).

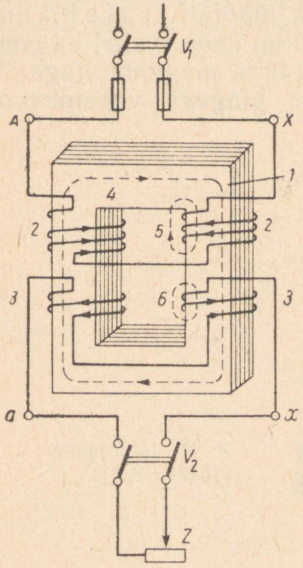
muundumine teise pingega vahelduvvooluks, kusjuures sagedus ei muutu.

Transformeerimiste arv teel elektrijaamast tarbijani on tavaliselt suur ning seepärast tulebki jaamades ülesseatud generaatorite võimsuse 1 kW kohta 4...5 kW trafode võimsust. Elektrienergia summaarsed kaod transformaatoreis moodustavad tunduva osa kogu energiasüsteemi kadudest. Seepärast on vaja, et trafode kasutegur oleks hästi kõrge. Tänapäeva võimsate trafode kasutegur on nimivõimsusel kuni 0,995.

Transformaatori leiutajaks oli väljapaistev konstruktor ja õpetlane P. N. Jablotškov (1847—1894).

9-2. Ühefaasilise trafo töötamispõhimõte ja ehitus

Trafo töö põhineb vastastikuse induktsiooni nähtusel. Trafos (joon. 9-1) on tavaliselt kaks magnetiliselt seotud mähist 2-2 ja 3-3, mille keerdude arvud on erinevad ja mis on paigutatud magnetilise sidestuse tugevdamiseks terasest suletud magnetjuhtmetele — südamikule *1*. Selleks et vähendada pöörisvooludest tingitud energiakadu, valmistatakse südamik 0,5...0,35 mm paksustest, kõrge-

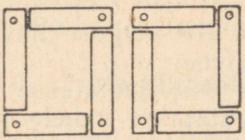


Joon. 9-1. Ühefaasiline trafo.

1 — magnetjuhe; *2* — ülempingemähis; *3* — alampingemähis; *4* — kasuliku magnetvoo tee; *5* — primaarmähise puistevoo tee; *6* — sekundaarmähise puistevoo tee.

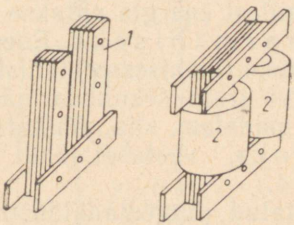
ma sageduse korral aga veelgi õhematest (0,2 ... 0,1 mm) terasplekkidest. Selleks et terasplekke üksteisest isoleerida, kaetakse nad enne ühendamist mõlemalt poolt lakiga. Trafoteras sisaldab 4 ... 5% räni, mis vähendab tugevasti hüstereesi- ja pöörisvoolukadusid.

Neid südamiku osi, millel asetsevad mähised, nimetatakse sammasteks, viimaseid ühendavaid osi aga iketeks. Sammaste ja ikete vahel asuva ruumi, nn. akna, täidavad mähised.



Joon. 9-2. Terasplekkide paigutus ühefaasilise trafo magnetjuhtme koostamisel.

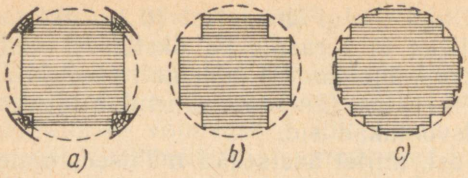
Südamiku koostamisel paigutatakse terasplekid otsapidi vaheliti. Joonisel 9-2 on näidatud kaks teraspleki kihti, mis trafo südamiku montaažil asetatakse teineteise peale. Sellise koostamisega saadakse terasplekkide ühenduskohtades minimaalne õhupilu.



Joon. 9-3. Trafo südamiku koostamine.
1 — magnetjuhtme sammas; *2* — mähised.

Algul kinnitatakse teraslehed isoleeritud poltidega pakkidesse nii, et saame valmistatud mähised sammastele paigutada (joon. 9-3), seejärel suletakse magnetjuhe ja kinnitatakse lõplikult. Seejuures saadavad sammaste ristlõiked on näidatud joonisel 9-4. Neist ruudukujulist ristlõiget kasutatakse väikese võimsuse korral, ristikujulist, mis läheneb rohkem ringjoonele, aga keskmise ja suure võimsuse korral.

Trafo mähised kujutavad endast mitmesuguse ehitusega poole. Eristatakse alampingemähist (*AP*), mis on arvestatud trafo madalamale pingele ja mis paiguta-



Joon. 9-4. Trafode südamike ristlõikeid.

takse südamikule lähemale, ning ülempingemähist (*ÜP*), mis on arvestatud kõrgemale pingele ning paigutatud kontsentriliselt mähisele *AP*.

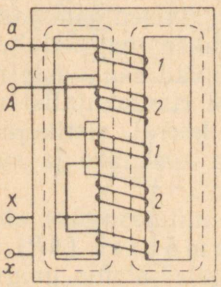
Joonisel 9-1 on mähised *ÜP* ja *AP* selguse huvides kujutatud teineteise suhtes nihutatutena.

Ühefaasilistes trafodes (joonis 9-1) jaotatakse iga mähis kaheks sektsiooniks ja paigutatakse kahele sambale. Ülem- ja alampingemähiste pooled ühendatakse omavahel nii, et mähisepoolte elektromotoorjõud liituksid.

Trafode mähiste algused ja lõpud tähistatakse ladina tähtedega. Mähiste algusi tähistavad *A*, *B*, *C* ning *a*, *b*, *c*, lõppe aga *X*, *Y*, *Z* ja *x*, *y*, *z*. Suuri tähti kasutatakse ülempingemähise ja väikesi tähti alampingemähise puhul (joon. 9-1).

Mähist, millesse juhitakse energia, nimetatakse primaarmähiseks, teist aga, millest energia antakse tarbijasse, nimetatakse sekundaarmähiseks. Energia kantakse primaarmähisest sekundaarmähisesse mähistega aheldatud magnetvoo abil. Kui trafo sekundaarmähise pinge on primaarmähise omast madalam, siis nimetatakse teda pingemadaldustrafoks, vastasel juhul aga pingekõrgendustrafoks.

Seega on joonisel 9-1 kujutatud pingemadaldustrafo. Kui me anname mähisesse *ax* energiat tema nimipingel,



Joon. 9-5. Manteltrafo.

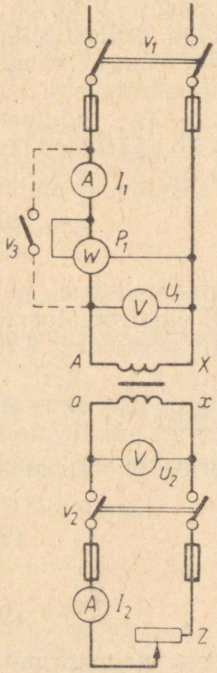
mähise *AX* klemmidega aga ühendame tarbija, siis on sama trafo pinget kõrgendav.

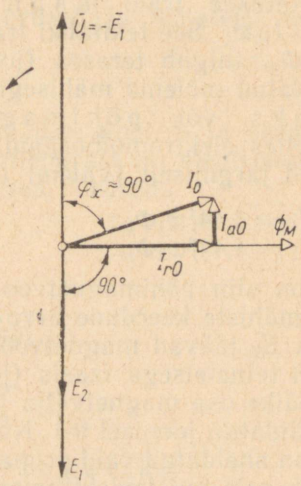
Eespool vaadeldud magnetjuhtmega trafosid nimetatakse südamiktrafodeks. Kuid on olemas ka nn. manteltrafod (joon. 9-5), mille magnetahel hargneb ja ümbritseb mähist kahest küljest. Selliste trafode ülem- ja alampingemähised valmistatakse kettakujuliste poolidena, mis asetsevad ühel sambal. Manteltrafosid kasutatakse raadiotehnilistes seadmetes.

Trafo nimivõimsuseks nimetatakse tema sekundaarmähise võimsust, mis on märgitud trafo sildile ja mis on antud kas voltamprites või kilovoltamprites.

9-3. Trafo tühijooks

Trafo tühijooksuks nimetatakse sellist tööolukorda, kus primaarmähis on ühendatud toitevõrguga, katkestatud sekundaarmähises aga voolu pole. Joonistel 9-1





Joon. 9-7. Trafo vektordiagramm tühijooksul.

Joon. 9-6. Transformaatori lülitusskeem.

ja 9-6 tekib selline olukord, kui vinnaklüliti v_1 on suletud, v_2 aga avatud.

Mähisele AX rakendatud primaarpinge U_1 muutub siinuseliselt ($u_1 = U_{1m} \sin \omega t$) ja tekitab tühijooksu vahelduvvoolu I_{10}. Kui poleks terassüdamikku, oleks tühijooksuvool reaktiivne — I_{r0} (vt. § 5-8). Ta oleks faasis magnetvooga Φ, jäädes pingest U_1 maha 90° võrra, mis on näidatud ka vektordiagrammil joonisel 9-7. Tegelikult näitab primaarmähise ahelasse lülitatud vattmeeter mingisugust võimsust P_0, mis kujutab endast võimsuskadu terassüdamikus. Võimsuskadu mähise soojendamisele on tühijooksul rauaskaoga võrreldes tühine ja seda ei arvestata. Seega tühijooksu vool $I_{10} = \sqrt{I_{a0}^2 + I_{r0}^2}$, kus primaarmähise voolu aktiivkomponent $I_{a0} \equiv P_0$.

Tänu kõrgekvaliteedilisele terasele on I_{a0} palju väiksem kui I_{r0} ja vool I_{10} jääb pingest U_1 maha nurga võrra, mis on lähedane 90°-le, $\cos \varphi_0$ on umbes 0,1. Tühijooksuvool moodustab 4 ... 10% primaarmähise nimivoolust.

Voolu I_{10} ja primaarmähise keerdude arvu w_1 korrutist nimetatakse trafo magneetimisergutuseks — $F_{10} = I_{10} w_1$. See tekitabki trafo magnetvoo, millest suurem osa Φ_m sulgub terases (joon. 9-1). See magnetvoog on aheldatud mõlema mähisega ja teda nimetatakse kasulikuks või põhimagnetvooks. Ta indutseerib mähistes elektromotoorjõud, mille efektiivväärtused avalduvad järgmiselt [valemi (5-29) alusel]:

$$E_1 = 4{,}44 f w_1 \Phi_m; \tag{9-1}$$

$$E_2 = 4{,}44 f w_2 \Phi_m. \tag{9-2}$$

Φ_m on siin põhimagnetvoo maksimaalväärtus, w_1 ja w_2 aga mähiste keerdude arvud. Mõlemad elektromotoorjõud E_1 ja E_2 jäävad magnetvoost maha 90° võrra (vt. § 5-8) ja on teineteisega faasis (joon. 9-7).

Väike osa magnetvälja joontest sulgub läbi õhu, nagu on näidatud joonisel 9-1. Nad moodustavad puistevoo Φ_{1p}, mis on aheldatud vaid primaarmähise keerdudega ja indutseerib neis puisteelektromotoorjõu

$$E_{1p} = 4{,}44 f w_1 \Phi_{1p}. \tag{9-3}$$

Paragrahvi 5-8 põhjal

$$E_{1p} = I_{10} \omega L = I_{10} x_1, \tag{9-4}$$

kus puistevoost tingitud x_1 nimetatakse primaarmähise

puisteinduktiivtakistuseks. Mida suurem on terase küllastatus ja mida halvemini on koostatud magnetahel, seda suurem on puistevoog ja x_1 ning ka pingelang primaarmähisel. Tavaliselt on trafo südamikus magnetvoo tihedus 1,0 ... 1,45, vahel kuni 1,65 teslat. Väiksemaid vootiheduse väärtusi kasutatakse väiksema võimsusega trafodes.

Primaarmähise pingelang tühijooksul $I_{10}\sqrt{r_1^2 + x_1^2}$ on väga väike ning seega Kirchhoffi teise seaduse kohaselt hetkväärtus

$$u_1 = -e_1,$$

s. t. need suurused on võrdsed ja teineteise suhtes 180° võrra nihutatud.

Et

$$u_1 = U_{1m} \sin \omega t,$$

siis

$$e_1 = -U_{1m} \sin \omega t = U_{1m} \sin(\omega t + 180°).$$

Seega on efektiivväärtused võrdsed ja teineteise suhtes 180° nihutatud (vt. joon. 9-7):

$$U_1 = E_1 = 4{,}44 f w_1 \Phi_m.$$

Tühijooksul on sekundaarmähise vool I_2 ja seega ka pingelang võrdsed nulliga. Sellepärast on elektromotoorjõudude ja pingete hetkväärtused võrdsed:

$$u_2 = e_2$$

ja

$$U_2 = E_2 = 4{,}44 f w_2 \Phi_m.$$

Suurema ja väiksema emj. suhet

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{4{,}44 f w_1 \Phi_m}{4{,}44 f w_2 \Phi_m} = \frac{w_1}{w_2} \qquad (9\text{-}5)$$

nimetatakse trafo ülekandeteguriks.

Tühijooksul

$$k = \frac{U_1}{U_2}. \qquad (9\text{-}6)$$

Kui $w_1/w_2 > 1$, töötab trafo pinget madaldavana, kui aga $w_1/w_2 < 1$, siis pinget kõrgendavana.

Tühijooksu vektordiagrammil (joon. 9-7) jäävad mõlemad elektromotoorjõud E_1 ja E_2 magnetvoost Φ_m maha 90°-se nurga võrra. Et primaarmähise pingelangu loetakse võrdseks nulliga, siis $U_2 = E_2$ ning $U_1 = -E_1$.

9-4. Trafo koormus

Kui sulgeda vinnaklüliti v_2 (joon. 9-1 ja 9-6), siis läbib sekundaarmähist ja tarbija takistust z elektromotoorjõust E_2 tingitud vool I_2, mille suurus on määratav Ohmi seadusega:

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(r_2 + r_t)^2 + (x_2 + x_t)^2}},$$

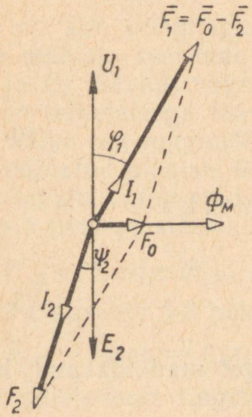
kus r_2 ja r_t on sekundaarmähise ja tarbija aktiivtakistused ning x_2 ja x_t vastavad reaktiivtakistused.

Sekundaarmähise reaktiivtakistus (induktiivtakistus) on tingitud mähise puistevoost Φ_{2p}.

Lenzi seaduse kohaselt on indutseeritud emj. E_2 suund alati selline, et tema tekitatud vool I_2 takistab magnetvoo muutumist trafo magnetahelas. Siit järeldub, et mähiste voolud I_1 ja I_2 kulgevad teineteisele vastassuunas, mis on näidatud ka joonisel 9-1. Magnetvoog Φ_m tekib sel juhul mähiste magneetimisergutuste $F_1 = I_1 w_1$ ja $F_2 = I_2 w_2$ koosmõju tulemusena, s. o.

$$\overline{F}_1 + \overline{F}_2 = \overline{F}_0, \tag{9-7}$$

mis on kujutatud joonisel 9-8.



Joon. 9-8. Magneetimisergutuste vektordiagramm.

Suurus F_0 jääb mistahes trafo koormuse korral konstantseks. Järgnevalt selle põhjustest. Isegi kui $I_1 = I_{1n}$, on pingelang trafo primaarmähisel $I_1\sqrt{r_1^2 + x_1^2}$ vaid (0,02 ... 0,025) U_{1n}. Et $U_1 = U_{1n}$ on konstant, siis $E_1 = 4{,}44fw_1\Phi_m \approx$ $\approx U_{1n} = \text{const}$ ning ka magnetvoog Φ_m ja magneetimisergutus F_0 on konstantsed.

I_2 suurendamisel kasvab F_2 demagneetiv mõju, järelikult peab automaatselt kasvama ka primaarmähise vool ja seda nii, et magneetimisergutus F_1 kasvaks täpselt niisama palju kui magneetimisergutus F_2, s. o.

$$\overline{F}_1 = \overline{F}_{10} + (-\overline{F}_2).$$

Nagu on näha joonisel 9-8 toodud vektordiagrammist, suureneb voolu I_2 suurenemisel ka vool I_1, nurk φ_1 väheneb, trafo võimsustegur aga kasvab $\cos\varphi_0$-lt $\cos\varphi_1$-le.

Kui jätta arvestamata magneetimisergutus F_0, mida me võime teha selle väiksuse tõttu, siis

$$F_1 = F_2 \text{ ehk } I_1w_1 = I_2w_2,$$

millest

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1} = \frac{1}{k}. \tag{9-8}$$

Tarbijat huvitab tavaliselt trafo suhteline pingemuutus

$$\Delta U\% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}}\,100\%, \tag{9-9}$$

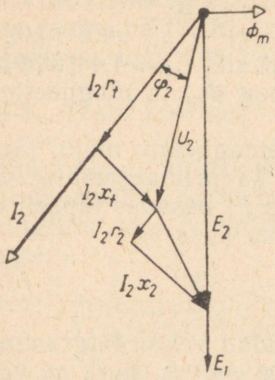
s. o. suhteline pingemuutus sekundaarklemmidel üleminekul tühijooksult nimikoormusele. Siin $U_2 = U_{2n}$, s. o. sekundaarpoole nimipingega.

See suurus sõltub mitte ainult I_2-st, vaid ka $\cos\varphi_2$-st.

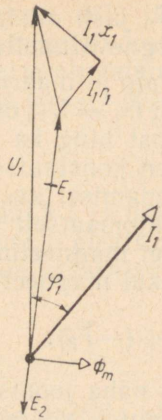
Kaasaegsetes trafodes arvestatakse, et $I_2 = I_{2n}$ ja $\cos\varphi_2 = 1$ korral on $\Delta U\%$ umbes 2 ... 3%.

Vahe $U_{20} - U_2$ suurus sõltub mähiste takistustest.

Trafo pinge U_2 muutumist koormuse mõjul võib vaadelda joonisel 9-9 antud vektordiagrammil, mis on sarnane paragrahvis 5-9 toodule. Tühijooksul on emj. E_2 täpselt võrdne U_2-ga. Koormuse korral tekib pingelang sekundaarmähisel $I_2\sqrt{r_2^2 + x_2^2}$ ja pinge U_2 muutub E_2-st



Joon. 9-9. Trafo sekundaarahela vektordiagramm.



Joon. 9-10. Trafo primaarahela vektordiagramm.

väiksemaks. Pinge ise on arvuliselt võrdne pingelanguga tarbijal $U_2 = I_2\sqrt{r_t^2 + x_t^2}$.

Kuid emj. E_2 ei jää konstantseks, vaid väheneb, sest ka magnetvoog Φ_m väheneb mõnevõrra. Joonisel 9-10 on kujutatud trafo primaarmähise vektordiagramm. Primaarpoolelt vaadelduna kujutab trafo endast tarbijat, milles nagu elektrimootoriski indutseeritakse vastu-emj. E_1. Järelikult koosneb konstantne pinge U_{1n} kahest osast, millest $I_1\sqrt{r_1^2 + x_1^2}$ on võrdne pingelanguga primaarmähises, $-E_1$ aga tasakaalustab elektromotoorjõu E_1. Seega

$$\overline{U}_{1n} = -\overline{E}_1 + \overline{I}_1 z_1. \qquad (9\text{-}10)$$

Voolu I_1 kasvamisel suureneb I_1z_1, vähenevad aga $-E_1$ ja magnetvoog Φ_m ning järelikult ka E_2.

Seega on valemis (9-9) arvestatud pingelangud mõlemas trafo mähises.

9-5. Kolmefaasiline trafo

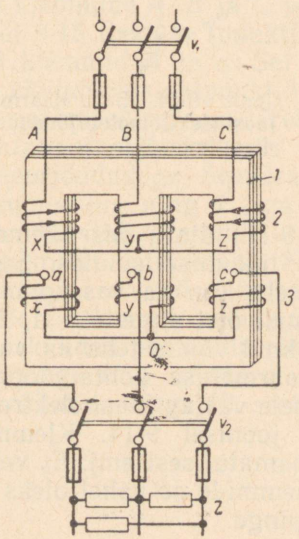
Võimsates trafoalajaamades toimub kolmefaasilise voolu transformeerimine kolme ühefaasilise trafo abil, mis on ühendatud kolmefaasiliseks rühmaks varem paragrahvides 6-2 ja 6-3 vaadeldud reeglite järgi. Jaotusalajaama-

des kasutatakse aga enamasti spetsiaalseid kolmefaasilisi südamiktrafosid, mille eelis kolmefaasiliste rühmadega võrreldes seisneb väiksemas maksumuses.

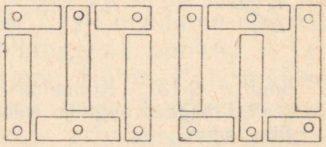
Kolmefaasilise trafo ehitus on näidatud joonisel 9-11. Südamiku terasplekkide paigutus koostamisel on näidatud joonisel 9-12, sammaste ristlõike kujud aga joonisel 9-4.

Igal sambal asuvad ühe faasi mähised. Nad paigutatakse kontsentriliselt, alampingemähis südamikule lähemale. Joonisel 9-11 on mähised tinglikult kujutatud teineteise suhtes piki sammast nihutatutena. Nii primaar- kui sekundaarmähised võivad olla ühendatud tähte (Y) või kolmnurka (△). Riiklik standard näeb ette vaid kolm ühendusskeemi: täht-täht nulljuhtmega (Y/Y_0), täht-kolmnurk ($Y/\triangle$) ja täht nulljuhtmega — kolmnurk ($Y_0/\triangle$). Tähise lugeja näitab ülempingemähiste, nimetaja aga alampingemähiste ühendusviisi.

Primaar- ja sekundaarmähiste ühendamisel tähte või kolmnurka tuleb kolmefaasiliste trafode puhul silmas pidada, et mähised on magnetiliselt ühendatud (joon. 9-11): magnetvoog Φ_A sulgub läbi sammaste *B* ja *C*, Φ_B läbi sammaste *A* ja *C* ning Φ_C läbi sammaste *A* ja *B*. Magneetimisvoolud mähistes, näiteks *AX*-s, *BY*-s ja *CZ*-s, on



Joon. 9-11. Kolmefaasiline trafo. *1* — magnetjuhe; *2* — ülempingemähis; *3* — alampingemähis.

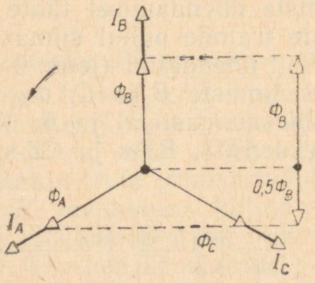


Joon. 9-12. Terasplekkide paigutus kolmefaasilise trafo magnetjuhtmes.

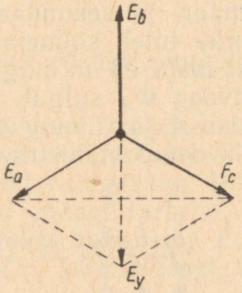
alati teineteise suhtes teatud faasinurga võrra nihutatud, nagu on näidatud joonisel 9-13. Vooludega faasis olevad sammaste magnetvood Φ_A, Φ_B ja Φ_C annavad ilmselt igal hetkel summa

$$\overline{\Phi}_A + \overline{\Phi}_B + \overline{\Phi}_C = 0. \qquad (9\text{-}11)$$

Hetkel, mis vastab joonisel 9-13 kujutatud vektordiagrammile, $\overline{\Phi}_A + \overline{\Phi}_B + \overline{\Phi}_C = -0{,}5\Phi_B + \Phi_B - 0{,}5\,\Phi_B = 0$. See tingimus on täidetud ainult siis, kui tähte on ühendatud näiteks kas mähiste lõpud *X, Y, Z* või algused *A, B, C*. Tingimus (9-11) pole täidetud, kui näiteks ühendada omavahel klemmid *X, B* ja *Z*. Siit tekibki vajadus kolmnurk- või tähtühenduse korral määrata kindlaks mähiste algused ja lõpud. See pole vajalik omavahel magnetiliselt sidestamata mähiste puhul.



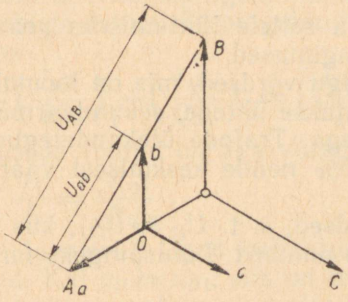
Joon. 9-13. Kolmefaasilise trafo magnetvoogude vektordiagramm.



Joon. 9-14. Sekundaarmähise faasi-elektromotoorjõudude diagramm.

Kui vaadata trafole (joon. 9-11) ülalt, siis näeme, et mähised on keritud kellaosuti liikumise suunas. Sellist mähist nimetatakse parempoolseks (on ka vasakpoolseid mähiseid). Loeme mähiste ülemisi otsi algusteks *A, B, C* ja alumisi lõppudeks *X, Y, Z*, kuid võime teha ka vastupidi. Sama kehtib ka sekundaarmähise kohta. Joonisel 9-11 kujutatud mähiste ühendusele vastav faasi-elektromotoorjõudude täht on näidatud joonisel 9-14. Klemmide *x, b, z* kokkuühendamine on lubamatu, sest emj. E_b vektor pöörduks sel juhul 180° ning klemmide *ac* vahel oleks siis liini-, *ay* ja *cy* vahel aga faasipinge.

Trafo sildil seisab mähiste ühendusskeemi tähise järel number: Y/Y$_0$-12, Y/Δ-11, Y$_0$/Δ-11. See number tähistab tinglikult nn. trafo ühendusrühma. Rühma number näitab alampingemähise liini-emj. nihkenurka ülempingemähise liini-emj. suhtes kellaosuti liikumise suunas. Ühikuks on võetud 30°. Seega on rühma 12 korral faasinihe 360°, rühma 11 korral aga 330°. Ühendusrühma on tingimata vaja teada trafode rööplülituse õigeks koostamiseks.



Joon. 9-15. Potentsiaalidiagramm ühendusrühma määramiseks.

Määrame joonisel 9-11 kujutatud trafo ühendusrühma. Kui avatud vinnaklüliti v_2 korral sulgeda vinnaklüliti v_1, siis klemmide *A*, *B* ja *C* potentsiaalidiagramm vastab joonisel 9-15 toodule (punktid *A*, *B*, *C*). Ühendame elektriliselt klemmid *A* ja *a*. Sel juhul langevad punktid *A* ja *a* kui ekvipotentsiaalpunktid diagrammil ühte. Kõik mähised on parempoolsed ja järelikult on sekundaarpoole faasielektromotoorjõud faasis vastavate primaarpoole elektromotoorjõududega. Seepärast kujutamegi vektorit E_a punkti *a* suunatuna ning E_A-ga faasis olevana ja leiame nii potentsiaalidiagrammil sekundaarmähise nullpunkti (punkti *O*) potentsiaali. Konstrueerinud vektoritega U_B ja U_C faasis olevad vektorid U_b ja U_c, saame sekundaarpoole elektromotoorjõudude tähe. Diagrammilt võib näha, et sekundaarpoole liinipinge U_{ab} nihkenurk primaarpoole liinipinge U_{AB} suhtes on võrdne nulliga või 360°. Ühendusrühm on seega 12, sest 360 : 30 = 12.

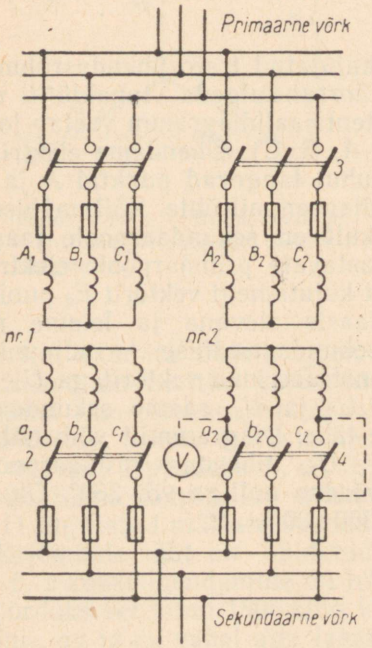
9-6. Trafode rööptalitlus

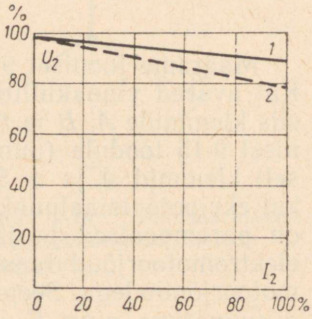
Trafode rööptalitlust tuleb rakendada tarbijate elektrienergiaga pideva varustamise tagamiseks, samuti selleks, et trafosid oleks võimalik remontida. Rööplülituseks nimetatakse lülitust, kus trafode primaarmähiste ühenimelised otsad ühendatakse ühiste toitelattidega, sekundaarmähiste vastavad otsad aga ühiste jaotuslattidega, kust energia suunatakse tarbijatesse. Kahe trafo lülitusskeem on toodud joonisel 9-16.

Trafode rööptalitluseks ja sellele lülitamiseks peavad olema täidetud järgmised tingimused.

1. Trafode nimipinged olgu võrdsed, mis on loomulik, sest primaarmähised ühendatakse ühtede, sekundaarmähised aga teiste ühiste lattidega. Trafode ülekandetegurite erinevus ei tohi olla üle 0,5% nende keskmisest väärtusest.

2. Lühispinged olgu võrdsed, s. t. $U_{II} = U_{III}$, kus indeksid I ja II näitavad trafo numbrit. Lühispingeks nime-





Joon. 9-17. Koormuse jaotus rööbiti töötavate trafode vahel.

◀ Joon. 9-16. Trafode lülitamine rööptalitlusse.

tatakse sellist pinget U_l, mille rakendamisel ühele trafo mähisele, kui teine on lühistatud, tekivad mähistes nimivoolud. See pinge moodustab tavaliselt (0,05 ... 0,1) U_{1n}-st. Lühispinge U_l lubatav kõrvalekalle lülitatavate trafode keskmisest lühispingest on $\pm$ 10%.

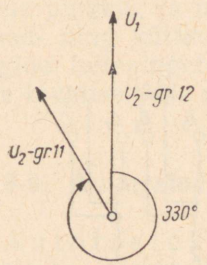
Viimane nõue on tingitud sellest, et rööbiti lülitatavad trafod peavad koormuse omavahel jaotama võrdeliselt nende nimivõimsusega. Trafode elektromotoorjõude siin muuta ei saa, nagu seda tehakse näiteks alalisvoolugeneraatoreis. Lühispingete võrdsuse korral ($U_{II} = U_{III}$) on mähiste suhtelised pingelangud kõigil koormustel võrdsed, s. o.

$$\left(\frac{I_1 z_1}{U_{1n}}\right)_I + \left(\frac{I_2 z_2}{U_{2n}}\right)_I = \left(\frac{I_1 z_1}{U_{1n}}\right)_{II} + \left(\frac{I_2 z_2}{U_{2n}}\right)_{II};$$

trafode voolud on aga võrdelised nimivõimsustega:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{P_{nI}}{P_{nII}}. \qquad (9\text{-}12)$$

Joonisel 9-17 on kujutatud kahe trafo väliskarakteristikud. Kui $u_{II} = u_{III}$, siis on trafode võrdsete nimivõimsuste korral ka nende voolud alati võrdsed, sest väliskarakteristikud langevad ühte (kõver *1*). Kui $u_{III} > u_{II}$, siis kulgeb teise trafo väliskarakteristik madalamalt (kõver *2*) ja esimene trafo koormatakse üle, teine aga töötab alakoormusel ($I_I > I_{II}$).



Joon. 9-18. Sekundaarpingete vektordiagramm erinevate ühendusrühmade korral.

3. Trafode ühendusrühmad peavad olema ühesugused. Kui ühe trafo rühm on 12, teisel aga 11, siis on nende rööptalitlus võimatu, sest kui nende primaarpinged U_1 on omavahel faasis (joon. 9-18), ei ole seda sekundaarpinged U_2.

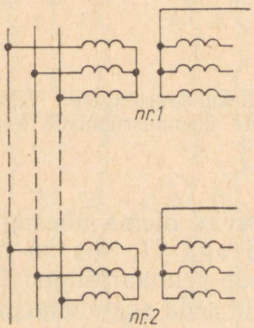
Rööptalitlusele lülitamine toimub järgmiselt (joon. 9-16). Suletakse trafo nr. *1* vinnaklülitid *1* ja *2*. Trafo nr.

2 vinnaklüliti *4* alumiste klemmide potentsiaalid on sel juhul trafo nr. *1* sekundaarmähise pingetega U_{a1}, U_{b1}, U_{c1} juba määratud. Trafo nr. *2* vinnaklüliti *3* sulgemisel on vinnaklüliti *4* ülemiste klemmide potentsiaalid määratud pingetega U_{a2}, U_{b2}, U_{c2}. Lülitamine võib toimuda, kui vinnaklüliti punktide a_1-a_2, b_1-b_2 ja c_1-c_2 potentsiaalide vahed on võrdsed nulliga. Seda kontrollitakse voltmeetriga, sillates ühed vinnaklüliti klemmid (näiteks c_1 ja c_2). Kui voltmeetri lülitamisel klemmidele a_1-a_2 ja b_1-b_2 potentsiaalide vahed ei osutu võrdseks nulliga, siis on teise trafo töösse lülitamine lubamatu, sest trafod kas kuuluvad erinevatesse ühendusrühmadesse või on nende klemmid ühendatud valede lattidega.

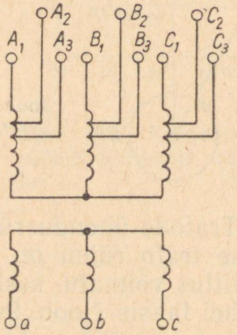
Alajaamade trafode rööptalitlusele lülitamine on väga vastutusrikas operatsioon ja viiakse läbi erieeskirjade kohaselt.

9-7. Trafo pinge reguleerimine

Joonisel 9-19 on kujutatud kaks trafot, millest üks (nr. *1*) on lülitatud toitevõrgu algusesse ja teine (nr. *2*) lõppu. Pingelangu tõttu liinis võib trafo nr. *2* primaarpinge osutuda väiksemaks nimipingest, järelikult on ka ta sekundaarpinge madalam. Sel juhul tekib tavaliselt vajadus reguleerida trafo nr. *2* primaarpinget $\pm 5\%$ ulatuses U_n-st.



Joon. 9-19. Trafode võrku lülitamine.



Joon. 9-20. Trafo mähise väljavõtete paigutus.

Selleks tehakse ülempingemähisel mõned väljavõtted ehk haruühendused, nagu on näidatud joonisel 9-20. Väljavõtted A_2, B_2 ja C_2 vastavad primaarmähise nimipingele. Kui primaarpinge on madalam, lülitatakse trafo toitevõrku klemmidega A_3, B_3 ja C_3. Sel juhul trafo ülekandetegur väheneb, sekundaarpinge aga kasvab.

Ümberlülitamine toimub spetsiaalse ümberlüliti abil, mis on ehitatud trafo õlipaaki ja mille käepide on toodud välja. Ümberlülitamise ajaks tuleb trafo sekundaarsest võrgust lahutada. Pinge reguleerimiseks koormuse all kasutatakse eriseadmeid.

9-8. Mitme mähisega trafod

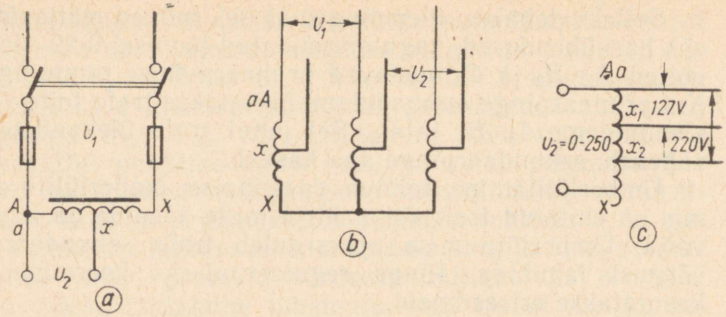
Mitme mähisega trafo magnetjuhtmel asetseb kolm või enam mähist. Elektrialajaamades tekib sageli vajadus transformeerida pinget 10,5 kV 121- ja 38,5-kilovoldiseks pingeks. Sel juhul kasutatakse vastavate nimipingetega kolme mähisega trafot. Loomulikult on selline trafo otstarbekam kui kaks eraldi trafot pingetele 10,5/121 kV ja 10,5/38,5 kV. Kolmemähiselisi trafosid ehitatakse võimsusega 5 600 kuni 60 000 kVA.

Elutarbelistes seadmetes (raadiovastuvõtjad, televiisorid, magnetofonid jms.) kasutatavatel trafodel on üks primaarmähis, mida saab lülitada nii 127- kui ka 220-voldisele pingele, ja mitu sekundaarmähist, mis on mõeldud anood- ning küttevooluringide ja signaalseadmete vooluringide toitepingete saamiseks. Selliste trafode võimsus pole tavaliselt üle mõnesaja vati.

9-9. Autotrafod

Autotrafoks nimetatakse trafot, mille alampingemähiseks on osa ülempingemähisest (joon. 9-21). See osa valmistatakse väiksema ristlõikega juhtmest või, kui voolude I_1 ja I_2 erinevus on suur, siis ülejäänud osaga samast juhtmest. Kui ülekandetegur on lähedane ühele, siis on autotrafo otstarbekam kui kahe mähisega trafo.

Autotrafo ehitus põhineb järgneval. Mähisele AX rakendatud primaarpinge $U_1 = U_{AX}$ jaotub ühtlaselt kõigile mähise w_1 keerdudele. Seega pinge ühe keeru kohta on



Joon. 9-21. Autotrafod.
a — ühefaasiline; *b* — kolmefaasiline; *c* — reguleertrafo.

$U_1 : w_1$. Sekundaarpinge $U_2 = U_{ax}$ saame ühe keeru pinge korrutamisel mähise ax keerdude arvuga w_2, s. t.

$$U_2 = \frac{U_1 w_2}{w_1}.$$

Autotrafo on sel juhul pinget madaldav. Kui aga rakendada nimipinge mähisele ax, siis saame klemmidel AX sekundaarpinge $U_2 > U_1$ ja autotrafo on pinget kõrgendav.

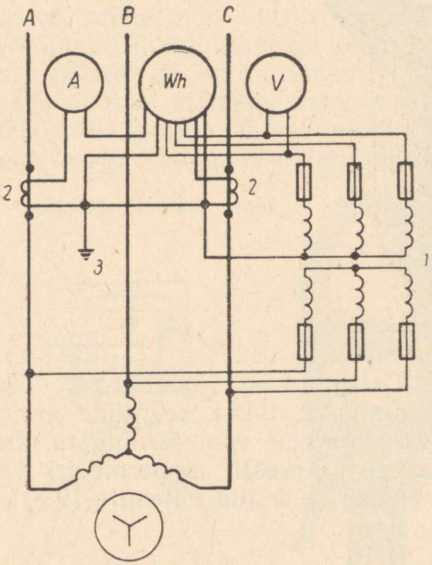
Autotrafosid kasutatakse valgustugevuse reguleerimiseks teatrites, vahelduvvoolumootorite käivitamiseks, elavhõbealaldite toiteks, majapidamises ning laboratoorses praktikas.

Autotrafosid, mis lubavad pinget reguleerida sujuvalt ja laiades piirides, nimetatakse r e g u l e e r t r a f o d e k s. Reguleertrafo lülitusskeem on toodud joonisel 9-21, *c*. Teda võib lülitada nii 127- kui ka 220-voldise toitepingega võrku. Klemm *x* kujutab endast kontaktrulli, mis veereb mööda mähise keerdude isolatsioonita külgi ja võimaldab saada sekundaarpinget nullist kuni 1,1 U_1-ni intervallidega alla ühe voldi. Elutarbelistes seadmetes kasutatakse autotrafosid üleminekuks 127-voldiselt pingelt 220-voldisele pingele ja raadioaparatuuri toitepinge reguleerimiseks.

Autotrafode üldiseks puuduseks on mähiste elektriline ühendus. Kõrge pinge korral valitakse $k < 2 \ldots 2{,}5$, sest sekundaarvooluringi isolatsioon maa suhtes peab olema samasugune kui primaarvooluringil.

9-10. Mõõtetrafod

Spetsiaalseid mõõtetrafosid kasutatakse selleks, et tagada kõrgepingeliinide mõõteriistade ohutut teenindamist, ning samuti seal, kus on vaja laiendada mõõteriistade mõõtepiirkondi.



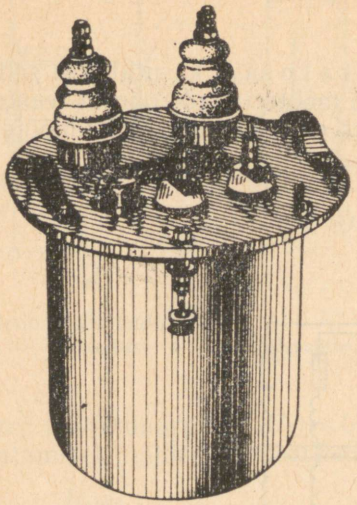
Joon. 9-22. Mõõtetrafode ja mõõteriistade skeemi ühendamine.

Joonisel 9-22 on toodud elektrimõõteriistade lülitusskeem, kus kasutatakse mõõtetrafosid. Kõik vattmeetrite, arvestite, voltmeetrite jne. pingeahelad ühendatakse pingetrafo *1* sekundaarmähisega. Trafo primaarmähis on ühendatud toitevõrguga. Pingetrafo töötab samuti nagu varem vaadeldud jõutrafo. Tema sekundaarmähis on arvestatud 100-voldisele pingele. Kui me ei koorma trafot üle ta nimivõimsuse, siis tema ülekandetegur $k_U = U_1 : U_2 = w_1 : w_2$ jääb konstantseks. Sel juhul primaarpinge

$$U_1 = k_U U_2. \qquad (9\text{-}13)$$

Pingetrafo väliskuju on näidatud joonisel 9-23.

Voolutrafo primaarmähis (*1*, joon. 9-24) lülitatakse liini jadamisi tarbijaga nagu ampermeetergi ja tema keerdude arv on väike, vahel üks (kaks) keerd, mis võib

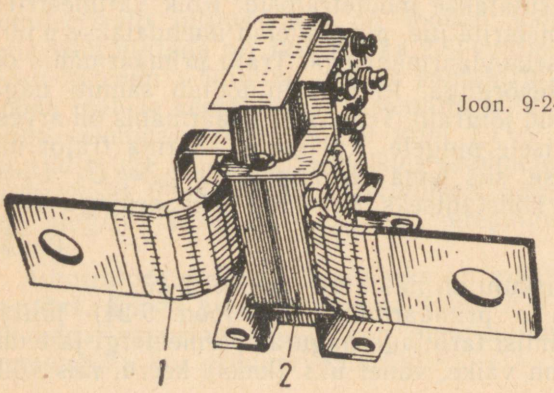


Joon. 9-23. Pingetrafo.

olla moodustatud osast lattjuhtmest (joon. 9-24). Tema sekundaarmähise (*2*, joon. 9-22, 9-24) keerdude arv on suur. Ta on arvestatud 5-amprisele voolule ning ta ühendatakse jadamisi vattmeetri, arvesti, ampermeetri vms. voolumähisega. Vastavalt varem leitud valemile (9-8):

$$k_I = \frac{I_1}{I_2} \approx \frac{w_2}{w_1}.$$

Kui ühendusjuhtmete ja koormuseks lülitatavate mõõte-



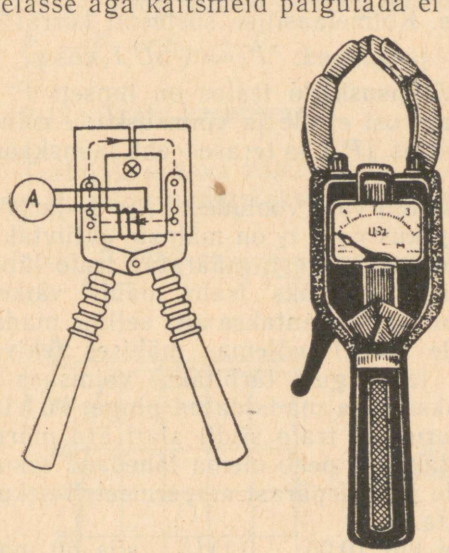
Joon. 9-24. Voolutrafo.

riistade takistus pole suurem trafole lubatavast, siis $k =$ $=$ const. Sel juhul

$$I_1 = kI_2. \qquad (9\text{-}14)$$

Mõõteriistadel, mis on mõeldud töötamiseks koos mõõtetrafodega, on see ära märgitud nende sildil või kerel; skaalal on antud ka primaarahela voolu, pinge, võimsuse või mõne muu suuruse väärtused.

Mõõtetrafode lülitamisel kõrgepingevõrku nende sekundaarmähised ja kere maandatakse (*3*, joon. 9-22), et tagada ohutust mähiste isolatsiooni vigastuse korral. Pingetrafot kaitstakse lühise eest kaitsmetega. Voolutrafo ahelasse aga kaitsmeid paigutada ei tohi ja seda järgmis-



Joon. 9-25. Mõõtetangid.

tel põhjustel. Trafo magneetimisergutus on väga väike (joon. 9-8), primaarmähise magneetimisergutus F_1 jääb aga konstantse primaarahela voolu korral konstantseks ja ei sõltu sekundaarmähise magneetimisergutusest F_2. Kui nüüd sekundaarahela takistus kasvab ja vool I_2 väheneb, siis F_2 väheneb, F_0 aga kasvab. Sekundaarahela katkestamisel saab F_2 võrdseks nulliga, F_0 aga kasvab suuruseni F_1. Trafo magnetvoog ja seega ka sekundaarmähise emj. E_2 kasvavad lubamatult suureks, mis põhjustab trafo südamiku ülekuumenemise ja võib põhjustada mähiste iso-

latsiooni läbilöögi ning on sel juhul ohtlik teenindavale personalile.

Joonisel 9-25 on näidatud mõõtetangid. Need kujutavad endast lahtikäiva südamikuga voolutrafot koos ampermeetriga, mis on ühendatud trafo sekundaarmähisega. Primaarmähiseks on juhe, mille voolu mõõdetakse.

9-11. Trafo energiakaod ja nende määramine

Trafosse antavat võimsust $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$ nimetatakse primaarvõimsuseks. Tarbijasse annab trafo võimsuse $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2$, mida nimetatakse sekundaarvõimsuseks. Kolmefaasilise süsteemi korral on vastavad võimsused järgmised: $P_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi_1$ ja $P_2 = \sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2$. Võimsuskadu trafos on ilmselt $P_1 - P_2$. Trafos pöörlevaid osi ei ole ja võimsuskadu esineb vaid vaseskaona mähistes (P_v) ja terases- ehk rauaskaona magnetjuhtmes (P_r).

Vaseskao suurus sõltub vaid vooludest I_1 ja I_2 järgmiselt: $P_v = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2$, kus r_1 ja r_2 on mähiste aktiivtakistused. See võimsuskadu on kergesti määratav trafo lühiskatsega. Selleks lühistatakse üks trafo mähis väikese takistusega juhtme abil, teisele antakse aga selline madaldatud pinge U_l, mille korral mõlemas mähises tekivad nimivoolud (I_{1n}, I_{2n}) ja võrgust tarbitakse võimsust P_l. Nagu teada, nimetatakse seda madaldatud pinget lühispingeks. Tema suurus on trafo sildil alati ära märgitud. Sekundaarahela takistus peab olema lähedane sekundaarmähise takistusele ja sellepärast ampermeetrit sekundaarahelasse ei lülitata.

Et U_l pole suurem kui $(0{,}05 \ldots 0{,}1) U_{1n}$, siis on magnetvoo tihedus ja seega ka rauaskadu lühisel P_{rl} väga väike ja seda ei arvestata. Sel juhul võimsuskadu

$$P_l = P_{vn} + P_{rl} \approx P_{vn}, \qquad (9\text{-}15)$$

kus P_{vn} on vaseskadu nimivoolude korral.

Rauaskadu on määratav tühijooksukatsega. Konstantse sageduse puhul sõltub ta vaid maksimaalsest magnetvoo tihedusest terases. Kui primaarpinge on konstantne, siis ka $B_m = \text{const}$ ja rauaskaod on ühesugused nii tühijooksul kui ka koormusel. Trafo lülitatakse nimipingele U_{1n}, kusjuures sekundaarahel on katkestatud (voltmeeter eemal-

datakse). Primaarmähise vool I_0 on väga väike ning $I_2 = 0$. Seepärast võib katsel vaseskadu P_{v0} mitte arvestada. Siis

$$P_0 = P_r + P_{v0} \approx P_r. \tag{9-16}$$

Elektrimõõteriistade lülitusskeem on näidatud joonisel 9-6. Tühijooksukatsel tuleb ampermeetrit ja vattmeetri voolumähist sildav vinnaklüliti v_3 sulgeda varem kui vinnaklüliti v_1, sest vastasel juhul võib tekkida vooluhüpe suurusega $(6 \ldots 8)I_n$. Pärast lüliti v_1 sulgemist v_3 avatakse.

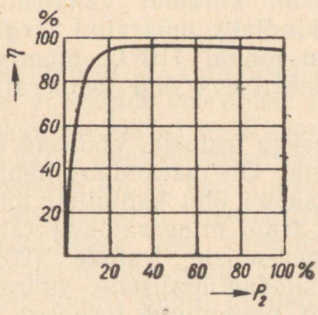
Eespool toodud katsete abil määratakse nimivooludel I_{1n} ja I_{2n} ning nimipingel U_{1n} töötava trafo kaod:

$$P_1 - P_2 = P_{vn} + P_r. \tag{9-17}$$

9-12. Trafo kasutegur

Tarbijale antava võimsuse P_2 ja võrgust saadava võimsuse P_1 suhet nimetatakse kasuteguriks η. Trafol

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\% = \frac{P_2}{P_2 + P_r + P_v} 100\%. \tag{9-18}$$



Joon. 9-26. Trafo kasuteguri sõltuvus sekundaarvõimsusest.

Rauaskadu on konstantne, vaseskadu on aga võrdeline voolu ruuduga või siis sekundaarvõimsuse S_2 ruuduga. Olgu $S_2 : S_{2n} = \beta$ koormustegur. Siis, teades P_r ja P_{vn}, võime leida trafo kasuteguri mistahes koormusel:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\beta S_{2n} \cos \varphi_2}{\beta S_{2n} \cos \varphi_2 + P_r + \beta^2 P_{vn}}. \tag{9-19}$$

Sellele valemile vastav kasuteguri ja sekundaarvõimsuse vaheline sõltuvus on kujutatud joonisel 9-26.

Nagu näitasime varem (§ 9-1), on trafo kasutegur väga kõrge. Ta on suurim sellisel koormusel, mille puhul vaseskadu saab võrdseks rauaskaoga. Majanduslikel kaalutlustel arvutatakse see koormus nii, et ta oleks alati väiksem nimikoormusest. Seda on kerge määrata, kui võtta kataloogist trafo võimsused $P_0 = P_r$, ja $P_l = P_{vn}$. Siis

$$P_0 = \beta^2 P_l \quad \text{ehk} \quad \beta = \sqrt{\frac{P_0}{P_l}}. \qquad (9\text{-}20)$$

Näide 9-1. Trafo, mille võimsus $S_n = 560$ kVA ja pinged on 35 ja 10,5 kV, tühijooksukadu nimipingel on 3350 W ja lühiskadu nimivoolude korral on 9400 W. Leida koormustegur, mille puhul kasutegur oleks maksimaalne.

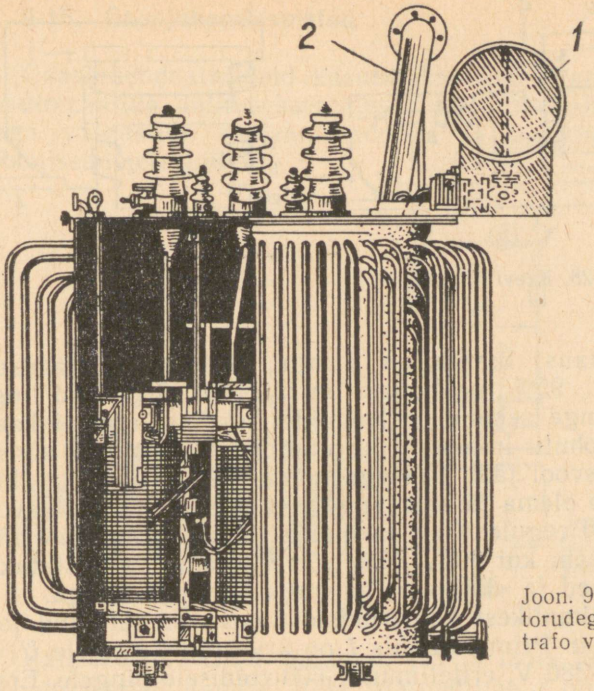
$$\beta = \sqrt{\frac{3350}{9400}} = 0{,}579.$$

9-13. Trafo kuumenemine ja jahutamine

Töötamisel trafo vases ja terases eralduv soojus tuleb juhtida ümbritsevasse keskkonda, sest kaasnev temperatuuri tõus põhjustab isolatsiooni kiiremat vananemist. Lubatavad temperatuurid on kindlaks määratud järgmiselt: mähisel 105° C, südamiku pinnal 110° C, ülemistes õlikihtides 95° C, kusjuures ümbritseva õhu temperatuuriks on loetud siin 35° C.

On nii õhk- kui ka õlijahutusega trafosid. Võimsad trafod on eranditult õlijahutusega. Õli parandab mähiste jahutamist ning kaitseb isolatsiooni õhu kahjuliku toime eest. Seepärast paigutataksegi trafo mineraalõliga täidetud teraspaaki. Väiksemavõimsuseliste trafode (20 ... 30 kVA) paak valmistatakse siledapinnalisena, suurema võimsusega trafode paagid on varustatud torudega, et suurendada sel teel jahutuspinda (joon. 9-27). Mähiste otsad on toodud välja läbiviikisolaatorite kaudu, mis on kinnitatud paagi kaanele. Väga suure võimsusega trafode puhul kasutatakse ka radiaatoriga varustatud paake.

Kui võimsus on üle 100 kVA, aga ka väiksema võimsuse korral, kui pinge on üle 6300 V, varustatakse paak õlipaisunõuga (*1*, joon. 9-27). See reservuaar on toru abil paagiga ühendatud. Trafo kuumenemisel õlinivoo paisu-

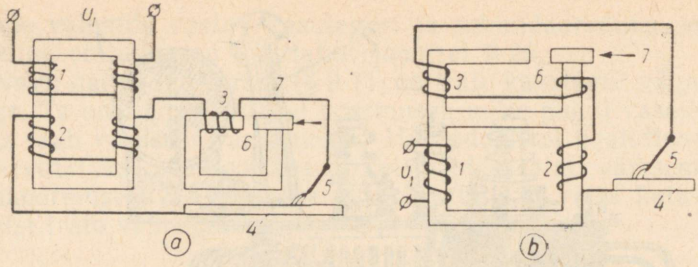


Joon. 9-27. Jahutustorudega paagiga trafo väliskuju.

nõus tõuseb ja jahtumisel langeb. Nõu mahutavus on selline, et kõikide koormuste ja ümbritseva õhu temperatuuri kõikumise korral —35° kuni +35° C on selles alati õli. Õli taset kontrollitakse õliseisunäituri abil. Õli paisunõu vähendab õli ja õhu kokkupuutepinda, vähendades seega õli niiskumist ja saastumist. Trafod, mille $S_n \geqslant 1000$ kVA, varustatakse veel väljalöögitoruga *2*. See on paagiga ühendatud terastoru, mille ülaosas on klaasmembraan. Trafo avarii puhul purustavad õli aurustumisel tekkivad gaasid membraani ja väljuvad paaki kahjustamata.

9-14. Keevitustrafod

Keevitustrafod kujutavad endast spetsiaalseid aparaate ja neid kasutatakse mitte ainult keevitamiseks, vaid ka elektrikaarega metallide lõikamiseks ja pealesulatamiseks. Nad töötavad vaheajalises režiimis, kus tsükli (keevita-



Joon. 9-28. Keevitustrafo.

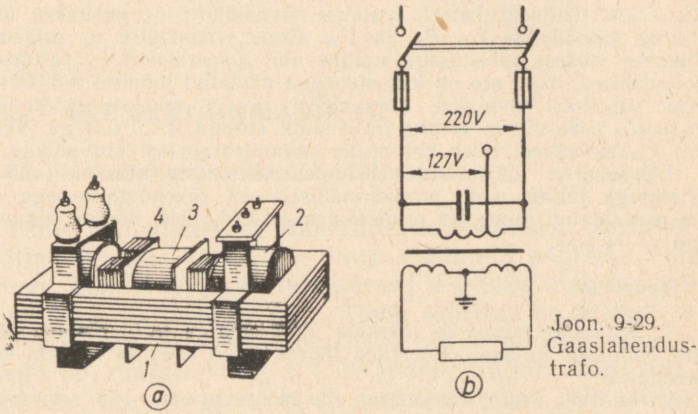
mine + paus) kestus on 5 min., millest keevitamisele kulub 60 ... 95%. Sealjuures on täidetud järgmised tingimused: pinge sekundaarklemmidel tekitab kergesti kaarleegi, on ohutu inimesele ja muutub koormamisel nõnda, et keevitusvool jääb peaaegu konstantseks (väliskarakteristik peab olema järsult langev, vt. § 8-21). Keevitusvool on kergesti reguleeritav, kusjuures lühisvool ei ületa töövoolu rohkem kui 20 ... 40% võrra. Trafod valmistatakse ühefaasilised ja «kuivad», loomuliku õhkjahutusega.

Üks võimalikest konstruktsioonidest on näidatud joonisel 9-28, *a*. Primaarmähis *1* on arvestatud pingele $U_1 =$ = 220 või 380 V, eritellimusel 500-voldisele pingele. Eraldiasetseva reaktiivpooliga *3* jadamisi ühendatud sekundaarmähise *2* tühijooksupinge $U_{20} = 70$ V ning pinge koormusel $U_2 = 30$ V. Keevitatava toote *4* ja elektroodi *5* vahel kulgevat keevitusvoolu reguleeritakse pooli *3* õhupilu *6* muutmisega. Ühendatud südamikega konstruktsiooni korral (joon. 9-28, *b*) on reaktiivpool *3* ja sekundaarmähis *2* ühisel magnetjuhtmel ja magnetiliselt ühendatud. Magnetjuhtme liikuvat osa *7* nihutatakse mõlema konstruktsiooni korral vända abil.

Kasutamise otstarbe järgi liigitatakse trafod järgmiselt: trafod käsitsi keevitamiseks, trafod automaatkeevitamiseks räbustikihi all, trafod elekter-räbukeevitamiseks ning trafod keevitamiseks kaitsegaasis. Voolu järgi jaotatakse nad järgmiselt: trafod vooludele 100 ... 150 A, vooludele 350 ... 380 A ja vooludele 2000 ... 2500 A. Trafode kasutegur on 83 ... 90% ja $\cos\varphi = 0{,}52 \ldots 0{,}62$.

9-15. Gaaslahendustrafod

Gaaslahendustrafosid kasutatakse katelseadmete süüteautomaatika lülitusskeemides ning huumlahendustorudega valgustite, reklaamseadmete ja valgussignalisatsiooniseadmete toiteks.



Joon. 9-29. Gaaslahendustrafo.

Kaitsekatteta trafo väliskuju (*a*) ja tema lülitusskeem (*b*) on toodud joonisel 9-29. Magnetjuhe *1* on teraslekkidest ja täisnurkse ristlõikega; ülempingemähis *2* on aluseta, koosneb kahest poolist ja on ühendatud magnetjuhtme külge maandamise eesmärgil. Ülempingemähise pinge on trafo tühijooksul 10 kV, koormusel aga 6 kV. Alampingemähis (primaarmähis) *3* on keritud alusele ja koosneb kahest osast pingetele 127 ja 220 V. Trafol on järsult langev väliskarakteristik ja ta töötab lühisele lähedases režiimis. Lühisvoolu piiramine toimub magnetiliste šuntide *4* abil, mis suurendavad trafo puistevoogu. Šundid kujutavad endast nelja teraslehtede pakki, mis on paigutatud magnetjuhtmes olevatesse akendesse. Kondensaator *5* on vajalik võimsusteguri suurendamiseks.

9-16. Laboratoorne töö. Ühefaasiline trafo

Enne tööle asumist tutvuda paragrahvide 9-3, 9-4, 9-11 ja 9-12 sisuga.

Töö kirjeldus

Trafo töösse lülitamine toimub joonisel 9-6 toodud skeemi kohaselt. Trafo tühijooksukatsel avatakse vinnaklüliti v_2, suletakse lüliti v_1 ning mõõdetakse I_{10}, P_{10} ja U_{20}. Enne vinnaklüliti v_1 sulgemist sillatakse väikese takistusega juhtme abil ampermeetri ja vattmeetri voolumähised, nagu see on kriipsjoonega näidatud joonisel 9-6. Pärast ahela sulgemist avatakse vinnaklüliti v_3 ja tehakse mõõtmised. Pinge U_{10} peab olema võrdne trafo sildil antuga, s. o. U_{1n}-ga. Võimsuse P_{10} mõõtmisel tuleb voltmeeter sekundaarahelast kõrvaldada.

Lühisekatsel lühistatakse sekundaarmähise *ax* klemmid väikese takistusega juhtme abil, primaarmähisele *AX* rakendatakse aga selline madaldatud pinge, et primaarmähise vool oleks võrdne nimivooluga ($I_1 = I_{1n}$).

Tööplaan

1. Tutvuda trafoga ja märkida üles tema ja mõõteriistade põhilised tehnilised andmed. Koostada lülitus (joon. 9-6) ja näidata seda juhendajale.
2. Lülitada trafo tühijooksule ja mõõta primaar- ja sekundaarpinge: U_{10} ja U_{20}. Mõõta tühijooksu võimsus P_0 ja tühijooksuvool I_{10}. Arvutada trafo ülekandetegur, rauaskadu ja suhe $\frac{I_{10}}{I_{1n}} 100\%$.
3. Teostada lühiskatse ja mõõta lühispinge U_{1l}, lühisvõimsus P_l ja primaarmähise vool $I_1 = I_{1n}$.
4. Arvutada $U_l = U_{1l}/U_{1n}$ trafo kasutegur nimivoolu $I_1 = I_{1n}$ korral, kui a) $\cos\varphi_2 = 1$; b) $\cos\varphi_2 = 0{,}8$.

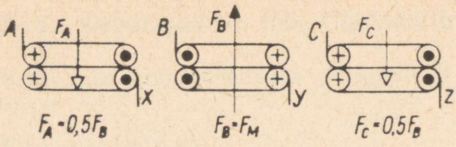
10. ASÜNKROONMASINAD

10-1. Asünkroonmootori otstarve

Tänu kolmefaasilise vahelduvvoolusüsteemi tarvitusele võtmisele, mis võimaldas luua seadmeid pöörleva magnetvoo saamiseks, loodi tänapäeval levinuim elektrimootor — asünkroonmootor. Tema nimetus on tulnud sellest, et masina pöörlev osa, rootor, ei pöörle sama kiirusega kui magnetvoog, s. t. ei pöörle magnetvooga sünkroonselt. See mootor, mida valmistatakse võimsusega murdosast vatist tuhandete kilovattideni ja pingetele 127, 220, 380, 500, 600, 3000, 6000 ning 10000 V, on lihtsa konstruktsiooniga, töökindel ning teiste elektrimootoritega võrreldes odav. Teda kasutatakse igasugustel töödel, kus pole vaja hoida konstantset pöörlemiskiirust; ühefaasilisi väikesevõimsuselisi mootoreid kasutatakse ka majapidamisseadmetes. 1889. aastal M. O. Dolivo-Dobrovolski poolt leiutatud kolmefaasilises asünkroonmootoris on ära kasutatud tema avastatud kolmefaasiline pöörlev magnetväli. Ta leiutas ka esimese kolmefaasilise generaatori, kolmefaasilise trafo ning teostas esimesena maailmas elektrienergia ülekannet kolmefaasilise liini abil. Sellise energia muundamise süsteemi lahutamatuteks osadeks olid eespool nimetatud generaator, mootor ja transformaator.

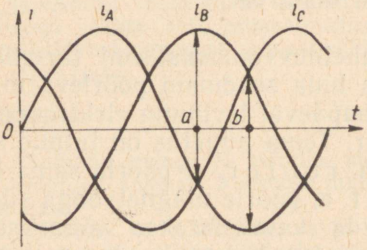
10-2. Pöörleva magnetvoo saamine

Kolmefaasiliste trafode vaatlemisel selgus, et kolme samba pulseerivate (vahelduvate) magnetvoogude hetkväärtuste summa on alati võrdne nulliga (§ 9-5). Selle põhjuseks on asjaolu, et kolme mähise *AX*, *BY* ja *CZ* tel-



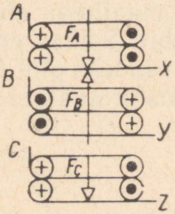
Joon. 10-1. Kolmefaasilise trafo magnetvoogude hetkväärtuste liitmine.

jed on rööpsed, nagu on näidatud joonisel 10-1. Joonisele kantud voolude suunad vastavad kolmefaasilise voolu diagrammil (joon. 10-2) hetkele *a*. Samasuguse olukorra saame ka siis, kui mähised on paigutatud ühisele telgjoonele (joon. 10-3).



Joon. 10-2. Kolmefaasilise voolu kõverad.

Olukord muutub aga oluliselt, kui mähised, nagu nende teljedki, paigutada ruumis üksteise suhtes 120 elektrilise kraadi suuruse nurga alla. Selline mähiste paigutus terassilindri sisepinnal on näidatud joonisel 10-4. Näidatud voolude suunad juhtmetes vastavad joonisel 10-2 toodud diagrammil hetkele *a* ning seega ka joonisel 10-3 näidatud voolude suundadele.

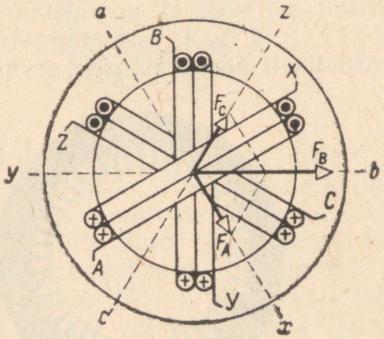


Joon. 10-3. Kolme ühel teljel oleva mähise magnetvoogude liitmine.

Mähise *BY* magneetimisergutus F_{mB} on suunatud mähise telje *by* sihis ja on maksimaalne, sest $i_B = I_{mB}$. Mähise *AX* magneetimisergutus F_A on oma telje *ax* suu-

naline, kuid võrdne $0{,}5\,F_{mB}$-ga, sest $i_A = 0{,}5\,I_{mB}$. Täpselt samuti $F_C = 0{,}5\,F_{mB}$ ja on suunatud telje cz sihis. Näeme, et antud asetuse korral tekitavad mähiste magneetimisergutused summaarse magneetimisergutuse

$$\overline{F} = \overline{F}_A + \overline{F}_C + \overline{F}_{mB} = 1{,}5\ \overline{F}_{mB}.$$

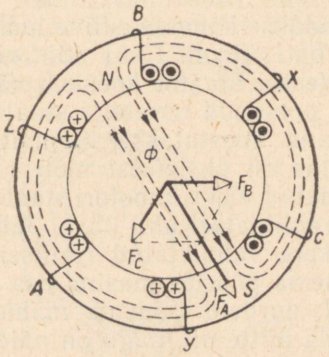


Joon. 10-4. Asünkroonmootori kolmefaasilise mähise summaarne magneetimisergutus.

Kui vaadelda olukorda $^1/_6$ perioodi hiljem (punkt b, joon. 10-2), siis on näha (joon. 10-5), et resulteeriv magneetimisergutus on pöördunud $^1/_6$ võrra ringjoonest, s. o. 60°, jäädes suuruselt konstantseks.

Koos kolmefaasilise mähise magneetimisergutusega pöörleb ka tema poolt tekitatud summaarne magnetvoog Φ. Mähise antud konstruktsiooni korral on magnetvool kaks poolust ($2p = 2$), mis on näidatud ka joonisel 10-5.

Näeme, et voolu ühe perioodi vältel teeb magnetvoog

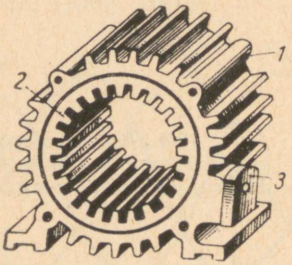


Joon. 10-5. Mootori summaarne magneetimisergutus ajahetkel b (joon. 10-2).

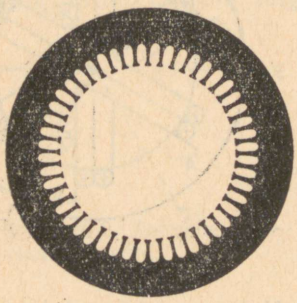
ühe täispöörde, f perioodi korral sekundis ehk $f \cdot 60$ perioodi korral minutis avaldub magnetvoo pöörlemiskiirus üldjuhul järgmiselt:

$$n = \frac{f \cdot 60}{p} \text{ p/min.}$$

Kui konstrueerida mähised sellised, et pooluspaaride arv on suurem kui üks ($p = 2, 3, 4, \ldots$), siis magnetvoo pöörlemiskiirus väheneb võrdeliselt pooluspaaride arvuga.



Joon. 10-6. Asünkroonmootori mähiseta staator.



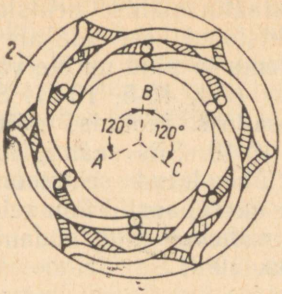
Joon. 10-7. Staatori terasplekk.

Seega tekitab kolmefaasiline vool, kulgedes kolmefaasilises mähises, konstantse kiirusega pöörleva magnetvoo, mille väärtus on alati 1,5 korda suurem ühe faasi magnetvoo amplituudväärtusest:

$$\Phi = 1{,}5\ \Phi_{faasi}. \qquad (10\text{-}1)$$

Asünkroonmootoreis paigutatakse kolmefaasiline mähis masina liikumatu osa, staatori (joon. 10-6) silindrilises sisepinnas olevatesse uuretesse. Staator koosneb välisest teraskerest *1*, millesse on pressitud uuretega staatori terassüdamik *2*. Viimane koostatakse stantsitud terasplekkidest (joon. 10-7), mis on üksteisest mõlemast küljest isoleeritud lakiga. Näidatud elektrimootori staatori kere välispinnale suunatakse ventilaatori abil õhku. Jahutuspinna suurendamiseks on kere valmistatud ribilisena.

Et staatori sees peab paiknema pöörlev masina osa — rootor, siis tuleb väljaspool uurdeid asuvad mähiste laupühendused paigutada mitte nii, nagu on näida-



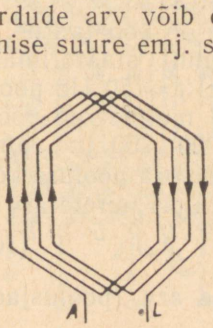
Joon. 10-8. Staatorimähise paigutus uuretes.

tud joonisel 10-4, vaid hoopis staatori südamiku *2* otspinnale (joon. 10-8). Peale selle ei paigutata sektsioonide aktiivosi uuretesse üksteise kõrvale, nagu joonisel 10-4, vaid kahte kihti (ülemine ja alumine) nagu alalisvoolumasinate ankrumähiste puhul (joon. 8-9). Faasimähiste algused *A*, *B* ja *C* on ruumis teineteise suhtes 120 elektrilise kraadi võrra pööratud (joon. 10-8) ja nendega ühendatud klemmid on paigutatud klemmkarpi *3* (joon. 10-6).

10-3. Staatorimähis

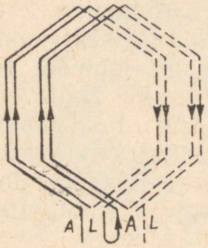
Staatorimähis nagu alalisvoolumasina mähiski koosneb iseseisvatest sektsioonidest. Alalisvoolumasina ankrumähise sektsiooni keerdude arvu püütakse võimalikult vähendada; seda põhjusel, et ankru sektsioon kommutatsiooni ajal kord katkestatakse, kord lühistatakse ja temas indutseeritakse ebasoovitav endainduktsiooni emj., mis on seda suurem, mida suurem on keerdude arv.

Asünkroonmootori staatoril kommutaatorit ei ole, sektsioonide katkestamist tööolukorras ei toimu ja sektsiooni keerdude arv võib olla küllalt suur, mis on eriti vajalik mähise suure emj. saamiseks.

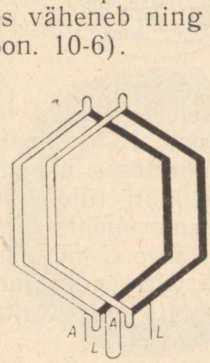


Joon. 10-9. Staatorimähise sektsioon.

Joonisel 10-9 on kujutatud staatorimähise sektsioon, kus on neli keerdu. Kuid kui sektsiooni keerdude arv on suur, siis peab ka uure suurem olema ja pind uurete vahel osutub halvasti kasutatuks (joon. 10-4, 10-5, 10-8). Seepärast eelistatakse sektsioone osadeks jaotada, näiteks nii, nagu on kujutatud joonisel 10-10. Siis saame pooli, mis koosneb mitmest jadamisi ühendatud sektsioonist, milledest igaüks on asetatud oma uurdepaari. Tänu sellele uurete arv kasvab, uurde suurus väheneb ning südamiku terast kasutatakse paremini (joon. 10-6).



Joon. 10-10. Staatorimähise kahe sektsiooni ühendus.



Joon. 10-11. Sektsiooni tähis.

Kõik sektsiooni aktiivküljed paigutatakse uuretesse kahte kihti; joonisel 10-10 on alumine kiht näidatud punktiiriga, ülemine aga pideva joonega. Ülemiste ja alumiste kihtide ning laupühenduste paigutus on näha joonisel 10-8. Kõik sektsiooni juhtmed isoleeritakse üheskoos ning edaspidi kujutatakse sektsiooni ühest keerust koosnevana, sõltumata ta keerdude arvust (joon. 10-11).

Kui mähiseid läbiva voolu sagedus on konstantne, siis sõltub magnetvoo pöörlemiskiirus ainult staatorimähise pooluspaaride arvust. Nii on sagedusel $f = 50$ Hz pooluspaaride arv $p = 1, 2, 3, 4$ jne. korral magnetvoo pöörlemiskiirus n_1 vastavalt 3000, 1500, 1000, 750 jne. p/min. Peale selle tuleb antud p korral iga faasi ja pooluse kohta teatav arv uurdeid. Sel puhul peab staatori uurete arv

$$z = 2pmq, \qquad (10\text{-}2)$$

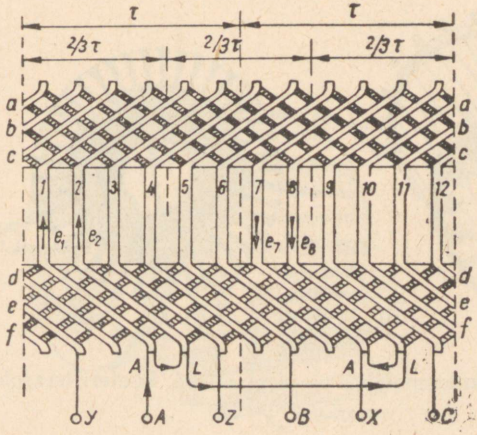
kus $2p$ on pooluste või poolusjaotuste arv (poolusjaotus

τ on kaugus kahe kõrvutiasuva erinimelise pooluse keskpunktide vahel ja on alati võrdne 180 elektrilise kraadiga); m — mähiste faaside arv; q — uurete arv pooluse ja faasi kohta, s. o. uurete arv, mille võtab enda alla üks faasimähis poolusjaotuse ulatuses.

Olgu $2p = 2$, $m = 3$, $q = 2$. Vastavalt valemile (10-2) on staatori uurete arv 12. Igas uurdes asub kaks sektsiooni aktiivkülge, järelikult on ka sektsioonide arv 12. Et mähis on kolmefaasiline, siis koosneb iga mähis neljast sektsioonist, mis moodustavad kaks pooli, kummaski kaks jadamisi ühendatud sektsiooni (joon. 10-11). Mähis kujutatakse tavaliselt n.-ö. lahtirullituna ehk laotatuna (joon. 10-12), sest kettakujulist joonist (joon. 10-8) on tülikas valmistada isegi lihtsaimast skeemist.

Laotatud silindrilisel pinnal (joon. 10-12) on näidatud poolusjaotuste ulatus τ kahe pooluse korral. Iga poolusjaotuse ulatuses võtab iga faasimähis enda alla kaks uuret, s. o. $q = 2$, seepärast on kerge ära märkida erinevatele faasidele kuuluvaid uurdeid. Kui lugeda suvaliselt uurded *1* ja *2* faasile *A* kuuluvateks, siis järgmised kaks selle faasi uuret saavad asuda vaid teise poolusjaotuse piirkonnas, s. t. on esimeste suhtes 180 elektrilise kraadi võrra nihutatud. Need oleksid uurded *7* ja *8*. Uurdeid märgitakse sektsioonide aktiivkülgede ülemise kihi järgi.

Et poolidesse ühendatud sektsioonide *1* ja *2* ning *7* ja *8* elektromotoorjõud peavad liituma, siis on nad ühenda-



Joon. 10-12. Laotatud kahekihiline staatorimähis.

tud nii, nagu on näidatud joonisel 10-10 ja 10-11. Järgnevalt tuleb kaks pooli ühendada üheks faasi *A* mähiseks. Poolid aga on paigutatud erinevate poolusjaotuste ulatusse ning nende elektromotoorjõud on faasilt 180° võrra nihutatud. Seega selleks, et saada faasielektromotoorjõudu

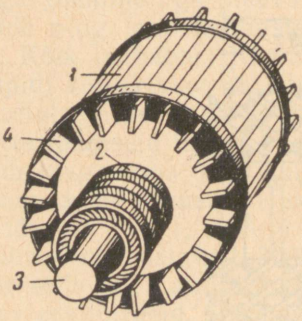
$$e_A = e_1 + e_2 + (-e_7 - e_8),$$

tuleb pooli *1-2* lõpp ühendada pooli *7-8* lõpuga nii, nagu on tehtud joonisel 10-12. Kui lugeda faasi *A* alguseks juhet, mis väljub uurdest *1*, siis tema lõpuks *X* on juhe, mis väljub uurdest *7*.

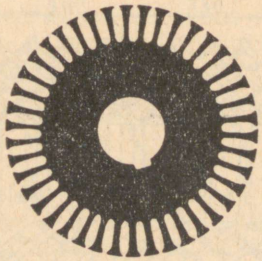
Faasi *B* algus on uurdes *5*, s. t. on faasi *A* alguse suhtes $^2/_3\,\tau$ ehk 120 elektrilise kraadi võrra nihutatud. Faasimähisele *BY* kuuluvad uurded *5, 6* ja *11, 12*. Faasi *C* algus asetseb uurdes *9*, s. t. on veel $^2/_3\,\tau$ võrra nihutatud. Mähiseharu *CZ* võtab enda alla uurded *9, 10* ja *3, 4*. Teise ja kolmanda faasimähise ühendamist pole joonisel 10-12 näidatud, ära on märgitud vaid algused *B, C* ja lõpud *Y, Z*. Toitevõrku lülitamiseks tuleb staatorimähised ühendada kas kolmnurka või tähte nagu trafo mähisedki.

10-4. Rootorimähised

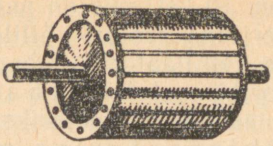
Asünkroonmootori pöörleval osal, r o o t o r i l, on samuti mähis. See on paigutatud terassilindri uuretesse *1* (joon. 10-13), kusjuures silinder nagu staatori südamikki on koostatud terasplekkidest (joon. 10-14). Mähiseks võib



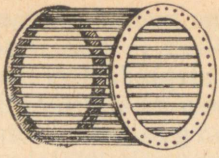
Joon. 10-13. Asünkroonmootori rootorimähis.



Joon. 10-14. Rootori terasplekk.

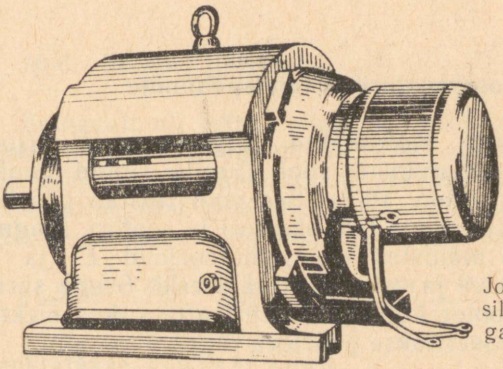


Joon. 10-15. Lühisrootor.

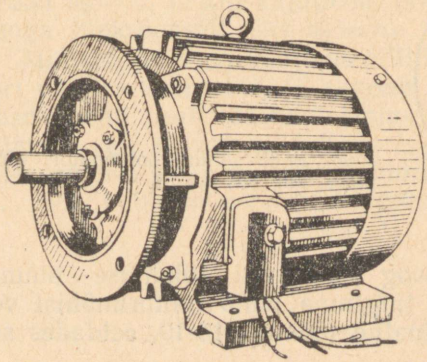


Joon. 10-16. Oravaratas.

olla faasimähis, mis on valmistatud sarnaselt staatorimähisega. Sellist mähist kasutatakse siis, kui mähiseharudesse lülitatakse lisatakistid (reostaadid), mis on vajalikud käivitamiseks ja mootori kiiruse reguleerimiseks. Mähis ühendatakse tähte, tema faaside otsad ühendatakse



Joon. 10-17. Kolmefaasiline kontaktrõngastega asünkroonmootor.



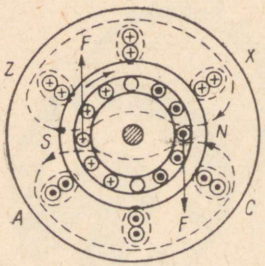
Joon. 10-18. Kolmefaasiline lühisrootoriga asünkroonmootor.

aga kolme kontaktrõngaga *2* (joon. 10-13), mis on paigutatud võllist ja teineteisest isoleerituna rootori võllile *3*. Silindri otspindadele kinnitatakse ventilaatorite labad *4*, et jahutada mootorit. Sellist mootorit nimetatakse faasirootoriga kontaktrõngastega asünkroonmootoriks.

Rohkem valmistatakse aga lühisrootoriga mootoreid, mille terassilindrite uuretes on vaskvardad, mis on lühistatud otstel olevate vaskrõngastega (joon. 10-15). Mähis kujutab endast oravaratast ja on eraldi näidatud joonisel 10-16. Kuni 100-kilovatise võimsusega mootorite mähis valmistatakse alumiiniumist survevalu menetlusel. Uuretega koos valatakse ka otsrõngad ja mootori jahutamiseks mõeldud ventilaatori labad (vt. joon. 10-13). Kontaktrõngastega mootor ja välispinna õhkjahutusega lühisrootoriga mootor on kujutatud joonisel 10-17 ja 10-18.

10-5. Asünkroonmootori töötamispõhimõte

Staatorimähisele rakendatud võrgupinge U_1 (joon. 10-19) mõjul kulgeb mähises vool I_1, mille suund joonisel vastab hetkele *a* (joon. 10-2). See vool tekitab pöörleva magnetvoo Φ, mis sulgub läbi staatori ja rootori. Magnetvoog indutseerib mähistes elektromotoorjõud E_1 ja E_2, nagu trafo primaar- ja sekundaarmähiseski. Seega sarnaneb asünkroonmootor kolmefaasilise trafoga, kus elektromotoorjõud indutseeritakse pöörleva magnetvoo abil.



Joon. 10-19. Asünkroonmootori töötamine, kui $\cos \psi_2 = 1$.

Pöörelgu magnetvoog kellaosuti liikumise suunas. Elektromotoorjõust E_2 tingituna läbib rootorimähist vool I_2, mille suund on näidatud joonisel 10-19, eeldades see-

juures, et vool on E_2-ga faasis. Voolu I_2 ja magnetvoo Φ vastastikusel toimel tekivad elektromagnetilised jõud F, mis panevad rootori pöörlema nii, et ta järgneks pöörlevale magnetvoole. Seega kujutab asünkroonmootor endast pöörleva sekundaarmähisega trafot ja on seetõttu võimeline muundama elektrilist võimsust $E_2 I_2 \cos \psi_2$ mehhaaniliseks.

Rootor jääb pöörlevast magnetvoost alati maha, sest vaid sel juhul saab tekkida emj. E_2 ja järelikult ka vool I_2 ning jõud F. Et muuta rootori pöörlemissuunda, tuleb muuta magnetvoo pöörlemissuunda. Selleks tuleb vahetada staatorimähisega ühendatud toitevõrgu kahe suvalise juhtme otsad. Sel juhul muutub faasijärjestus ABC kas ACB-ks või BAC-ks ja magnetvoog hakkab pöörlema vastassuunas.

10-6. Rootori libistus

Eelnevalt oli juttu sellest, et asünkroonmootori rootor peab pöörlevast magnetvoost alati maha jääma. Viimase pöörlemiskiirust tähistatakse tavaliselt n_1-ga, see on konstantne, sest $p = \text{const}$ ja $f_1 = \text{const}$. Rootori pöörlemiskiiruse võime tähistada n_2-ga. Suurust

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad \text{ehk} \quad s\% = \frac{n_1 - n_2}{n_1} 100\% \qquad (10\text{-}3)$$

nimetatakse libistuseks.

Teoreetiliselt muutub libistus ühest nullini või 100%-st nullini, sest paigalseisva rootori korral käivitamise alghetkel $n_2 = 0$, ja kui kujutleda, et rootor pöörleb magnetvooga sünkroonselt, siis $n_2 = n_1$.

Mida suurem on koormus võllil, seda väiksem on rootori pöörlemiskiirus n_2 ja suurem s, sest suuremat pidurdusmomenti peab tasakaalustama suurem pöördemoment; viimane aga kasvab vaid E_2 ja I_2, s. t. ka s kasvades. Nimikoormusel on asünkroonmootori libistus s_n tavaliselt 1 ... 6%; väiksem arv vastab võimsamale mootorile.

10-7. Elektromotoorjõu ja voolu sagedus rootorimähises

Magnetvoog pöörleb kiirusega n_1, rootor kiirusega n_2. Emj. ja voolu sagedus rootoris on ilmselt võrdeline magnetvoo pöörlemiskiirusega rootori suhtes, s. o. vahega $n_1 - n_2$. Siis

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60} = \frac{pn_1 s}{60} = f_1 s. \qquad (10\text{-}4)$$

Paigalseisva rootori korral $f_2 = f_1 \cdot 1 = f_1$; kui rootor pöörleb sünkroonselt staatori väljaga, siis $f_2 = f_1 \cdot 0 = 0$. Nimipöörlemiskiirusel, s. t. kui $s_n \approx 2 \ldots 4\%$, on sagedus f_2 väga väike: $f_2 = f_1 s = 50 \cdot 0{,}02 \ldots 50 \cdot 0{,}04$, s. o. $1 \ldots 2$ Hz.

10-8. Elektromotoorjõud staatori- ja rootorimähises

Kui rootor on liikumatu, siis indutseeritakse staatori- ja rootorimähises nagu trafo primaar- ja sekundaarmähiseski elektromotoorjõud:

$$E_1 = 4{,}44 f_1 w_1 \Phi_m k_1; \qquad (10\text{-}5)$$
$$E_2 = 4{,}44 f_1 w_2 \Phi_m k_2. \qquad (10\text{-}6)$$

Erinevus on vaid selles, et teguritega k_1 ja k_2 tuleb arvestada silindrilisele pinnale paigutatud mähise iseärasusi. Rootori pöörlemisel tema emj. muutub pidevalt, sest $f_2 = f_1 s$. Siis pöörleva rootori emj.

$$E_{2s} = 4{,}44 f_2 w_2 \Phi_m k_2. \qquad (10\text{-}7)$$

See emj. avaldatakse tavaliselt liikumatu rootori emj. kaudu:

$$\frac{E_{2s}}{E_2} = \frac{f_2}{f_1} = \frac{f_1 s}{f_1} = s,$$

millest

$$E_{2s} = E_2 s. \qquad (10\text{-}8)$$

Järelikult muutub rootori emj. mootori tööprotsessis üsna tugevasti. Kui $s = 1$, $E_{2s} = E_2$, kui aga $s = 0$, siis $E_2 s = 0$.

10-9. Rootorimähise takistus

Nagu trafos, nii ka siin sulgub osa staatori magnetvoost puistevoona, s. t. sulgub ümber staatori juhtmete rootorisse tungimata (joon. 10-19). On teada, et neist magnetvoogudest ongi tingitud mähise reaktiivtakistus (induktiivtakistus) x_1. Sellised puistevood on ka rootorimähise ümber, kui selles kulgeb vool. Neist on tingitud rootorimähise reaktiivtakistus x_2.

Paigalseisva rootori korral

$$x_2 = \omega_1 L_2 = 2\pi f_1 L_2.$$

Pöörleva rootori korral

$$x_{2s} = 2\pi f_2 L_2 = 2\pi f_1 s L_2.$$

Siis

$$\frac{x_{2s}}{x_2} = \frac{f_1 s}{f_1} = s,$$

millest

$$x_{2s} = x_2 s. \tag{10-9}$$

Siit järeldub, et rootori reaktiivtakistus muutub mootori töötamisel pidevalt ja tugevasti: suurusest $x_{2s} = x_2 \cdot 1 = x_2$ liikumatu rootori korral kuni $x_{2s} = x_2 \cdot 0 = 0$, kui rootor pöörleks sünkroonselt.

Normaalmasinate puhul pole vaja arvestada rootori aktiivtakistuse muutumist sageduse muutumisel 50 hertsist nullini ja võib lugeda, et $r_2 = \text{const}$.

10-10. Vool rootorimähises

Eespool rootorimähise emj. ja reaktiivtakistuse muutumise kohta öeldust võib järeldada, et vool rootoris

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}} \tag{10-10}$$

muutub ka pöörlemiskiiruse muutudes. Käivitusvool I_{2k} peab olema suur ja jääma elektromotoorjõust maha suure nurga ψ_2 võrra, sest E_2 on suur ja mähise reaktiivtakistus x_2 on tavaliselt 8 ... 10 korda suurem aktiivtakistusest

r_2. Rootori pöörlemisel E_{2s} ja x_{2s} vähenevad. Selle tulemusena vähenevad ka vool I_2 ja nurk ψ_2. Nimetatud asjaolu on väga tähtis, sest selles peitub oluline erinevus trafo ja asünkroonmootori vahel.

10-11. Asünkroonmootori tööprotsess

Kolmefaasiline vool I_1 tekitab kolmefaasilises staatorimähises kulgedes magneetimisergutuse F_1, mis pöörleb kiirusega $n_1 = \frac{f_1 \cdot 60}{p}$ (joon. 10-4, 10-5). Kolmefaasiline vool I_2 tekitab rootori kolmefaasilises mähises magneetimisergutuse F_2, mis pöörleb ümber rootori kiirusega $n_3 = \frac{f_2 \cdot 60}{p}$. Rootor ise pöörleb magneetimisergutusega samas suunas kiirusega n_2. Sel juhul magneetimisergutuse F_2 pöörlemiskiirus staatori suhtes on võrdne summaga

$$n_2 + n_3 = n_2 + \frac{f_2 \cdot 60}{p} = n_2 + \frac{f_1 s \cdot 60}{p} =$$

$$= n_2 + n_1 s = n_2 + n_1 \frac{n_1 - n_2}{n_1} = n_1.$$

Seega pöörlevad mõlemad magneetimisergutused F_1 ja F_2 ühesuguse kiirusega n_1, olles teineteise suhtes paigal, ja tekitavad ühiselt magnetvoo Φ. Järelikult on kõik paragrahvis 9-4 ning joonistel 9-8 ja 9-9 toodu maksev ka asünkroonmootori puhul.

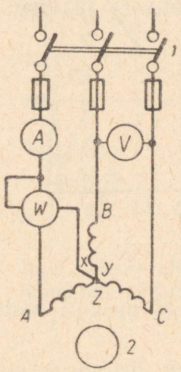
Tuleb ära märkida, et tänu rootori ja staatori vahelisele õhupilule on mootori tühijooksuvool (joon. 9-7) väga suur — $(0{,}2 \ldots 0{,}4) I_{1n}$. Seepärast tuleb võrgu $\cos \varphi_1$ parandamiseks koormata mootorit täielikult.

10-12. Mootori pöördemoment

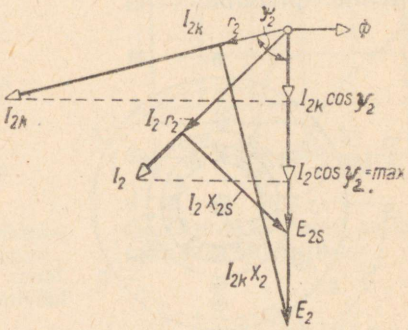
Alalisvoolumootoreis määratakse pöördemoment seosest $M \equiv \Phi I_a$, s. t. ta on võrdeline magnetvooga ja ankruvooluga. Asünkroonmootoris tekitavad pöördemomendi pöörlev magnetvoog Φ ja rootorivool I_2. Momendi võib avaldada järgmiselt:

$$M \equiv \Phi I_2 \cos \psi_2. \qquad (10\text{-}11)$$

Järelikult on moment võrdeline magnetvooga ja rootorivoolu aktiivkomponendiga $I_2 \cos \psi_2$, sest vaid aktiivkomponent määrab ära aktiivvõimsuse ning seega ka momendi.



Joon. 10-20. Lühisrootoriga asünkroonmootori lülitusskeem.



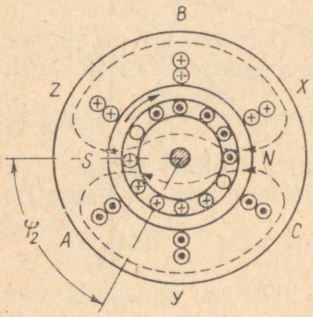
Joon. 10-21. Rootoriahela vektordiagramm.

Joonisel 10-20 on toodud lühisrootoriga mootori lülitusskeem. Kui käivitada mootor, sulgedes vinnaklüliti *1*, siis on alghetkel, kui $n_2 = 0$ ja $s = 1$, rootorimähises *2* indutseeritud emj. E_2 ja käivitusvool I_{2k} maksimaalsed. Ainult käivitusmoment M_k pole maksimaalne, vaid on 2 . . . 2,5 korda maksimaalsest momendist väiksem.

Rootoriahela vektordiagramm (joon. 10-21), mis on joonestatud sarnaselt joonisel 9-9 kujutatule, näitab selle põhjust. Tavaliselt on rootori x_2 palju kordi suurem kui r_2 ja nurk ψ_2, mille võrra vool I_{2k} jääb maha elektromotoorjõust E_2, on suur. Seepärast on voolu aktiivkomponent $I_{2k} \cos \psi_2$ ja järelikult ka käivitusmoment M_k väikesed. Tänapäeva asünkroonmootorites $M_k/M_n = 1 \ldots 1{,}5$, kuigi $I_k/I_n \approx 4{,}5 \ldots 6{,}5$.

Seda nähtust võib seletada ka jooniste 10-19 ja 10-22 põhjal. Mootori töö põhimõtte (joon. 10-19) kirjeldamisel tegime oletuse, et vool I_2 on faasis elektromotoorjõuga E_2, s. t. on aktiivvool ($\psi_2 = 0$). Joonisel 10-22 on kujutatud käivitamise hetk, millal emj. suund rootori juhtmetes vastab joonisel 10-19 näidatule, vool aga jääb elektromotoor-

jõust nurga ψ_2 võrra maha. Siis tekitavad kuus rootori juhet (kolm pooluse N ja kolm pooluse S all) momendi, mis mõjub magnetvoo pöörlemise suunas, kaks juhet aga tekitavad vastumomendi. Selle tulemusena on pöördemoment seda väiksem, mida suurem on voolu I_2 ja emj. E_2 vaheline faasinihe.

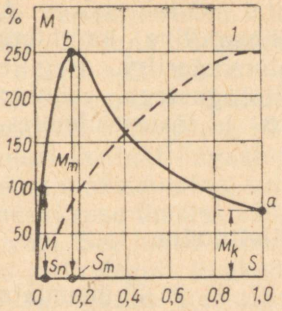


Joon. 10-22. Vool mootori rootoris käivitamisel.

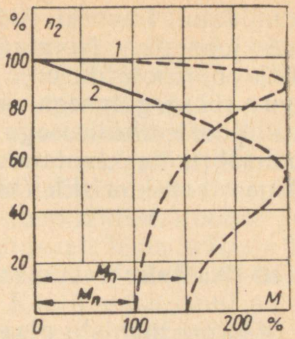
Sedamööda, kuidas rootori pöörlemiskiirus kasvab, väheneb rootorimähise reaktiivtakistus $x_{2s} = x_2 s$ ja sellega koos ka nurk ψ_2, sest takistus $r_2 \approx$ const. Tekib selline olukord (joon. 10-21), kus teatud libistuse väärtuse $s_m \approx$ $\approx 0{,}1 \ldots 0{,}15$ juures saab reaktiivtakistus $x_2 s$ võrdseks aktiivtakistusega r_2, nurk $\psi = 45°$ ning emj. E_{2s} tasakaalustab kaks võrdset pingelangu $I_2 r_2$ ja $I_2 x_{2s}$. Sel ajal saavutavad voolu aktiivkomponent $I_2 \cos \psi_2$ ja pöördemoment M_m maksimaalväärtuse, vaatamata sellele, et vool I_2 pisut väheneb. Tavaliselt $M_m/M_n = 1{,}8 \ldots 2{,}5$ ja seda nimetatakse mootori ülekoormatavuseks.

Rootori kiiruse edasisel kasvamisel muutub x_{2s} tunduvalt väiksemaks kui r_2 ja seega võime ta arvestamata jätta ning lugeda rootori voolu puhtaktiivseks ($I_2 \approx$ $\approx I_2 \cos \psi_2$). Et ka $E_{2s} = E_2 s$ väheneb pidevalt, siis väheneb koos vooluga I_2 ka pöördemoment. Maksimaalne pöörlemiskiirus on mootori tühijooksul, siis $n_2 \approx n_1$ ja $s \approx 0$. Pöördemomendi sõltuvus libistusest $M = f(s)$ on kujutatud joonisel 10-23.

Mootori normaalne töö on võimalik vaid kõvera lõigul libistuse s väärtustel nullist s_m-ni, sest sel juhul pidurdusmomendi ning seega s suurenemisel kasvab ka pöördemoment. Lõigul $s = s_m$ kuni $s = 1$ pole mootori töö stabiilne.



Joon. 10-23. Mootori pöördemomendi sõltuvus libistusest.



Joon. 10-24. Mootori mehhaanilised karakteristikud.

Nimimoment M_n vastab tavaliselt nimilibistusele $s_n = 1 \ldots 6\%$.

Nagu varem näidatud (§ 9-4), on magnetvoog Φ võrdeline trafole antava pingega U_1. See kehtib ka asünkroonmootori kohta. Et $M \equiv \Phi I_2 \cos \psi_2$, siis võime kirjutada, et

$$I_2 \cos \psi_2 \equiv E_{2s} \equiv \Phi \equiv U_1.$$

Siit võib teha asünkroonmootorite kohta väga tähtsa järelduse:

$$M \equiv U_1 U_1 = U_1^2, \qquad (10\text{-}12)$$

s. t. pöördemoment on võrdeline staatorimähise klemmidele rakendatud pinge ruuduga. Seega põhjustab võrgupinge vähenemine näiteks $0{,}9U_{1n}$-ni momendi vähenemise väärtuseni $0{,}9 \cdot 0{,}9M_n = 0{,}81M_n$ ja koormatud mootor võib seiskuda. Nimetatud asjaoluga ongi osaliselt seletatav asünkroonmootoreid toitvate jaotusvõrkude pingelangude normeerimine.

Praktikas huvitab tarbijat sageli mootori mehhaaniline karakteristik

$$n_2 = f(M),$$

kui $U_1 = \text{const}$ ja $f_1 = \text{const}$.

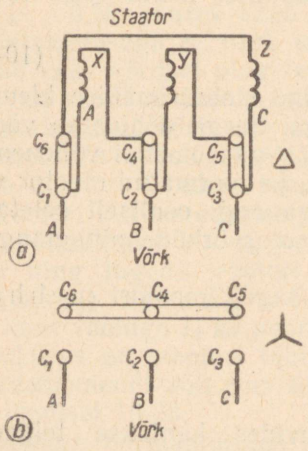
Kasutamise mugavuse huvides kantakse telgedele $\frac{n_2}{n_1} 100\%$ ja $\frac{M}{M_n} 100\%$. Selle karakteristiku saame lihtsa konstruktsiooni teel joonisel 10-23 toodud sõltuvusest ja ta

on näidatud joonisel 10-24, kus tööpiirkond on antud pideva joonega. Normaalmootoritel näitab kõver *1*, et asünkroonmootoril on jäik mehhaaniline karakteristik nagu rööpergutusega alalisvoolumootorilgi. Reguleeritava pöörlemiskiirusega kontaktrõngastega asünkroonmootoril, mida kasutatakse kraana- ja tõsteseadmetes, on pehmem karakteristik (kõver *2*).

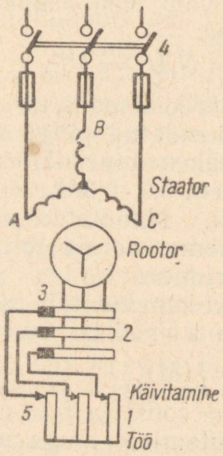
10-13. Asünkroonmootorite käivitamine

Staatori mähiste otsad A, B, C, X, Y, Z ühendatakse klemmidega mootori klemmliistul, kus nad standardi kohaselt tähistatakse järgmiselt: algused — C_1, C_2, C_3 ja lõpud — C_4, C_5, C_6. Klemmid paigutatakse nii, et neid oleks lihtne ühendada nii tähte kui ka kolmnurka, nagu on näidatud joonisel 10-25, *a*, *b*.

Iga staatori faasimähis on arvestatud kindlale faasipingele U_f. Seepärast, ühendades mähiseid kas tähte või kolmnurka, on võimalik mootorit lülitada võrkudesse, millede pinged erinevad üksteisest $\sqrt{3}$ korda. Kui näiteks $U_f = 127$ V, siis kolmnurka ühendatud mähiste korral lülitatakse ta võrku pingega $U_l = 127$ V. Kui $U_l = 220$ V,



Joon. 10-25. Staatorimähise klemmide paigutus.



Joon. 10-26. Kontaktrõngastega asünkroonmootori lülitusskeem.

siis ühendatakse staatori mähised tähte. Täpselt samuti võib mootorit, mille faasimähis on arvestatud pingele 220 V, lülitada võrkudesse, kus $U_l = 220$ V või $U_l = 380$ V.

a) Faasirootoriga (kontaktrõngastega) asünkroonmootor käivitatakse rootoriahelasse lülitatud reostaadi abil (joon. 10-26). Veendunud, et harjade *3* abil rootori kontaktrõngastega *2* ühendatud reostaadi *1* takistus on maksimaalne, suletakse vinnaklüliti *4*. Rootori pöörlemiskiiruse tõustes vähenevad pidevalt tema mähiste emj. ja vool. See lubab vähendada reostaadi *1* takistust, nihutades järk-järgult liugkontakte *5*. Käivitamise lõpul on rootor lühistatud. Reostaat on arvestatud töötamiseks vaid käivitamise ajal. Vahel, selleks et vähendada kadusid, mis on tingitud harjade hõõrdumisest vastu mootori kontaktrõngaid, varustatakse mootor seadisega, mis käivitamise lõpul lühistab kontaktrõngad ja eemaldab neilt harjad. Viimasel ajal on aga sellest konstruktsioonist halbade ekspluatatsiooniliste omaduste tõttu loobutud. Takistuse r_r rootoriahelasse viimise eesmärgiks on vähendada käivitusvoolu rootorimähises, järelikult ka staatorimähises ning, suurendades aktiivtakistust $r_2 + r_r$ väärtuseni x_2, saavutada $I_2 \cos \psi_2 = \max$ (joon. 10-21) ja seega suurendada käivitusmomenti (kõver *2* joonisel 10-23).

b) Lühisrootoriga mootori käivitamine toimub vahetult võrku lülitamisega (joon. 10-20). Sellise käivitusviisi puuduseks on märkimisväärne käivitusvool $(4{,}5 \ldots 6{,}5) I_{1n}$ ja seda suhteliselt väikese käivitusmomendi $M_k = (1 \ldots 1{,}6) M_n$ juures.

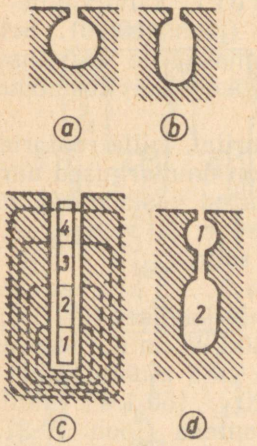
Väga väikese võimsusega mootoritel, mille rootorid on kujutatud joonistel 10-15 ja 10-16, on ümmargused uurded (joon. 10-27, *a*). Neisse on paigutatud vaskvardad, mille aktiivtakistus on x_2-ga võrreldes suur, ja sellepärast on mootori käivitusmoment piisavalt suur.

Mootoritel, mille võimsus on üle 2 ... 3 kW, on rootori uurete kuju selline, nagu on näidatud joonisel 10-27, *b*; kui aga võimsus on suurem kui 20 ... 30 kW, on uurded veelgi sügavamad. Uurded valatakse täis sula alumiiniumi. Kui mootori võimsus on suurem kui 120 ... 150 kW, valmistatakse uurded kitsaste sügavate soontena (joon. 10-27, *c*) ja neisse asetatakse õhukesed laiad vasklatid.

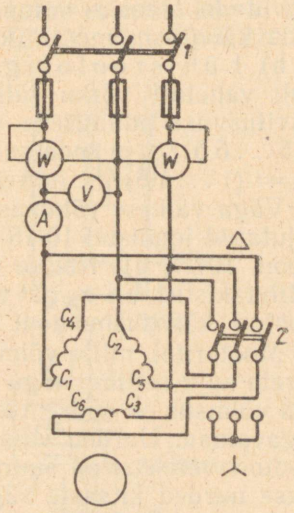
Sügavuurete kasutamise mõte seisneb järgnevas. Käivitamise alghetkel, kui $f_2 = f_1$, sulguvad puistevoo magnetväljajooned, haarates sügavuurdes paiknevat mähist,

nagu on näidatud joonisel 10-27, *c*. Uurde põhjale lähemal olev juhtme osa *1* on aheldatud suurima arvu magnetväljajoontega, osad *2*, *3*, *4* aga seda vähema arvuga, mida kaugemal nad on uurde põhjast. Sel põhjusel on juhtme metalli alumistel kihtidel induktiivtakistus palju suurem kui ülemistel ja $f_2 = f_1$ korral on kogu rootori vool surutud uurde välispinna lähedale. Seejuures ei kasutata juhtme ristlõiget täielikult, juhtme ekvivalentne aktiivtakistus r_2 suureneb ja käivitusmoment kasvab. Rootori pöörlemiskiiruse kasvades sagedus $f_2 = f_1 s$ väheneb, pinnanähtus kaob ja r_2 väheneb automaatselt. Seega toimub käivitamine analoogiliselt selle asünkroonmootori käivitamisega, mille rootoriahelas on reostaat.

M. O. Dolivo-Dobrovolski esitas mootori konstruktsiooni, kus rootoris on kaks kihti uurdeid (joon. 10-27, *d*). Välistes uuretes *1* asub messingist või pronksist lühismähis, mille $r_2 > x_2$. Sisemistes uuretes *2* on aga lühismähis, mille $x_2 > r_2$. Käivitamisel, kui $f_2 = f_1$, tekitab pöördemomendi peamiselt väline mähis, milles kulgeb aktiivvool, sest r_2 on küllalt suur. Seda mähist nimetatakse



Joon. 10-27. Asünkroonmootori rootori uurded.



Joon. 10-28. Lülitusskeem mootori käivitamiseks staatorimähise ümberühendamisega tähest kolmnurka.

käivitusmähiseks. Tänu suurele induktiivtakistusele x_2 on vool sisemises mähises väike ja seda tingituna pinnanähtusest. Tööolukorras, kui $f_2 \approx 0$, kulgeb vool peamiselt sisemises mähises, sest selle aktiivtakistus r_2 on väike. See mähis tekitab ka pöördemomendi ja teda nimetatakse töömähiseks.

Tänapäeval võib NSV Liidu elektrijaamade ja tehaste võimsates võrkudes kasutada lühisrootoriga mootoreid võimsusega mitusada kilovatti. Tavaliselt määratakse võrku lülitatava lühisrootoriga mootori võimsus käivitamisel lubatavast toitevõrgu pinge muutusest lähtudes.

Lühisrootoriga mootorid on laialt levinud tänu lihtsale ehitusele ja ekspluatatsioonile ning suhteliselt odavale hinnale.

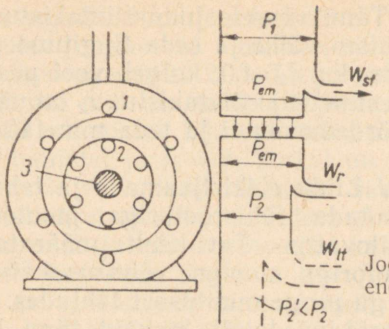
Selleks et vähendada kolmnurka ühendatud staatorimähisega lühisrootoriga mootorite käivitusvoolu, kasutatakse sageli lülitusskeemi, mis võimaldab käivitamise algetapil staatorimähist tähte ühendada (joon. 10-28). Kui viia ümberlüliti *2* noad alumistele kontaktidele ja seejärel sulgeda vinnaklüliti *1*, siis on faasipinge $\sqrt{3}$ korda nimipingest väiksem, vool aga väheneb umbes 3 korda. Kui rootor on hakanud pöörlema, lülitatakse ümberlüliti noad ülemistele kontaktidele ja mootor hakkab töötama nimipingel. Selline käivitamine vähendab käivitusmomenti umbes kolm korda, s. t. võrdeliselt U_1^2-ga, ja seda võib kasutada vaid seal, kus käivitamine toimub peaaegu et tühijooksul, nagu näiteks ventilaatori mootori puhul.

Lühisrootoriga mootorite seiskamiseks lahutatakse staator võrgust.

10-14. Asünkroonmootori pöörlemiskiiruse muutmine

Asünkroonmootoreid kasutatakse peamiselt selliste mehhanismide käitamiseks, mille pöörlemiskiirust pole vaja muuta. Asünkroonmootori kiiruse muutmine on kas seotud küllalt suure energiakaoga või siis nõuab spetsiaalse konstruktsiooniga mootori kasutamist.

Kontaktrõngastega mootori kiiruse muutmise põhimõtet selgitab joonis 10-29. Mootori staatorisse *1* antakse võimsus P_1, mis on näidatud paremal asuval energeetilisel diagrammil. Kui sellest lahutada kadu staatoris W_{st}, jääb järele pöörleva magnetvoo võimsus $P_{em} = M\omega_1$, mida



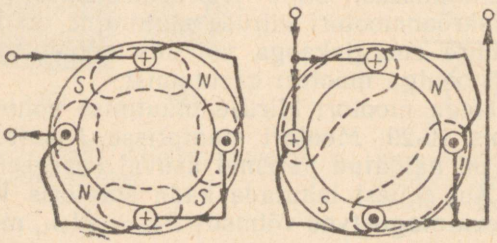
Joon. 10-29. Asünkroonmootori energeetiline diagramm.

nimetatakse elektromagnetiliseks võimsuseks; see antakse üle rootorile *2*. Selleks et saada mootori võllil *3* võimsust $P_2 = M\omega_2$, tuleb elektromagnetilisest võimsusest lahutada kadu rootoris W_r. Suurendades reostaadi (joon. 10-26) sisselülitamisega rootoriahela kadusid, võib vähendada P_2, nagu on näidatud punktiiriga joonisel 10-29. Kui mootori poolt käitatava mehhanismi takistusmoment on konstantne, siis on konstantne ka mootori pöördemoment, $P_2 = M\omega_2$ vähenemine aga toimub pöörlemiskiiruse vähenemise tõttu. Antud juhul, kui soovime vähendada pöörlemiskiirust näiteks 20% võrra, tuleb kulutada 20% energiast reostaadi kuumutamiseks.

Teine lühisrootoriga mootorite puhul kasutatav kiiruse muutmise viis seisneb magnetvoo pöörlemiskiiruse

$$n_1 = \frac{f_1 \cdot 60}{p}$$

muutmises. Selleks kasutatakse spetsiaalseid mitmekiiruselisi mootoreid, mille pöörlemiskiirust n_1 saab muuta astmeliselt (3000 ja 1500 p/min, 1000 ja 500 p/min), s. t. 2 korda. Iga staatori faasimähis jaguneb kaheks võrdseks



Joon. 10-30. Kahekiiruselise mootori mähiste ühendamine.

osaks, mida võib ühendada kas jadamisi või rööbiti (joon. 10-30). Rööpühenduse korral on n_1 kaks korda suurem kui jadaühenduse korral, vastavalt sellele muutub ka rootori pöörlemiskiirus n_2. Nelja kiiruse saamiseks paigutatakse staatorile kaks eraldiasetsevat mähist, millest kumbki annab ümberühendamisel 2 kiirust. Ümberlülitatavate poolustega mootoreid kasutatakse näiteks metallilõikepinkide käitamiseks, mis võimaldab lihtsustada kiirustekasti ehitust.

Võrdlemisi harva, peamiselt spetsiaalseadmetes, toidetakse asünkroonmootoreid generaatorist, mille sagedus f_1 on muudetav. Viimase muutumisel muutuvad ka magnetvoo ja rootori pöörlemiskiirused n_1 ja n_2.

Seoses asünkroonmootorite omadusega muuta toitevoolu sageduse muutumisel pöörlemiskiirust tekkis võimalus rahuldada tööstuse nõudmisi seal, kus vajatakse suuri pöörlemiskiirusi, s. o. väikese läbimõõduga avade lihvimisel, siselihvimisoperatsioonidel kuullaagrite valmistamisel jne. Lihvimisketta spindli pöörlemiskiirus ulatub neil juhtudel 200 000 pöördeni minutis. Sellist kiirust ei anna ükski mehhaaniline ülekandesüsteem.

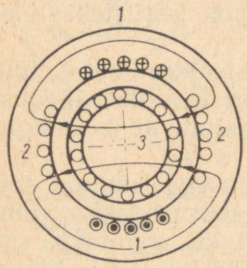
Nii ilmusidki kõrgsageduslikud lühisrootoriga mootorid, mille rootor kujutab endast kõrgekvaliteedilisest terasest täissilindrit ja mille staatorit toidetakse kõrgsagedusgeneraatorist. Kui $p = 1$ ja $f_1 = 2\,000$ Hz, siis magnetvoo pöörlemiskiirus $n_1 = 120\,000$ p/min. Kui näiteks libistus $s = 0{,}08$, siis rootori pöörlemiskiirus $n_2 = 110\,400$ p/min. Suurimaks probleemiks selliste elektrispindlite konstrueerimisel on laagrite ehitus ja nende jahutamine.

10-15. Kahe- ja ühefaasilised asünkroonmootorid

Kaht ühesuguse amplituudi ja sagedusega vahelduvvoolu, mis on teineteise suhtes faasilt nihutatud $^1/_4$ perioodi võrra, nimetatakse *kahefaasiliseks vooluks*. Kulgedes kahes mähises, mis on teineteise suhtes ruumis 90 elektrilise kraadi võrra pööratud, tekitab ta pöörleva magnetvoo nagu kolmefaasiline voolgi.

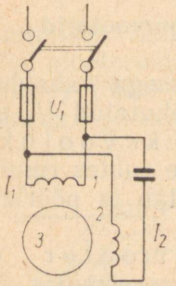
a) *Kahefaasiline asünkroonmootor* on väga levinud automaatikaseadmete lülitusskeemides. Ta staatoril on kaks mähist *1* ja *2* ning tal on lühisrootor *3* (joon. 10-31). Mootori lülitusskeem on näidatud joonisel 10-32. Faasinihe voolude I_1 ja I_2 vahel saavutatakse kon-

densaatori lülitamisega jadamisi ühe faasimähisega. Pöörlemissuuna muutmine toimub voolu suuna muutmisega ühes mähises, rootori kiiruse muutmine aga ühe faasimähise pinge suurendamise või vähendamisega. Automaatikaseadmetes kasutatavad elektrimootorid konstrueeritakse vastavalt erinõuetele (vt. § 12-3).

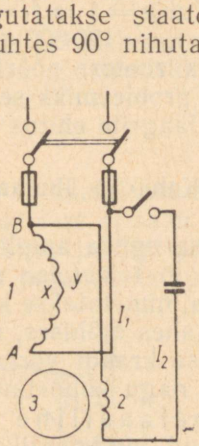


Joon. 10-31. Kahefaasilise asünkroonmootori põhimõtteline ehitus.

b) Ühefaasiline asünkroonmootor on levinud peamiselt võimsuse korral alla 0,5 kW. Tal on (joon. 10-33) ühefaasiline staatori töömähis *1*, mis sarnaneb kolmefaasilise tähte ühendatud mähise kahele harule, ja lühisrootor *3*. Staatorimähises *1* kulgev vahelduvvool I_1 tekitab pulseeriva magnetvoo, mis ei tekita käivitusmomenti. Viimase saamiseks paigutatakse staatorile abimähis *2*, mis on töömähise suhtes 90° nihutatud. Mähi-



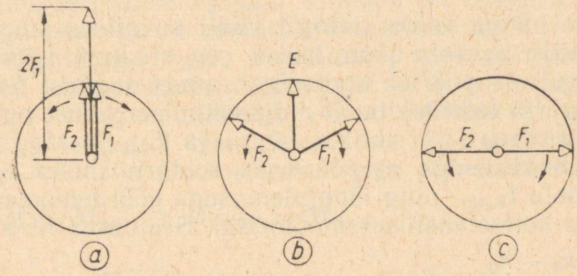
Joon. 10-32. Kahefaasilise asünkroonmootori lülitusskeem.



Joon. 10-33. Ühefaasilise asünkroonmootori lülitusskeem.

sesse 2 antakse vool I_2, mis on kondensaatori abil voolu I_1 suhtes $^1/_4$ perioodi võrra nihutatud. Nüüd tekib pöörlev magnetvoog, mis paneb rootori pöörlema; seejärel lülitatakse abimähis välja, rootor aga jätkab pöörlemist mähise *1* pulseerivas magnetvoos. Kui läbi kondensaatori võrguga ühendatud mähist töö ajaks välja ei lülitata, siis nimetatakse mootorit ühefaasiliseks kondensaatormootoriks.

Sarnane olukord esineb ka kolmefaasilise asünkroonmootori puhul. Sulavkaitsme «läbipõlemisel» ühes töötava mootori faasis lülitub see faas välja, rootor aga jätkab pöörlemist pulseerivas magnetvoos, juhul kui tema koormus ei ületa 50 ... 55% nimikoormusest. Kolmefaasilise mootori käivitamine on ühe faasi katkestuse korral võimatu.



Joon. 10-34. Pulseeriva magneetimisergutuse lahutamine kaheks pöörlevaks komponendiks.

Järgnevalt selle põhjusest. Joonisel 10-34, *a* on kujutatud kahe võrdse magneetimisergutuse F_1 ja F_2 vektorid. Need pöörlevad vastassuundades võrdse kiirusega n_1, tehes ühe perioodi vältel ühe täispöörde. Joonisel 10-34, *a* näidatud asendis magneetimisergutuste hetkväärtuste summa $F_1 + F_2 = 2F_1$. Summaarse magneetimisergutuse telg langeb ühte oma komponentide telgedega. $^1/_6$ perioodiga (joon. 10-34, *b*) pöörduvad magneetimisergutused 60° võrra ja annavad liitudes resulteeriva magneetimisergutuse $\bar{F} = \bar{F}_1 + \bar{F}_2$. $^1/_4$ perioodi hiljem (joon. 10-34, *c*) on aga nende summa võrdne nulliga jne. Ainult pulseeriva magneetimisergutuse telg jääb muutumatuks. Siit

järeldub, et kaks pöörlevat magneetimisergutust annavad voolu sagedusega pulseeriva liikumatu teljega magneetimisergutuse, mis saavutab nii positiivse kui ka negatiivse maksimumi. Maksimumide absoluutväärtused on võrdsed kahe pöörleva magneetimisergutuse aritmeetilise summaga.

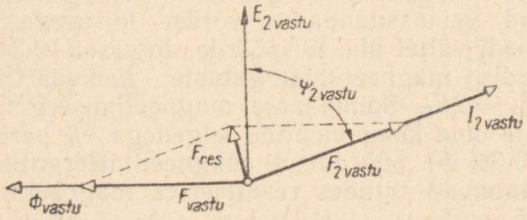
Seega juhul, kui käivitatakse käivitusmähiseta ühefaasilist mootorit või kolmefaasilist mootorit, mille ühes faasis on katkestus, võib staatori pulseeriva magneetimisergutuse F_p tekitatud magnetvoogu Φ_p lugeda koosnevaks kahest võrdsest magnetvoost. Need on tekitatud vastavate magneetimisergutuste poolt ja pöörlevad võrdse kiirusega erinevates suundades. Magnetvood indutseerivad rootorimähises kaks elektromotoorjõudu, kaks voolu ja tekitavad nende voolude abil kaks võrdset pöördemomenti, mis mõjuvad eri suundades. Loomulikult siis rootor pöörelda ei saa.

Kui aga panna rootor mingil viisil suvalises suunas pöörlema, siis haarab tema kaasa see staatori pöörlev magnetvoog, mis pöörleb rootoriga samas suunas. Seda magnetvoogu ja teda tekitavat magneetimisergutust nimetatakse pärisuunalisteks ($\Phi_{päri}$ ja $F_{päri}$). Magnetvoog tekitab kiirusega n_2 pöörlevas rootorimähises emj. $E_{2\,päri}$ ja voolu $I_{2\,päri}$ ning lõpptulemusena pöördemomendi $M_{päri}$, nagu kolmefaasilises mootoriski. Seejuures libistus

$$s_{päri} = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \approx 0,$$

sest $n_2 \approx n_1$.

Teine magneetimisergutus pöörleb rootorile vastassuunas ning teda ja tema tekitatud pöörlevat magnetvoogu nimetatakse vastassuunalisteks (F_{vastu} ja



Joon. 10-35. Vastassuunalise magneetimisergutuse kompenseerimise diagramm.

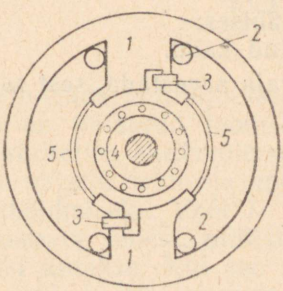
Φ_{vastu}). Nad pöörlevad rootori suhtes kiirusega $n_1 + n_2 \approx$ $\approx 2n_1$, s. o. libistusega

$$s = \frac{n_1 + n_2}{n_1} \approx 2.$$

Vastassuunalise staatori magnetvoo poolt rootorimähises indutseeritud $E_{2\,vastu}$ ja $I_{2\,vastu}$ sagedus on ligikaudu $2f_1$. Seejuures on rootorimähise reaktiivtakistus $x_{2\,vastu} =$ $= 2\pi f_2 L_2$ niivõrd suur, et vool $I_{2\,vastu}$ jääb elektromotoorjõust maha peaaegu 90°. Kõik see on näidatud joonisel 10-35, kus F_{vastu} ja Φ_{vastu} on vastavalt staatori vastassuunaline magneetimisergutus ja temaga faasis olev vastassuunaline magnetvoog, $E_{2\,vastu}$ ja $I_{2\,vastu}$ aga magnetvoost 90° võrra mahajääv rootorimähise emj. ja viimasest peaaegu 90° võrra mahajääv vool.

On loomulik, et $I_{2\,vastu}$ tekitab rootorimähises oma magneetimisergutuse $F_{2\,vastu}$. Viimane on $I_{2\,vastu}$-ga faasis ja seega peaaegu et vastandfaasis staatorimähise magneetimisergutusega F_{vastu}. Praktiliselt need magneetimisergutused kompenseerivad teineteist ($F_{res} \approx 0$) ja vastassuunaline vool on tühiselt väike. Sellepärast ongi voolu $I_{2\,vastu}$ tekitatud vastassuunaline pöördemoment M_{vastu} väga väike ja mootori resulteeriv pöördemoment

$$M = M_{päri} - M_{vastu} \approx M_{päri}.$$



Joon. 10-36. Ühefaasiline ekraneeritud poolustega mootor.

c) Ühefaasiline ekraneeritud ehk lõhestatud poolustega asünkroonmootor, mida valmistatakse võimsustele 0,5 ... 30 W, on väga lihtsa konstruktsiooniga ja laialdaselt levinud seal, kus pole vaja suurt käivitusmomenti. Joonisel 10-36 on kujutatud staator, millel on väljepoolused *1*. Viimastele on paigutatud

kahest poolist *2* koosnev ühefaasiline mähis. See mähis tekitab pulseeriva magnetvoo. Igal pooluskingal on ühes servas uure, millesse on paigutatud lühisrõngas *3*, mis etendab trafo sekundaarmähise osa. Rõngastes indutseeritakse voolud, mis on pooluste mähiste voolude suhtes faasilt nihutatud, ja seetõttu, et mähised on õhupilus ruumiliselt nihutatud, tekib nõrk pöörlev magnetvoog. Lühisrootor *4* hakkab pöörlema kiirusega n_2, mis on väiksem kui n_1. Mootori töökarakteristikute parandamiseks paigutatakse pooluste vahele terasplaatidest magnetilised šundid *5*.

10-16. Asünkroonmootori kaod ja kasutegur

Kiiruse muutmise võimaluste käsitlemisel tõime joonisel 10-29 asünkroonmootori energeetilise diagrammi. Mootorile antav võimsus

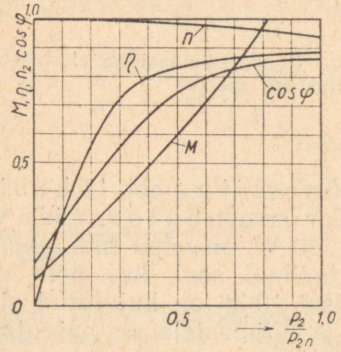
$$P_1 = \sqrt{3}\, U_1 I_1 \cos \varphi_1. \qquad (10\text{-}13)$$

Kui P_1-st maha arvestada kõik kaod mootoris, siis kasulik võimsus võllil

$$P_2 = P_1 - (P_{v1} + P_{r1} + P_{v2} + P_{meh}), \qquad (10\text{-}14)$$

kus P_{v1} on vaseskadu staatorimähises;
P_{r1} — rauaskadu staatoris;
P_{v2} — vaseskadu rootorimähises;
P_{meh} — hõõrdumisest tingitud kadu.

Rootori rauaskadu pole meil vaja arvestada, sest sagedus f_2 on lähedane nullile.



Joon. 10-37. Asünkroonmootori töökarakteristikud.

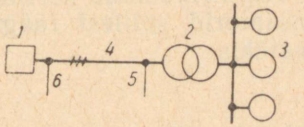
Siis mootori kasutegur

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\% = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1} 100\%. \qquad (10\text{-}15)$$

Joonisel 10-37 toodud asünkroonmootori töökarakteristikud on sarnased rööpergutusega alalisvoolumootori vastavatele karakteristikutele. Elektrimasinad ehitatakse nii, et kasutegur saavutab maksimumi kas nimikoormusel või selle lähedal.

10-17. Asünkroonmootoreid toitva võrgu võimsusteguri parendamine

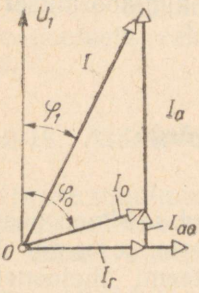
Kõik vahelduvvoolu energiat tarbivad seadmed peavad võimaluse korral töötama ühele lähedase $\cos\varphi$-ga. Joonisel 10-38 on kujutatud ülekandesüsteemi ühejooneline skeem, kus elektrienergia suunatakse toiteallikast *1* läbi trafo *2* asünkroonmootoritesse *3*.



Joon 10-38. Võrgu $\cos\varphi$ parendamise skeem.

On teada, et liinijuhtmetes *4* kulgeb vool $I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2}$, mis on näidatud joonisel 10-39. Voolu komponent I_a on võrdeline aktiivvõimsusega P, reaktiivkomponent I_r on aga vajalik trafo ja mootorite elektromagnetilise välja alalhoidmiseks. Vool I_r on täiesti kasutu ja konstantne, sõltumata sellest, millist aktiivvõimsust juhtmeid mööda edasi antakse. Kui see võimsus ja järelikult ka vool I_a on suured, siis on nurk φ_1 väike, $\cos\varphi_1$ suur ja elektrienergia ülekande kasutegur on suurem. Kui mootorid on alakoormatud, siis on I_a tunduvalt väiksem ja läheneb isegi I_{a0}-le, nurk φ kasvab, $\cos\varphi$ aga läheneb $\cos\varphi_0$-le. Tühijooksuvool $I_0 \approx I_r$ on trafos kuni $0{,}1I_n$ ja asünkroonmootoris kuni $0{,}4I_n$. Sel põhjusel ongi elektrienergia ülekande kasutegur väike. Seega on asünkroonmootorite täielik koormamine ekspluateerimisel hädavajalikuks nõudeks.

Raskete käivitustingimuste korral tuleb asünkroonmootor valida suurema võimsusega ja ta töötab alakoormusel. Juhul kui $P_2 \leqslant (0{,}4 \ldots 0{,}45) P_{2n}$ ja staatorimähis on normaalselt ühendatud kolmnurka, saab seda ümber ühendada tähte. Aktiivvõimsus ja ka aktiivvool jäävad konstantseteks, reaktiivvool väheneb aga umbes 3 korda ja $\cos\varphi$ kasvab.



Joon. 10-39. Võrgu $\cos\varphi$ parendamise vektordiagramm.

Varem näitasime, et $\cos\varphi$-d saab suurendada kondensaatorite lülitamisega võrku punktis *5* või veel parem — punktis *6* (joon. 10-38). Suurte reaktiivvoolude korral on otstarbekamad sünkroonkompensaatorid, millest räägime sünkroonmasinaid käsitlevas peatükis.

10-18. Laboratoorne töö. Kolmefaasiline asünkroonmootor

Enne tööle asumist tutvuda paragrahvide 10-5 kuni 10-13 sisuga.

Töö kirjeldus

Lühisrootoriga asünkroonmootori lülitusskeem on toodud joonisel 10-28. Elektrimootori käivitamiseks tuleb ümberlüliti *2* noad viia asendisse, kus staatorimähis on ühendatud tähte, ja seejärel sulgeda kolmepooluseline vinnaklüliti *1*. Kui elektrimootor hakkab pöörlema, lülitatakse staatorimähis kolmnurka. Elektrimootori käivitamine toimub tühijooksul nimipingel ($U_1 = U_n$). Märkinud üles mõõteriistade näidud tühijooksul, võib koormata mootorit seni, kuni vool saavutab väärtuse I_n. Siin eeldatakse, et koormus tekitatakse mehhaanilise piduriga. Märgitakse üles viis-kuus voolu I_1, võimsuse P_1, pinge U_1, rootori pöörlemiskiiruse n_2 ja pidurdava jõu F väärtust. Saadud andmete alusel tehakse arvutused.

Momendi M, võimsuse P_2 ja kasuteguri η võib välja arvutada paragrahvis 8-25 toodud valemite abil.

Faasirootoriga asünkroonmootori käivitamiseks ühendatakse käivitusreostaat joonisel 10-26 toodud lülitusskeemi kohaselt, staatorimähis aga ühendatakse võrgupingest sõltuvalt kas tähte või kolmnurka.

Tööplaan

1. Tutvuda elektrimootoriga ja käivitusseadmetega, märkida üles elektrimootori ja mõõteriistade põhilised tehnilised andmed.
2. Koostada lülitus (joon. 10-28) ja näidata seda juhendajale. Käivitada lühisrootoriga mootor ümberlüliti *2* kaasabil.
3. Võtta üles ja joonestada mootori töökarakteristikud, s. o. I_1, P_1, M, s, $\cos\varphi$ ja η sõltuvana P_2-st.
4. Käivitada faasirootoriga asünkroonmootor. Muuta rootori pöörlemissuunda.

11. SÜNKROONMASINAD

11-1. Sünkroonmasinate otstarve

Mehhaanilist energiat muundatakse elektriliseks peaaegu eranditult sünkroongeneraatorite abil. Nõnda nimetatakse elektrimasinaid, mille rootori pöörlemiskiirus on jäigalt seotud pooluspaaride arvu ja voolu sagedusega:

$$n = \frac{f \cdot 60}{p}.$$

Tööstuslikul sagedusel $f = 50$ Hz, kui $p = 1, 2, 3$ jne., on sünkroonmasina rootori pöörlemiskiirus vastavalt 3 000, 1 500, 1 000 jne. p/min. Sünkroongeneraatoreid, mida panevad pöörlema kiirekäigulised auruturbiinid, nimetatakse turbogeneraatoriteks ja neil on tavaliselt *1* või *2* pooluspaari ($n = 3\,000$ või 1 500 p/min).

Sünkroongeneraatoreid, mida panevad pöörlema tasandikujõgede või veehoidlate vee-energial töötavad aeglasekäigulised hüdroturbiinid, nimetatakse hüdrogeneraatoriteks. Et hüdrogeneraator ei saa sel juhul olla kiirekäiguline, siis tehakse standardse sagedusega (50 Hz) voolu saamiseks generaatorid suure pooluspaaride arvuga. Näiteks on Bratski hüdroelektrijaama hüdrogeneraatorid võimsusega 225 000 kW, pingega 15 750 V ja $\cos\varphi = 0{,}85$ ehitatud kiirusele $n = 125$ p/min, kusjuures $p = 24$. Krasnojarski hüdroelektrijaama generaatoritel on vastavad andmed järgmised: 500 000 kW, 15 750 V, $\cos\varphi = 0{,}85$, kusjuures neil $n = 93{,}8$ p/min ja $p = 32$.

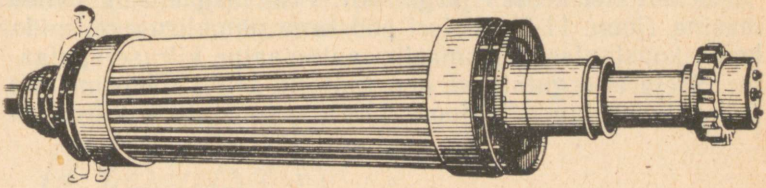
Sünkroonmasinad töötavad ka elektrimootoritena, asendades edukalt suure võimsusega asünkroonmootoreid.

Neid kasutatakse võimsate pumpade ja kompressorite käitamiseks.

Sünkroonmootoreid, mis töötavad tühijooksul ja mille konstruktsioon on seetõttu nõrgem ja kergem, nimetatakse sünkroonkompensaatoriteks, sest neid kasutatakse võrgu cos φ ja elektrijaama kasuteguri tõstmiseks.

11-2. Sünkroonmasina ehitus ja töötamispõhimõte

Sünkroonmasinatel on kaks põhilist osa: staator koos talle paigutatud mähisega, milles indutseeritakse emj. ja mida sellepärast nimetatakse ankrumähiseks, ning rootor, millel on normaalmasinate puhul ergutusmähisega poolused. Staatorimähis (ankrumähis) sarnaneb igati asünkroonmootori staatorimähisega (joon. 10-9 ja 10-12). Turbogeneraatoritel on rootor silindriline ja selle uuretesse on paigutatud ergutusmähis (joon. 11-1). Roo-

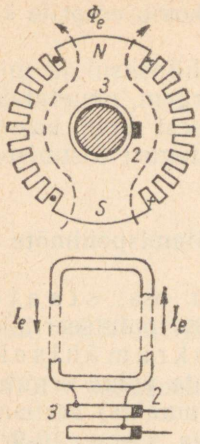


Joon. 11-1. Turbogeneraatori rootori väliskuju.

tori uurded ja ergutusmähise sektsioon on skemaatiliselt näidatud joonisel 11-2. Aeglasekäigulise masina rootor on väljepoolustega, nagu on näidatud joonisel 11-3.

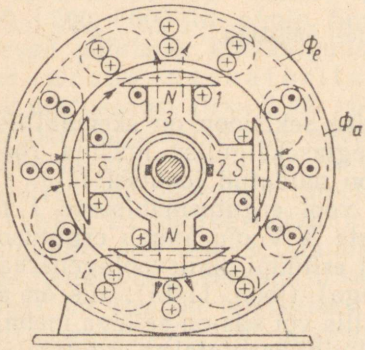
Kõigil juhtudel kulgeb vool ergutusmähisesse *1* läbi harjade *2* ja kontaktrõngaste *3*. Voolu annab ergutusmasin *EM*, mis kujutab endast eritüüpi alalisvoolugeneraatorit (tavaliselt rööpergutusega) (joon. 11-14), mis on paigutatud rootoriga ühele võllile või siis on sellega mehhaaniliselt ühendatud. Viimasel ajal kasutatakse ergutamiseks vajaliku alalisvoolu saamiseks ka elavhõbe-, pooljuht- või mehhaanilisi alaldeid.

Väikesevõimsuseliste masinate juures kasutatakse tihti pööratud konstruktsiooni, mille puhul poolused on liikumatud, ankur aga pöörleb.

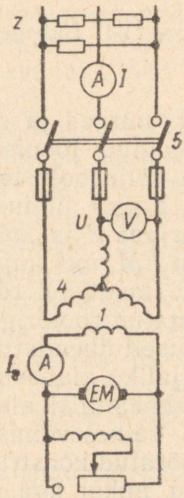


Joon. 11-2. Turbogeneraatori mähiseta rootor ja ergutusmähise üks sektsioon.

Generaator töötab järgmiselt. Primaarjõumasin paneb masina (joon. 11-3) rootori pöörlema nimikiirusega, mida hoiab konstantsena jõumasina automaatne kiiruseregulaator. Seejärel ergutatakse generaatorit, toites rootorimähist *1* ergutusvooluga I_e (joon. 11-4). Konstantse kiirusega



Joon. 11-3. Aeglasekäigulise sünkroongeneraatori töötamispõhimõte.



Joon. 11-4. Generaatori lülitusskeem. ▶

pöörlev pooluste magnetvoog Φ_e indutseerib ankrumähisega *4* lõikudes viimases emj.

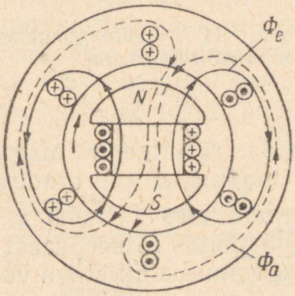
$$E_0 = 4{,}44\Phi_e f w k_0, \qquad (11\text{-}1)$$

mida nimetatakse tühijooksu elektromotoorjõuks.

Sünkroongeneraatori tühijooksukarakteristik $E_0 = f(I_e)$, kui $I = 0$ ja $f = \text{const}$, on täiesti analoogiline võõrergutusega alalisvoolugeneraatori vastavale karakteristikule.

11-3. Kolmefaasilise sünkroongeneraatori töö koormusel

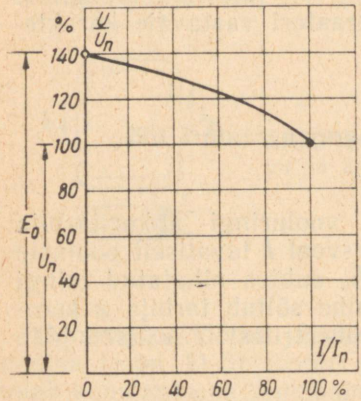
Sünkroongeneraatorites on vooluringi ankur-tarbija (joon. 11-3, 11-4), läbiv koormusvool I tavaliselt pooluste magnetvoo Φ_e tekitatud emj. E_0 suhtes nihutatud mingi faasinurga ψ võrra. See faasinihe sõltub tarbija z koormuse liigist ja generaatori parameetritest. Tavaliselt jääb vool elektromotoorjõust maha.



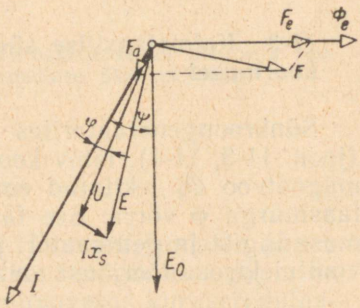
Joon. 11-5. Sünkroongeneraatori ankrureaktsioon.

Ankruvool I tekitab ankru magneetimisergutuse F_a, viimane aga ankru magnetvoo Φ_a (joon. 11-3), mille tulemusena tekib ankrureaktsioon. Siin on aga selle mõju töörežiimile tunduvalt suurem kui alalisvoolugeneraatoris. Kui kujutada endale ette, et vool I on faasis elektromotoorjõuga (joon. 11-3), siis on ankru juhtmerühmade (kolmekaupa) poolt tekitatud ankru magnetvoog Φ_a suunatud risti pooluskingadega. Tekib samasugune ristsuunaline ankrureaktsioon nagu alalisvoolugeneraatoriski (vt. § 8-8). Kui vool I jääb elektromotoorjõust maha, nagu on näidatud joonisel 11-5 kujutatud kahepooluselisel

generaatoril, siis sulgub osa ankru magnetväljajooni piki pooluseid, masinat tugevasti demagneetides. Emj. suund ankrujuhtmetes (joon. 11-5) on võetud selline, nagu on joonisel 11-3. Pikisuunalise ankrureaktsiooni mõju on seda tugevam, mida enam nihkenurk voolu I ja emj. E_0 vahel läheneb 90 elektrilisele kraadile.



Joon. 11-6. Sünkroongeneraatori väliskarakteristik.



Joon. 11-7. Sünkroongeneraatori vektordiagramm.

Ankrureaktsiooni mõjul masina resulteeriv magnetvoog Φ väheneb ja koormatud masina E on tunduvalt väiksem kui E_0. Pingelang ankrujuhtmetes $I\sqrt{r_a^2 + x_s^2} \approx$ $\approx Ix_s$ on suurem kui alalisvoolumasinates ja seepärast on sünkroongeneraatori suhteline pingemuutus hilistuva voolu korral väga suur:

$$\Delta U = \frac{E_0 - U_n}{U_n} \cdot 100\% = (0{,}2 \ldots 0{,}4)\, U_n \cdot 100\%. \quad (11\text{-}2)$$

Joonisel 11-6 on kujutatud sünkroongeneraatori väliskarakteristik mahajääva voolu korral, s. o.

$$U = f(I),$$

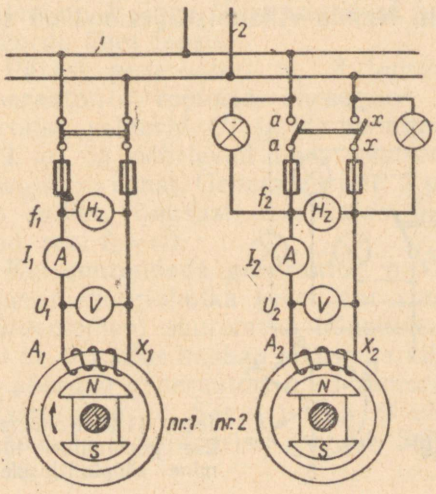
kui $I_e = \text{const}$ ja $f = \text{const}$.

Kõike öeldut illustreerib generaatori vektordiagramm (joon. 11-7), mis sarnaneb trafo sekundaarpoole vektordiagrammiga (vt. joon. 9-9). Magneetimisergutus F_e teki-

tab magnetvoo Φ_e, mis tühijooksul indutseerib emj. E_0. Kui ankrumähises kulgeb elektromotoorjõust E_0 nurga ψ võrra maha jääv vool I, siis on vooluga I faasis oleva ankru-magneetimisergutuse F_a ja F_e vaheline nihkenurk suurem kui 90°. Koormatud masina summaarne magnetvoog Φ tekib resulteeriva magneetimisergutuse $\overline{F} = \overline{F}_e + \overline{F}_a$ toimel ja järelikult tekitatakse koormuse korral emj. $E < E_0$. Lahutades E-st pingelangu ankrumähisel Ix_s, saame generaatori klemmipinge U. Antud juhul on x_s puistevoogudest tingitud ankrumähise takistus.

11-4. Sünkroongeneraatorite lülitamine rööbiti

Sellest, mille pärast on vaja elektrimasinaid rööbiti tööle lülitada, oli juba juttu alalisvoolumasinate ja trafode vaatlemisel (§ 8-15 ja 9-6). Joonisel 11-8 on toodud lülitusskeem kahe ühefaasilise sünkroongeneraatori lülitamiseks rööptalitlusele. Generaatorite staatorid on tinglikult kujutatud terasrõngastena, millel on spiraalsed ankrumähised A_1X_1 ja A_2X_2. Generaator nr. *1* on ühendatud kogumislattidega *1*, millest toidetakse tarbijani viivat liini *2*. Samadele kogumislattidele tuleb lülitada ka generaator nr. *2*. Generaatorite rootorid on kujutatud magnetina, mis pannakse pöörlema vastavate primaarjõumasinate abil.

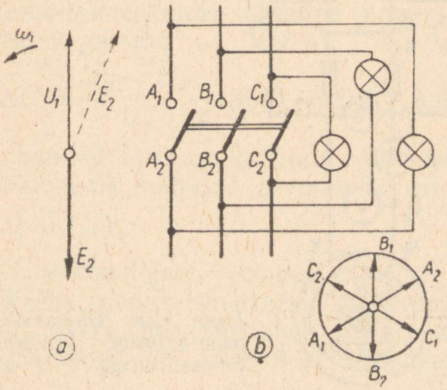


Joon. 11-8. Ühefaasiliste generaatorite lülitamine rööptalitlusele.

Generaatori nr. *1* töötamisel $U_1 = \text{const}$, $f_1 = \text{const}$ ja $I_1 = \text{const}$.

Selleks, et lülitada kogumislattidele generaatorit nr. *2*, pannakse pöörlema selle rootor. Generaatorit ergutatakse ja reguleeritakse nii, et $U_2 = U_1$. Kui oleks tegemist trafodega, kus $f_2 = f_1$, siis piisaks sellest, kui kontrollida, et potentsiaalide vahed klemmide *a-a* ja *x-x* vahel oleksid võrdsed nulliga; seejärel võiksime sulgeda generaatori nr. *2* vinnaklüliti. Antud juhul aga sellest ei piisa, sest generaatorid pole seotud ei mehhaaniliselt ega ka elektriliselt ja nende rootorid võivad pöörelda erinevate kiirustega n_1 ja n_2. Pöörelgu generaatori nr. *1* pinge U_1 vektor (joon. 11-9, *a*) näidatud suunas konstantse nurkkiirusega ω_1. Kui lugeda pinge U_1 vektor paigalseisvaks, siis võib $n_2 \neq n_1$ korral generaatori nr. *2* emj. E_2 vektor pöörelda aeglasemalt või kiiremini kui vektor U_1, s. t. ta võib pöörelda viimase suhtes nurkkiirusega $\omega_1 - \omega_2$. Generaatori nr. *2* vinnaklüliti võib sulgeda vaid hetkel, mil U_1 ja E_2 on faasis, s. t. kui potentsiaalide vahe klemmide *a-a* ja *x-x* vahel on võrdne nulliga. Sel hetkel mõjuvad pinged U_1 ja E_2 generaatorite ankrute suletud vooluringis teineteisele vastassuunas ning joonisel 11-9, *a* nad ongi kujutatud vastandfaasis olevatena.

Selle momendi tabamiseks kasutatakse sünkroniseerimisseadist, mis antud juhul kujutab endast kahte signaallampi. Sünkroniseerimisprotsessis need lambid süttivad ja kustuvad perioodiliselt. Nende vilkumise periood on seda



Joon. 11-9. Kolmefaasilise generaatori lülitamine rööptalitlusele.

suurem, mida väiksem on $n_1 - n_2$, ja lülitamishetke on kerge määrata. Kui lambid on kustunud, suletakse vinnaklüliti; sellest hetkest alates töötavad generaatorid sünkroonselt, s. t. nende rootorid pöörlevad konstantsete võrdsete nurkkiirustega. Kui generaatorite pooluste arvud poleks võrdsed, siis pöörleksid nende rootorid nurkkiirustega, mis oleksid pöördvõrdelised nende pooluste arvuga. Täpselt samuti sünkroniseeritakse kolmefaasilisi generaatoreid, ühendades vastavate klemmidega kolm signaallampi (joon. 11-9, *b*). Generaatorite lülitamine rööbiti on võimalik vaid kolme lambi üheaegsel kustumisel. U_1 ja E_2 vektorite tähed, s. o. $A_1B_1C_1$ ja $A_2B_2C_2$ on näidatud sel hetkel vastandfaasis olevatena. Tegelikult kasutatakse elektrijaamades sünkroniseerimiseks sünkronoskoopi, mis võimaldab määrata mitte ainult lülitamishetke, vaid ka seda, kas juurdelülitatava generaatori rootor pöörleb aeglasemalt või kiiremini kui vaja.

11-5. Sünkroongeneraatori töötamine rööbiti võrguga konstantse ergutusvoolu korral

Oletame, et generaator nr. *2* (joon. 11-8) on lülitatud rööbiti generaatoriga nr. *1*, mille võimsus P_n on palju suurem kui generaatori nr. *2* võimsus P_{2n}. Sel juhul ei põhjusta ükski generaatoriga nr. *2* toimuv operatsioon generaatori nr. *1* pinge U_1 ja sageduse f_1 muutumist. Vaatleme olukorda ühes faasis.

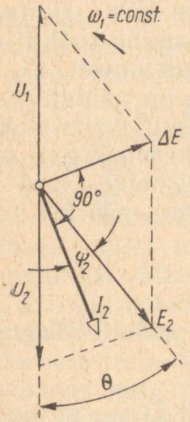
Pärast generaatori nr. *2* juurdelülitamist pöörlevad generaatorite rootorid ühesuguse kiirusega $n_1 = n_2 = \text{const}$, vektorid U_1 ja E_2 on aga vastandfaasis (joon. 11-9, *a*) ja pöörlevad ühes suunas nurkkiirusega $\omega_1 = \omega_{sünkr} = \text{const}$. Generaatori nr. *2* primaarjõumasin arendab sellist võimsust, mis katab generaatori tühijooksukaod, sest $I_2 = 0$.

Kui suurendada generaatori nr. *2* primaarjõumasinale antavat energiahulka (vesi, aur vms.), siis saab mootori pöördemoment suuremaks takistusmomendist ja generaatori nr. *2* rootor hakkab pöörlema kiirendusega. Tema rootor pöördub generaatori nr. *1* rootori suhtes ja tekib lahkkõlastusnurk Θ. Sama nurga Θ võrra edestab E_2 tühijooksu elektromotoorjõu asendit. See on näidatud joonisel 11-10.

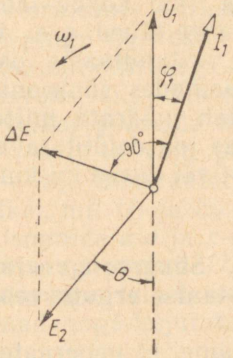
Siis U_1 ja E_2 ei tasakaalusta teineteist, tekib vahe ΔE ja ankrumähise suletud kontuuris tekib vool

$$I_2 = \frac{\Delta E}{x_1 + x_2} = \frac{\Delta E}{x}, \qquad (11\text{-}3)$$

kus $x = x_1 + x_2$ on ankrumähiste reaktiivtakistus; aktiivtakistust ei arvestata, sest see on väga väike.



Joon. 11-10. Generaatori vektordiagramm rööptalitluse korral.



Joon. 11-11. Sünkroonmasina vektordiagramm konstantse ergutusvoolu korral.

Vool I_2 jääb ΔE-st maha 90° (neljandikperioodi) võrra, kuid on peaaegu faasis E_2-ga. Generaator arendab võimsust $P_2 = E_2 I_2 \cos \psi_2$. Voolu aktiivkomponent $I_2 \cos \psi_2$ tekitab suurema pidurdusmomendi, mida suurem on nurk θ. Teatud θ väärtusel pidurdav moment tasakaalustab pöördemomendi ülejäägi, rootori kiirendus saab võrdseks nulliga ja ta pöörleb kiirusega $\omega_1 = \text{const}$.

Seega tuleb selleks, et koormata generaatorit, suurendada primaarjõumasina pöördemomenti, s. o. suurendada talle antavat energiahulka.

Kui pärast generaatori nr. *2* töösse lülitamist vähendada tema primaarmasina pöördemomenti, siis hakkab rootor tühijooksuasendist maha jääma. Tekib jälle lahkkõlastusnurk θ, kuid juba vastupidises suunas; emj. jääb tühijooksuasendist maha (joon. 11-11), tekib emj. ΔE ja

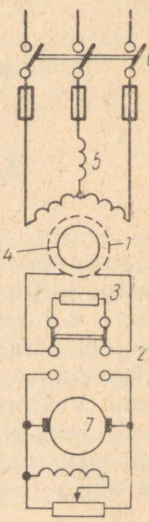
vool I_1. See vool jääb ΔE-st 90° maha, kuid on peaaegu faasis U_1-ga. Sel juhul arendab generaator nr. *1* võimsust $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1$, mille arvel tekitatakse pöördemoment, ja sünkroonmasin nr. *2* hakkab töötama mootorina. Sellist režiimi elektrijaamades ei lubata ja tagasivõimsusrelee lahutab masina automaatselt kogumislattidest.

11-6. Sünkroonmootor

Eespool näitasime, et sünkroonmasin võib töötada ka mootorina, kuid vaadeldud viisi tema mootorirežiimi viimiseks ei kasutata. Üks paljudest käivitamise lülitusskeemidest on toodud joonisel 11-12. Sel juhul on rootoril peale tavalise ergutusmähise *1*, mis on tinglikult kujutatud punktiirjoonega, veel lühismähis *4* nagu asünkroonmootoril. See mähis on n.-ö. käivitusmähis.

Käivitamine toimub järgmiselt. Ergutusmähis *1* lülitatakse ümberlüliti *2* abil takistile *3*, mille takistus on 8 ... 10 korda suurem kui mähisel. Staatorimähis *5* ühendatakse vinnaklüliti *6* abil toitevõrguga ja pöörlev magnetvoog suurendab rootori pöörlemiskiirust $n < n_1$, indutseerides voolud rootori lühismähises *4*. Selleks et rootor hakkaks pöörlema kiirusega n_1, s. t. sünkroonselt magnetvooga, ergutatakse rootorit, viies ümberlüliti *2* noad alla ergutusmasina *7* ankruklemmidele. Sellega viiaksegi masin sünkronismi.

Nagu varem nimetatud, kasutatakse neid mootoreid pumpade ja kompressorite käitamiseks, mille võimsus on sadu ja tuhandeid kilovatte. Sünkroonmootorite ülekoormatavus, s. o. $M_m/M_n \approx 1{,}8 \ldots 2{,}5$. Väikestele võimsustele, mis ei ületa mõndsada vatti, konstrueeritakse sünkroonmootorid ergutusmähiseta; neid nimetatakse reaktiivseteks sünkroonmootoriteks ja neid kasutatakse seal, kus on vaja konstantset pöörlemiskiirust (helikino, telemehhaanika).

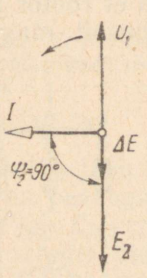


Joon. 11-12. Sünkroonmootori lülitusskeem.

11-7. Sünkroonmasina töötamine rööbiti võrguga muutuva ergutusvoolu korral

Hetkel, mil me lülitame generaatori nr. *2* tööle rööbiti esimesega (joon. 11-9, *a*), tema ankrumähises voolu ei teki. Kui pärast lülitamist suurendada generaatori ergutusvoolu, siis saab tema emj. E_2 suuremaks kui U_1 ja vahe $\Delta E = E_2 - U_1$ mõjul tekib generaatorite ankrumähistes vool I_2, mis jääb eelnimetatud põhjustel ΔE-st faasilt maha 90° võrra. Vektordiagramm selle juhuse kohta on toodud joonisel 11-13. See vool jääb 90° võrra maha ka E_2-st; sellepärast generaatori nr. *2* poolt arendatav aktiivvõimsus $P_2 = E_2 I_2 \cos \psi_2 = 0$.

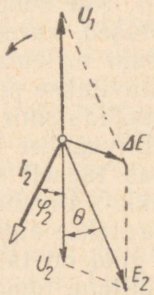
Seega ei põhjusta ergutusvoolu muutumine rööptalitluse korral generaatori aktiivvõimsuse muutumist. Kuid generaatori sildile on alati märgitud $\cos \varphi$ (tavaliselt 0,85), millele on arvestatud hilistuval voolul töötav generaator. Sellega näidatakse, et generaator peab andma aktiivvõimsust $P = E_2 I_2 \cos \psi_2$ ja reaktiivvõimsust $Q = E_2 I_2 \sin \psi_2$. Diagramm selle juhtumi kohta on toodud joonisel 11-14 ja ta on saadud diagrammist 11-10 vektori E_2 suurendamisel sama lahkkõlastusnurga θ juures.



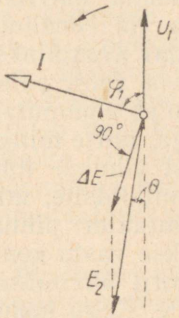
Joon. 11-13. Sünkroonmasina vektordiagramm muutuva ergutusvoolu korral.

Joonisel 11-12 on toodud mootorina töötava sünkroonmasina lülitusskeem. Sealjuures pannakse masin mõnikord tööle sünkroonkompensaatori režiimis, kus mootor töötab tühijooksul, tarbides tühist aktiivvõimsust ja kasutades tugevasti pinget edestavat (mahtuvuslikku) voolu. Vektordiagramm selle režiimi kohta on toodud joonisel 11-15. Nurk θ, mis määrab rootori pöördenurga tühijooksuasendi suhtes, on väike, järelikult on ka aktiivvõimsus väike (nagu tühijooksulgi). Tänu suurendatud ergu-

tusvoolule rootorimähises on masina emj. $E_2 > U_1$. Vool I jääb ΔE-st maha 90° võrra, kuid eelneb pingele U_1 ligi 90°, olles peaaegu puhtreaktiivne.



Joon. 11-14. Aktiiv- ja reaktiivvooluga koormatud sünkroongeneraatori vektordiagramm.



Joon. 11-15. Sünkroonkompensaatori vektordiagramm.

Kui selline masin on lülitatud joonisel 10-38 toodud lülitusskeemi punkti *5* või *6*, siis tekitab ta, töötades nagu kondensaator, võrgus vooluresonantsile lähedase olukorra (vt. § 5-14). Sellise «pöörleva kondensaatori» eelis tavalise kondensaatoriga võrreldes seisneb selles, et pinget edestava voolu suurust saab muuta ergutusvoolu ja järelikult E_2 muutmise abil ja et võrgus on võimalik välja reguleerida soodsaim cos φ.

11-8. Elektrimasinate hooldamine

Normaalselt töötava masina hooldamine seisneb selle puhtana hoidmises ja kontaktosade korrasoleku kontrollimises. Ka tuleb jälgida masina erinevate osade temperatuuri ja mitte lubada selle tõusu üle normi.

Mustusest puhastamine toimub puhta kuiva lapi, tolmust puhastamine aga metallotsikuta (düüsita) käsilõõtsa abil.

Kapriisseimaks masina osaks on kommutaator. Korralikult töötav kommutaator ei tohi sädelda. Tema kuju peab olema rangelt silindriline (kommutaator ei tohi n.-ö.

viskuda). Kommutaatorilestade vahel olev isolatsioon ei tohi kommutaatori pinnalt esile ulatuda, pind peab olema sile, poleeritud, kriimustusteta ja põlenud kohtadeta.

Enne masina käivitamist puhastatakse kommutaator puhta kuiva või bensiinise linase lapi abil. Kui kommutaatori pinnal avastatakse kerged kriimustused, karedad, mustunud või veidi põlenud kohad või pisut esileulatuv vilgukiht, tuleb kommutaator üle lihvida. Lihvitakse peene liivapaberiga; mitte mingil juhul ei tohi kasutada smirgelpaberit, sest viimase tolm liibub vasele. Liivapaber kinnitatakse puitklotsile, mille nõgus osa peab täpselt vastama kommutaatori pinna kõverusele. Puitklots liivapaberiga surutakse vastu kommutaatorit ja pööratakse ankrut. Kommutaatorit lihvitakse seni, kuni tema pind on täiesti puhas ja sile. Kogu kommutaatori pinna ühtlane tumenemine ja nõrk pruunistumine pole kahjulik ning ülelihvimist sel juhul pole vaja. Harjade ja kommutaatori töö on normaalne ka viimase tööpinna pruunika või isegi pruunikassinise varjundi korral.

Kommutaator treitakse üle vaid siis, kui see on hädavajalik. Kommutaatorilesti üksteisest eraldav mikaniitisolatsioon (vilk) kulub aeglasemalt kui lestade vask, mille tulemusena ta mõne aja järel tõuseb kommutaatori pinnast esile. Selle kommutaatori sädelemist põhjustava nähtuse kõrvaldamiseks saetakse või freesitakse isolatsioon lestade vahelt 0,5 ... 1 mm sügavuselt välja. Seda tehakse kas käsitsi, puust käepideme külge kinnitatud rauasae lehest tehtud lõikuri, või spetsiaalse väikese läbimõõduga freesi ($d = 20 \ldots 25$ mm) abil, mis pannakse pöörlema elektrimootoriga. Pärast seda operatsiooni kommutaator lihvitakse eespool kirjeldatud viisil.

Harjasild koos harjahoidjatega peab paiknema täpselt tehases märgitud asendis, mis tagab harjade õige asukoha kommutaatoril.

Vahelduvvoolumasina kontaktrõngad nõuavad vähem hooldamist kui kommutaator. Kontaktrõngad ei tohi viskuda, nende pinnal ei tohi olla kriimustusi, mõlke ja konarusi. Harjad peavad olema kogu oma tööpinnaga vastu rõngaid ega tohi ulatuda üle servade.

Tuleb kasutada vaid valmistajatehase poolt vastavale masinale soovitatud margiga harju. Valet marki harjade kasutamine võib lubamatust sädelemisest tingituna muuta masina täiesti töökõlbmatuks. Õigesti töötavate süsihar-

jade pind peab olema kogu kommutaatoriga või kontaktrõngastega kokkupuutes oleval osal peegelsile.

Harjad peavad harjahoidja pidemes vabalt liikuma ja suruma vastu kommutaatorit või kontaktrõngaid ettenähtud rõhuga. Harjad võivad olla järgmised: süsigrafiit-, grafiit-, elektrografiit-, vaskgrafiit- ja pronksgrafiitharjad. Esimest kolme liiki kasutatakse alalisvoolumasinates, kahte viimast aga asünkroon- või sünkroonmasinates.

Uute harjade paigaldamisel tuleb neid kommutaatori pinna järgi lihvida. Selleks asetatakse harjahoidjasse paigutatud harja alla liivapaber, tööpinnaga harja poole, ja tõmmatakse teda seal vastu kommutaatorit hoides edasitagasi.

Elektrimasinates kasutatakse nii liuge- kui ka veerelaagreid. Tänapäeva väikese ja keskmise võimsusega masinatel on reeglina kõigil kuul- või rull-laagrid, suurtel masinatel aga liugelaagrid, mis on enamasti rõngasmäärimisega.

Rull- ja kuullaagrid nõuavad minimaalset hoolitsust. Nende määrdeõli on tavaliselt küllaltki paks (tavott) ja nõuab vahetamist kord 3 ... 4 kuu jooksul, kuid puhastada ja määrida tuleb väga hoolikalt. Avatud laagrist eemaldatakse vana määre, kõik tema detailid (kuulipidemed, kuulid) pestakse hoolikalt bensiiniga ja seejärel viiakse laagrisse uus määre. Laagrikere täidetakse määrdega umbes $^2/_3$ ulatuses, mis tagab laagri parima töö. Igasuguste kahtluste korral laagri korrasoleku suhtes on parem laager avada, üle vaadata ja kõrvaldada vähimadki defektid. Nii on võimalik vältida tõsiseid häireid ja suuri kulutusi.

Liugelaagrid nõuavad tunduvalt rohkem tähelepanu ja hoolt. Kõik laagrikaaned peavad olema tihedalt suletud. Tuleb regulaarselt jälgida õli taset, et õigeaegselt õli juurde valada. Tavaliselt tuleb seda teha kord nädalas. Isegi väga hästi tihendatud laagrikaante korral õli aja jooksul saastub. Seepärast tuleb vähemalt kord 1 ... 2 kuu jooksul õli vahetada. Selleks lastakse vana õli väljalaskeava kaudu välja ja pestakse laagriruum petrooleumiga puhtaks. Kui väljavoolav petrooleum on täiesti puhas, siis hakatakse väljalaskeava sulgemata laagriruumi valama puhast õli eesmärgiga eemaldada eelnevalt laagriruumist petrooleumi jääk. Lõpuks suletakse väljalaskeava ja laagrikere täidetakse lõplikult õliga.

Laagrite määrimiseks kasutatav õli olgu sadestuse-, vaigu- ja happevaba.

Määrde kontrollimise kõrval tuleb jälgida ka laagriliudade kulumist. See on eriti tähtis asünkroonmootorite puhul, sest neil on väga väike õhupilu (0,3 ... 0,5 mm) ja laagriliua kulumisel võib rootor hakata riivama staatorit. Seepärast kontrollitaksegi perioodiliselt staatori ja rootori vahelist õhupilu, kasutades selleks pilukaliibrit, mis koosneb erineva paksusega kalibreeritud terasribadest. Rootori tunduva vajumise korral tuleb laagriliuad valada uuesti. Laagrite (õli) kuumenemine on lubatud temperatuurini 80° C. Seda kontrollime tavaliselt käega (mitu korda päevas), vastutusrikastes kohtades aga elavhõbetermomeetriga, mis kastetakse laagris olevasse õlisse.

Masina isolatsioonitakistust mõõdetakse perioodiliselt masina töötamisel, pärast pikemaid seisakuid ning ka masina monteerimisel ja ülesseadmisel. Suur isolatsioonitakistus on üheks isolatsiooni piisava läbilöögitugevuse tunnuseks.

Isolatsioonitakistust masina mähiste, kommutaatori või kontaktrõngaste ja masina kere (maa) vahel mõõdetakse induktori või megeri abil.

Soojenenud masina isolatsioonitakistus peab megeriga mõõtmisel olema igal sünkroongeneraatori staatori faasimähisel vähemalt 1 MΩ, rootorimähisel aga vähemalt 0,5 MΩ; asünkroonmootori staatorimähisel vähemalt 1 MΩ ja tema rootorimähisel vähemalt 0,2 MΩ. Alalisvoolumasinate isolatsioonitakistus pole normitud.

Kui masina isolatsioonitakistus pole küllaldane, mis on enamasti tingitud niiskumisest, tuleb masinat kuivatada. Kuivatusahjude olemasolu korral võib neid kasutada väiksemate elektrimasinate kuivatamiseks. Ahju temperatuur on 90 ... 100° C ja kuivatamine kestab 8 ... 10 tundi. Staator ja rootor kuivatatakse eraldi. Ahjude ja teiste kuivatusseadmete puudumise korral kuivatatakse masinat soojendamise teel elektrivooluga.

Alalisvoolumasin pannakse tööle võõrergutusega generaatorina. Ergutusmähisele antakse väike pinge (2 ... 4 V), ankrumähis aga lühistatakse läbi ampermeetri. Võib juhtuda, et ergutusmähist polegi vaja vooluga toita, sest vajaliku voolu tekitamiseks ankrumähises piisab jääkmagnetvoost. Reguleerides voolu ergutusmähises ja ankru pöörlemiskiirust, viiakse ankruvool sellise väärtuseni, et

termomeetri abil mõõdetud mähiste temperatuur ei oleks suurem kui 70 ... 75° C. Ergutusmähiseid kuivatab kuumast ankrust eralduv soojus.

Asünkroonmootoreid võib kuivatada järgmiselt. Mootori rootorimähis lühistatakse (kui on tegu faasirootoriga) ja rootorit hoitakse paigal. Staatorimähistele antakse selline madaldatud pinge, mille juures masina mähistes tekkivad voolud kuumutavad neid temperatuurini 70 ... 75° C. Toitepinge osutub 5 ... 7 korda väiksemaks masina nimipingest.

Tuleb rõhutada, et nimetatud kuivatustemperatuurid on lõpptemperatuurid, protsessi tuleb alustada madalamatelt temperatuuridelt. Masina kuivatamine kestab (sõltuvalt masina võimsusest) mõnest tunnist 5 ... 6 päevani. Kuivatamine lõpetatakse, kui isolatsioonitakistus saavutab normaalse suuruse.

Metallreostaate tuleb puhastada tolmust ja mustusest kas lapiga hõõrumise teel või õhujoa abil. Tuleb kontrollida kontaktide korrasolekut (vajaduse korral põlenud kohti üle viilides), liugkontakti normaalset survet ja seda, et spiraalid ei puutuks kokku omavahel ega ka kerega.

Õlireostaatides tuleb jälgida õli taset, vajaduse korral õli lisades. Kasutatakse mineraalset trafoõli. Õli soovitatakse vahetada kord 2 ... 3 kuu jooksul, pestes seejuures paaki ja takisteid petrooleumiga.

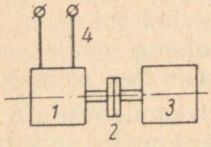
12. AUTOMAATSEADMETE ELEKTRIMASINAD

12-1. Masinate otstarve

Automaatjuhtimisseadmetes kasutatakse elektrimasinaid, mis erinevad normaalmasinatest nii konstruktsiooni kui ka omaduste poolest, kuigi töötamispõhimõte on neil ühesugune. Neid masinaid valmistatakse võimsusega murdosast vatist kümnete vattideni ja nimetatakse *mikromasinateks*.

Meie tööstus laseb välja suurt hulka erinevat tüüpi mikromasinaid ja käesolevas peatükis tuuakse ära ainult tähtsamad andmed mõnede masinate ehituse ja töötamispõhimõtte kohta.

Otstarbelt jagunevad nad servo- ehk täiturmootoriteks, tahhogeneraatoriteks, pöördtrafodeks ja selsüünideks ning neid kasutatakse automaatika- ja telemehhanikaseadmeis, samuti arvutustehnikas. Siinkohal selgitame ka mõningaid mõisteid, mis on seotud nende masinatega ja nende osatähtsusega automaatseadmeis, mõisteid, millega me normaalmasinate juures kokku ei puutunud.



Joon. 12-1. Signaali muundamise skeem.

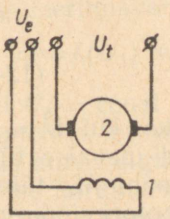
Joonisel 12-1 on kujutatud elektrimootor *1*, mis on siduri *2* abil ühendatud generaatoriga *3*. Kui nüüd toitevõrgust *4* antakse mootorisse energiat, siis viimane muundab selle mehhaaniliseks energiaks, mille generaator muundab

omakorda elektrienergiaks. Siin on peamine signaali edasiandmine ja muundamine, mitte energia ühest liigist teise muundamine.

Mootori lülitamine konstantsele pingele on käsk — alustada pöörlemist! Mootor, saanud pinge kujul signaali, hakkab pöörlema, s. o. täitma käsku. Teisest küljest näitab mootori pöörlemine seda, et signaal on vastu võetud. Nii muundatakse elektriline signaal (pinge) mehhaaniliseks signaaliks (võlli pöörlemine). Mootor paneb pöörlema generaatori *3*, mille klemmidel tekib pinge, mis näitab seda, et generaatorisse jõudis mehhaaniline signaal. Tähendab, antud juhul toimub signaali edasiandmine ja tema kahekordne muundamine, sest signaal võib olla antud näiteks alalispinge näol, väljundil võib aga saada siinuselise pinge.

12-2. Alalisvoolu-servomootor

Võõrergutusega alalisvoolu-servomootor, mille lülitusskeem on toodud joonisel 12-2, saab toite kahest erinevast allikast. Ergutusmähisele *1* antakse pinge U_e, mis on tavaliselt konstantne. Ankrumähisele antakse aga signaal — tüürimispinge U_t, mille suuruse ja suuna muutmise abil mootorit tüüritaksegi.

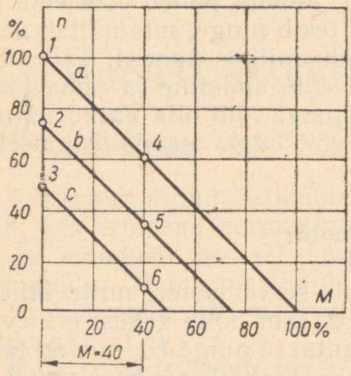


Joon. 12-2. Alalisvoolu-servomootor.

Igal servomootoril peavad olema järgmised omadused. Signaali ilmumisel peab ta kiiresti käivituma ning signaali kadumisel kiiresti seiskuma. Tal ei tohi esineda iseliikumist, s. t. ta ei tohi signaali kadumisel edasi pöörelda. Mootori pöörlemiskiirus peab olema sujuvalt ja laias piirkonnas muudetav, pöörlemissuund peab aga signaali polaarsuse või faasi muutumisel kiiresti muutuma. Kõiki neid nõudeid rahuldab võõrergutusega servomootor.

Igasuguse elektrimootori üheks tähtsamaks karakteris-

tikuks on mehhaaniline karakteristik (joon. 10-24). See karakteristik, s. o. $n = f(M)$, kui vastava mootori $U_e = \text{const}$ ja $U_t = \text{const}$, on näidatud joonisel 12-3. Abstsissteljele on paigutatud $M\% = \frac{M}{M_k} \cdot 100\%$ väärtused, kus M on pöördemoment, M_k aga käivitusmoment, mis on mootoril konstantne.



Joon. 12-3. Servomootori mehhaanilised karakteristikud.

Alalisvoolumasinates $M = c\Phi I_a$, sest kui $U_e = \text{const}$, $I_e = \text{const}$ ja $\Phi = \text{const}$, siis $M = c_M I_a$. Moment $M = M_k$ tekib kiirusel $n = 0$, moment on aga null, kui $I_a = 0$. Ankruvool

$$I_a = \frac{U_t - E}{r_a}. \qquad (12\text{-}1)$$

Et $U_t \neq 0$ ja $r_a \neq \infty$, siis saab I_a nulliks, kui $U_t = E$. Vastu-emj. võib olla pingega võrdne vaid ideaalse tühijooksu kiiruse n_0 juures, kui pidurdusmoment M_p täiesti puudub ja ta sarnaneb mõneti asünkroonmootori sünkroonkiirusega n_1. Tegeliku kiiruse n suhe kiirusesse n_0, s. o. $n\% = \frac{n}{n_a} 100\%$, on joonisel 12-3 paigutatud ordinaatteljele.

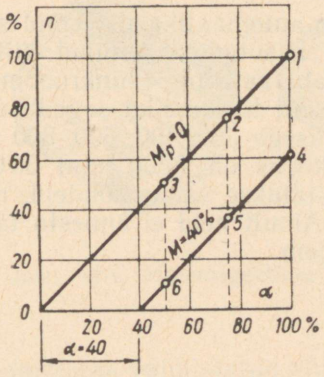
Suhet

$$\alpha = \frac{U_t}{U_e} \qquad (12\text{-}2)$$

nimetatakse tüürimisteguriks. Joonisel 12-3 joonistatud kõverale a vastab $\alpha = 1$, b-le vastab $\alpha = 0{,}75$ ja c-le $\alpha = 0{,}5$. Mehhaanilised karakteristikud osutuvad sirg-

joonteks. Pöörlemiskiiruse n lineaarne pöördvõrdelisus momendiga võllil M konstantse ergutus- ja ankrupinge juures laias diapasoonis on vajalik tingimus selleks, et servomootorit saaks kasutada automaatseadmetes.

Sirgjooneline mehhaaniline karakteristik tagab mootori töö ühesuguse stabiilsuse mistahes pöörlemiskiirustel, sest igasuguse kiiruse vähenemisega kaasneb sellega võrdeline pöördemomendi kasv ja tasakaal on tagatud. See tingimus



Joon. 12-4. Servomootori reguleerimiskarakteristikud.

on vajalik ka servomootori puhul. Joonisel 12-4 on toodud reguleerimiskarakteristik

$$n = f(U_t) \text{ või } n = f(\alpha),$$

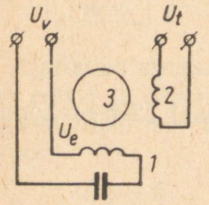
kui $U_e = \text{const}$ ja $M = \text{const}$. See peab olema samuti sirgjooneline, et pöörlemiskiirus oleks võrdeline ankrumähisele antud signaaliga, ja selle võib konstrueerida mehhaanilise karakteristiku alusel. Viimasel vastavad momendile $M_p = 0$ (ideaalne juhtum), kui α on 1, 0,75 ja 0,5, punktid *1*, *2*, *3* (joon. 12-3). Need punktid võime paigutada joonisel 12-4 α väärtustele 1; 0,75 ja 0,5 ning nii saada ideaalse reguleerimiskarakteristiku juhule $M_p = 0$. Võttes joonisel 12-3 punktid *4*, *5* ja *6*, mis vastavad α väärtustele 1, 0,75 ja 0,5 ning kus $M_p = 0{,}4M_k$, võime saada joonisel 12-4 teise karakteristiku, mis vastab samadele α väärtustele, kuid kus $M_p = 0{,}4M_k$. Viimase karakteristiku ja abstsisstelje lõikepunkt näitab ära tüürimispinge U_t suuruse, mille juures mootor hakkab pöörlema, arendades momenti $M = 0{,}4M_k$.

Võõrergutusega alalisvoolu-servomootor on seda tüüpi mootoritest parim ja teda kasutatakse automaatreguleerimisel ning eriti järgivsüsteemides.

12-3. Kahefaasiline vahelduvvoolu-servomootor

Ligi 90% kõigist tööstuse poolt toodetavatest mikromootoritest on vahelduvvoolumootorid.

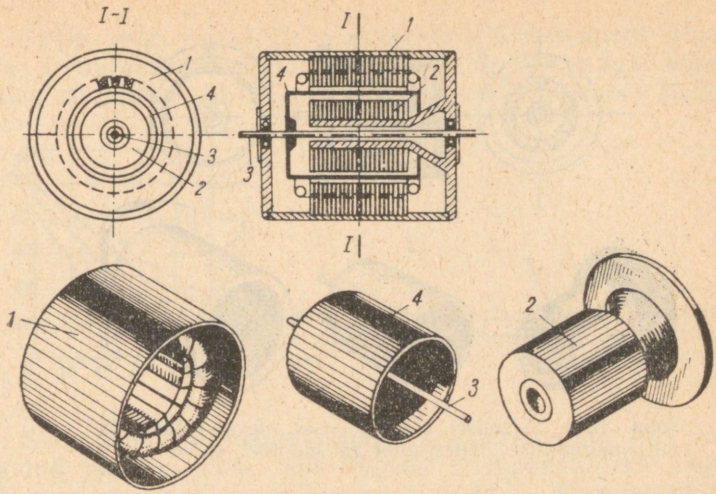
Vahelduvvoolumootoreist on automaatikasüsteemides ja arvutustehnikas laialdasemalt kasutamist leidnud mittemagnetilise õõnesrootoriga kahefaasiline asünkroonmootor. Neid mootoreid toidetakse nii tööstusliku sagedusega (50 Hz) võrgust kui ka sagedusega 330, 400, 500, 800 või 1 000 Hz ja nende pöörlemiskiirus on 1 500 kuni 30 000 p/min. Ka neile mootoreile esitatakse samu nõudeid, mis olid toodud paragrahvis 12-2. Ainult neid ei õnnestu täiel määral täita, nagu näeme hiljem.



Joon. 12-5. Kahefaasiline vahelduvvoolu-servomootor.

Joonisel 12-5 on kujutatud kahefaasilise mootori lülitusskeem, mis sarnaneb paragrahvis 10-15 toodule. Kondensaatoriga jadamisi ühendatud ergutusmähis ühendatakse võrku pingega U_v ja mähise pinge U_e jääb konstantseks. Signaal U_t antakse mähisele *2*, mida nimetatakse t ü ü r i m i s m ä h i s e k s. Voolud mähistes on tänu kondensaatorile teineteise suhtes 90° võrra nihutatud. Lühisrootor *3* hakkab pöörlema, kui mähisele antakse pinge U_t. Selle pinge kadumisel ta peab peatuma.

Mootori ehitus on näidatud joonisel 12-6. Liikumatu staator koosneb kahest osast: välimisest osast *1*, kuhu on paigutatud mõlemad mähised, ja sisemisest osast *2*, mis on vajalik süsteemi magnetilise takistuse vähendamiseks. Rootor *4* on massi vähendamiseks ja kiiretoimelisuse suu-

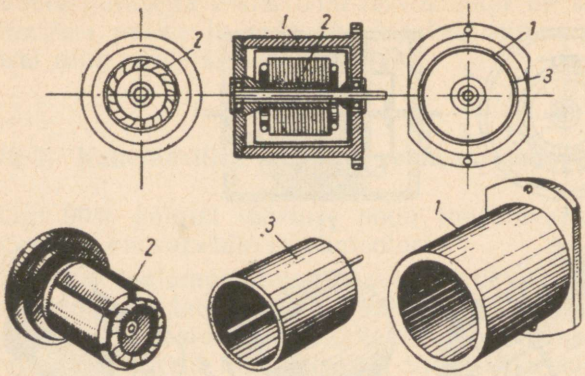


Joon. 12-6. Mittemagnetilise õõnesrootoriga mootori ehitus.

rendamiseks valmistatud alumiiniumisulamist ühe põhjaga õhukeseseinalise õõnessilindrina, mis on kinnitatud võllile *3*. Võll läbib sisemist staatorit *2* ja pöörleb mootori laagrikilpides paiknevatel laagritel. Selliseid mootoreid valmistatakse võimsusega 4 . . . 70 W; võimsustel 0,1 . . . 1,5 W on neil joonisel 12-7 näidatud konstruktsioon. Staatori välisosa *1* ülesandeks on vähendada magnetilist takistust, staatori sisemisel osal *2* paiknevad aga mähised.

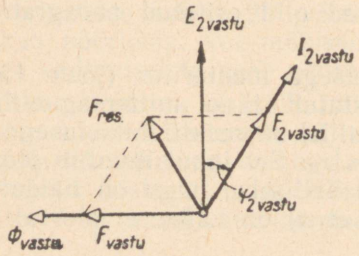
Kahefaasilisel vahelduvvoolul töötaval normaal-asünkroonmootoril on üks oluline puudus, mis tuleb kõrvaldada selleks, et masinat saaks kasutada automaatseadmeis. Nimelt mootor, mis pöörleb kahe mähise välja mõjul, ei jää juhtimismähise väljalülitamise korral seisma, s. t. esineb iseliikumine. Need põhjused olid esitatud paragrahvis 10-15 (joon. 10-35).

Eespool kirjeldatud ehitusega mootorites (joon. 12-6, 12-7) on iseliikumine välistatud tänu mittemagnetilise õõnesrootori kasutamisele, millel on reaktiivtakistusega x_2 võrreldes suur aktiivtakistus r_2. Sel juhul muutub joonisel 10-35 toodud diagramm selliseks, nagu on näidatud joonisel 12-8. Tänu sellele, et x_2 on väike, ei ole tal ka



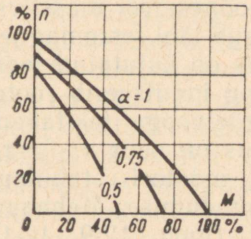
Joon. 12-7. Sisemisel staatori osal oleva mähise ja mittemagnetilise õõnesrootoriga mootori ehitus.

kahekordse sageduse korral (kui $s = 2$) olulist tähtsust, võrreldes r_2-ga. Seepärast jääb emj. $E_{2\,vastu}$ tekitatud vool $I_{2\,vastu}$ elektromotoorjõust faasilt maha tunduvalt väiksema nurga $\psi_{2\,vastu}$ võrra, kui on näidatud joonisel 10-35. Järelikult ei kompenseeri magneetimisergutus $F_{2\,vastu}$ magneetimisergutust F_{vastu} ja pöörlevas mootoris tekib vastassuunaline magnetvoog Φ_{vastu}, mis loob koos $I_{2\,vastu}$-ga pidurdusmomendi M_p. See moment osutub pärisuunalise magnetvoo $\Phi_{päri}$ tekitatud pöördemomendist suuremaks põhjusel, et pärisuunalise emj. E_2 tekitatud vool I_2 on tänu suurele r_2 väärtusele väike. Pidurdus on sel juhul kiirem kui mõlema pinge U_t ja U_e kadumisel, sest viimasel juhul mingisuguseid magnetvooge pole ja rootor võib inertsi tõttu pöörelda.



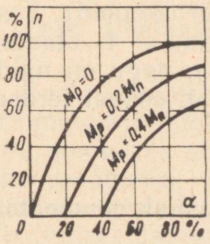
Joon. 12-8. Mittemagnetilise õõnesrootoriga kahefaasilise asünkroonmootori vektordiagramm, mis selgitab iseliikumise puudumist.

Peale selle, kui $r_2 \geqslant x_2$, kasvab pöördemoment libistuse s suurendamisel pidevalt ja mootor töötab igal koormusel stabiilselt, mida näitab ka kõver *1* joonisel 10-23.



Joon. 12-9. Kahefaasilise asünkroonse servomootori mehhaanilised karakteristikud.

Selle mootori mehhaanilisi karakteristikuid, mis on toodud joonisel 12-9, võib lugeda sirgjoonelisteks nagu võõrergutusega alalisvoolumootori puhul. Reguleerimiskarakteristikuid (joon. 12-10) võib aga ligikaudu sirgjoonelisteks lugeda vaid suuruseni $\alpha = 30 \ldots 50\%$. Sellepärast võetakse mootori nimipöörlemiskiiruseks selline kiirus, mis on ligikaudu võrdne poole tühijooksukiirusega.



Joon. 12-10. Kahefaasilise asünkroonse servomootori reguleerimiskarakteristikud.

Juhul, kui mootori poolt käitatava süsteemi kiiretoimelisusel erilist tähtsust ei ole, võib mittemagnetilise õõnesrootoriga asünkroonmootorit edukalt asendada tavalise lühisrootoriga asünkroonmootoriga. Tänu väiksemale õhupilule on magneetimisvool ja seega ka kaod staatorimähises selle mootori juures väiksemad, millest tingituna suurenevad kasutegur ja $\cos\varphi$. Et töö stabiilsus peab olema tagatud alates tühijooksust kuni mootori seiskumiseni ($s = 0 \ldots 1$), siis peab rootori aktiivtakistus r_2 olema reaktiivtakistusest x_2 tunduvalt suurem. Selliste mootorite võimsus ulatub vati murdosast mõne vatini.

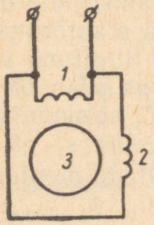
12-4. Kahefaasiline ferromagnetilise õõnes- või massiivrootoriga asünkroonmootor

Sellel mootoril on kahefaasiline mähis ja ferromagnetiline rootor, mis kujutab endast kas õõnes- või massiivset silindrit. Et pöörlev magnetvoog sulgub läbi ferromagnetilise rootori, siis sisemine staator, mis on kujutatud joonisel 12-6, puudub. Pöörlev magnetvoog indutseerib rootori pinnas pöörisvoolud, mis koos magnetvooga tekitavadki pöördemomendi. Rootori aktiivtakistus on suur ($r_2 > x_2$), mis tagab suure käivitusmomendi, mootori stabiilsuse kogu tööpiirkonnas ja iseliikumise puudumise. Mehhaanilised ja reguleerimiskarakteristikud (joon. 12-9, 12-10) on lähedased sirgjoontele ja seda täpsemalt, mida suurem on toitevõrgu sagedus. Mootori kiirus on laiades piirides reguleeritav, ta on lihtsa ehitusega ja töökindel. Mootori puuduseks on madal kasutegur ja $\cos\varphi$. Selliseid mootoreid kasutatakse laialdaselt automaatikalülitustes, kusjuures nende võimsus on 5 ... 300 W. Mootoritel võib olla ka kolmefaasiline staatorimähis ja nad võivad töötada kondensaatormootoritena.

Neis seadmetes, kus püütakse suurendada pöörlevate osade inertsmomenti (magnetofonid, güroskoobid), kasutatakse nimetatud mootoreid pööratuina, s. t. staatorimähis paigutatakse liikumatult silindrile, nagu on näidatud joonisel 12-7, rootor aga, mis kujutab endast terasest õõnessilindrit, pöörleb ümber staatori.

12-5. Käivitustakistiga ühefaasiline asünkroonmootor

Ühefaasilise asünkroonmootori töötamispõhimõtte esitasime paragrahvis 10-15, tema lülitusskeem on aga toodud joonisel 10-33. Sellise mootori käivitamiseks tuli kasutada kondensaatorit, mille mahtuvus oleks isegi 50 ...



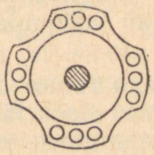
Joon. 12-11. Käivitustakistiga ühefaasiline asünkroonmootor.

200-vatise võimsusega mootori korral 20 . . . 30 μF. Sellise kondensaatori mõõtmed on tavaliselt suuremad kui mootori omad ja seepärast ei saa seda mootorit paljudes automaatikaseadmetes kasutada.

Käivitustakistiga ühefaasiline asünkroonmootor töötab aga kondensaatorita (joon. 12-11). Järgnevalt tema ehitusest. Mootori staatoril, nagu joonisel 10-31 näidatulgi, on kaks mähist. Töömähis *1* võtab enda alla kaks kolmandikku staatori uuretest, tema keerdude arv ja ta induktiivtakistus on suured. Käivitusmähis *2* paikneb ülejäänud uuretes ja väikese keerdude arvu tõttu on ta aktiivtakistus induktiivtakistusega võrreldes suur. Seega kulgeb mähistes, mis on teineteise suhtes 90 elektrilise kraadi võrra pööratud, kaks teineteise suhtes peaaegu veerand perioodi võrra faasilt nihutatud voolu. Nad tekitavad rootorit *3* kaasa haarava pöörleva magnetvoo. Nende mootorite käivituskarakteristikud erinevad soodsalt kolmefaasiliste käivituskondensaatoriga mootorite omadest ja neid valmistatakse võimsustele 18 . . . 600 W ($p = 1$ ja 2), kinnistena ning loomuliku jahutusega.

12-6. Ühefaasiline sünkroonne reaktiivmootor

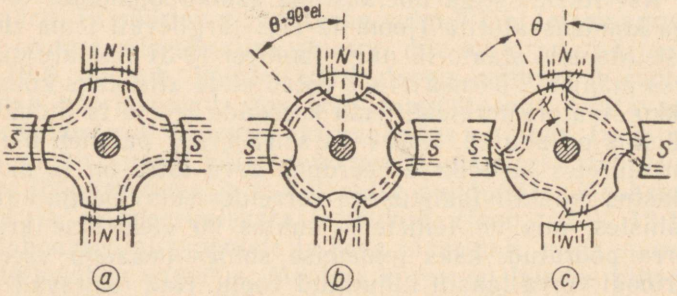
Reaktiivmootor on kõigist väikesevõimsuseliste sünkroonmootorite tüüpidest levinuim. Teda kasutatakse käitava mootorina sünkroonse sidestamise süsteemides, helikino seadmetes, helisalvestusseadmetes (magnetofonid), arvutusseadmete magnetmälu lindiveomehhanismides, meditsiinilises aparatuuris ja majapidamisseadmetes. Mootor on lihtsa ehitusega ja odav.



Joon. 12-12. Ühefaasilise sünkroonse reaktiivmootori rootor.

Sünkroonne reaktiivmootor erineb vähe lühisrootoriga asünkroonmootorist. Staatoril on kaks mähist, millest ühega on jadamisi ühendatud kondensaator (joon. 12-5), et saada pöörlevat magnetvoogu. Rootor on lühismähi-

sega, kuid ta pinnal on teljesihilised väljalõiked (joon. 12-12), tänu millele saadakse «nukid», milleta mootor sünkroonses režiimis töötada ei saa. Mootori töötamispõhimõtet selgitab joonis 12-13.



Joon. 12-13. Ühefaasilise sünkroonse reaktiivmootori töötamispõhimõte.

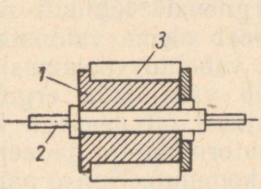
Neljapooluseline magnetvoog on tinglikult asendatud magnetite poolustega. Kui nende keskele paigutada silindriline rootor, siis viimane seisab igas asendis paigal. Kui aga rootoril on pooluste arvuga võrdne arv «nukke», on ta tasakaalus vaid kahes asendis: esiteks, kui nurk pooluste telgede ja «nukkide» telgede vahel on null ($\Theta = 0$), teiseks, kui see nurk on 90 elektrilist kraadi (joon. 12-13, *a* ja 12-13, *b*). Viimane tasakaaluasend pole stabiilne. Väikseimagi kõrvalekalde korral vastavast asendist pöördub rootor asendisse, kus nurk $\Theta = 0$ ja kus magnetiline takistus on minimaalne. Kui poolused (magnetvoog) hakkavad pöörlema (joon. 12-13, *c*) ja tekib lahkkõlastusnurk Θ, siis pöörleb rootor alati sünkroonselt magnetvooga (poolustega), sest esineb jõud, mis püüab vähendada nurka Θ.

Selleks, et tekiks kirjeldatud olukord, peab rootor olema eelnevalt pöörlema pandud kiirusega, mis oleks lähedane sünkroonsele. Selle saavutamiseks varustatakse rootor ka lühismähisega ja mootor töötab algul asünkroonmootorina, hiljem aga tõmbub rootor sünkronismi. Vool rootorimähises saab võrdseks nulliga ja mootor pöörleb pöörleva magnetvoo ning rootori «nukkide» vahelise reaktiivmomendi tõttu. Selliseid ühefaasilisi mootoreid valmis-

tatakse võimsustele kuni mõnikümmend vatti ja pöörlemiskiirusega $n_1 = 1000$ ja 1500 p/min. Nende mootorite puudusteks on suur mass võimsusühiku kohta ning madal kasutegur ja $\cos \varphi$.

12-7. Kolmefaasiline ja ühefaasiline sünkroonne hüstereesimootor

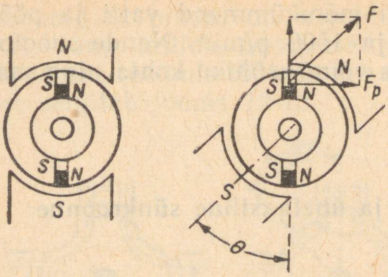
Eespool kirjeldatud sünkroonsete reaktiivmootorite puudused sunnivad meid kasutama sünkroonseid hüstereesimootoreid, mida valmistatakse võimsustele 3 ... 20 W. Mootoril on kas kolmefaasiline või ühefaasiline (töö- ja käivitusmähis) staatorimähis ja massiivne (või stantsitud plekkidest koostatud) ferromagnetiline rootor. Kui tavaliselt kasutatakse elektrimasinates kitsa hüstereesisilmusega terast, siis hüstereesimootori rootor valmistatakse kõvast magnetmaterjalist — vikelloist, millel on lai hüstereesisilmus. Selleks et vähendada mootori maksumust, valmistatakse rootor kombineerituna (joon. 12-14) ja see koosneb puksist *1*, mis istub võllil *2*, ja välisest kõvast magnetmaterjalist õõnessilindrist *3*.



Joon. 12-14. Sünkroonse hüstereesimootori rootor.

Kui kujutleda, et rootor on paigutatud pöörlevasse magnetvoogu, mis joonisel 12-15 on asendatud kahe poolusega, siis tema välimise silindri elementaarmagnetikesed ei suuda molekulaarhõõrdumise tõttu silmapilkselt pöörleva magnetvoo teljele järele pöörduda. Neile magnetikestele hakkavad mõjuma tangentsiaaljõud F_t ja tekib hüstereesimoment M_h. Rootor järgneb magnetvoole sünkroonkiirusega. Pöörleva magnetvoo ja elementaarmagnetikeste telgede vahel tekib lahkkõlastusnurk Θ, mille suurus sõltub vaid materjali koertsitiivjõust.

Mootori käivitamisel kujutab resulteeriv moment endast summat hüstereesimomendist ja pöörisvoolude poolt teki-



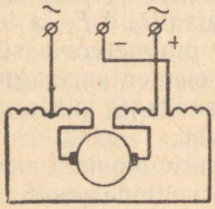
Joon. 12-15. Sünkroonse hüstereesimootori töötamispõhimõte.

tatavast momendist M_{pv}. Seepärast ongi käivitusmoment küllalt suur. Normaalrežiimis pöörleb mootor sünkroonselt hüstereesimomendi mõjul, sest sünkroonkiirusel rootoris pöörisvoole ei teki.

12-8. Universaalne kommutaatormootor

Nagu teada, alalisvoolumootori pöörlemissuund toitevõrgu klemmide ümberühendamisel ei muutu (§ 8-3). Seepärast võib kommutaatoriga mootor töötada ka vahelduvvoolul, muidugi siis, kui mootoris on tehtud vajalikud konstruktiivsed muudatused. Järgnevalt lühidalt neist muudatustest. Kogu magnetjuhe peab olema valmistatud teraslehtedest nagu igal teiselgi vahelduvvoolumasinal. Induktiivsuse vähendamiseks tuleb vähendada ergutusmähiste keerdude arvu. Sel põhjusel on peaaegu kõik vahelduvvoolul töötavad kommutaatormootorid jadaergutusega. Tuleb ette näha abinõusid kommuteerimise parandamiseks, sest vahelduvvoolu korral muutub see palju keerukamaks.

5...600-vatise võimsusega jadaergutusega kommutaatormootoreid, mis on kohandatud tööks alalisvoolul pingega 110 või 220 V ning vahelduvvoolul pingega 127



Joon. 12-16. Universaalse kommutaatormootori lülitusskeem.

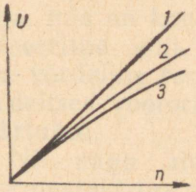
või 220 V ja sagedusel 50 Hz, nimetatakse universaalseteks kommutaatormootoriteks. Mootorite pöörlemiskiirus on 2000 kuni 8000 p/min.

Ühel ja samal mootoril on vahelduvvoolul töötades kadude suurenemise tõttu palju halvemad energeetilised näitajad. Selleks et parandada mootori karakteristikuid vahelduvvooluga töötamisel, vähendatakse ergutusmähise keerdude arvu.

Mootori lülitusskeem on näidatud joonisel 12-16. Mootorit kasutatakse mitmesuguste elektritööriistade käitamiseks, majapidamises ja piiratud ulatuses ka automaatikaaparatuuris. Raadiohäirete vähendamiseks varustatakse mootor filtriga.

12-9. Alalisvoolu-tahhogeneraator

Joonisel 12-1 oli kujutatud servomootor, mis pani pöörlema generaatori. Generaatori sisendsignaaliks oli nurkkiirus ω, väljundsignaaliks aga klemmipinge U. Kui sisend- ja väljundsignaali vaheline sõltuvus $U = f(\omega)$ on lineaarne, siis nimetatakse seda generaatorit tahhogeneraatoriks. Seda sõltuvust, mis joonisel 12-17 on kujutatud sirgjoonega *1*, nimetatakse tahhogeneraatori ideaalseks väljundkarakteristikuks.



Joon. 12-17. Tahhogeneraatori väljundkarakteristikud.

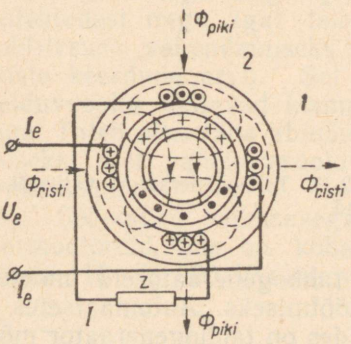
Põhiliselt kasutatakse tahhogeneraatoreid mootorite võllide pöörlemiskiiruse mõõtmiseks. Automaatsetes kiiruse reguleerimise süsteemides on tahhogeneraator mõõteelemendiks, mis näitab kiiruse kõrvalekaldumist etteantud suurusest ja annab välja signaali, mis pärast muundamist ja edasiandmist vastavale täiturelemendile taastab vajaliku kiiruse. Peale selle kasutatakse tahhogeneraatoreid laialdaselt mitmesuguste mehhaaniliste arvutusoperatsioonide teostamiseks.

Alalisvoolu-tahhogeneraatoriks on tavaliselt võõrergutusgeneraator. Mõningatel juhtudel kasutatakse püsimagnetitega ergutatavaid tahhogeneraatoreid.

Kui tahhogeneraator töötab tühijooksul, siis hakkab emj. $E = c_E \Phi n = c\Phi\omega$ konstantse magnetvoo Φ korral muutuma võrdeliselt nurkkiirusega ω. Kui tahhogeneraatori klemmidega on ühendatud takisti ja ankrumähises kulgeb vool I_a, siis on pinge U, tingituna ankrureaktsioonist ning pingelangust juhtmetes ja harjadel, seda väiksem võrreldes E-ga, mida väiksem on klemmidega ühendatud takisti takistus. Sel juhul $U = f(n)$, mis on joonisel 12-17 antud kõveratega *2* ja *3*, kaldub sirgetest *1* kõrvale. Seepärast peab tahhogeneraator alati olema koormatud konstantse takistusega, mis on palju kordi suurem ankrumähise takistusest.

12-10. Mittemagnetilise õõnesrootoriga vahelduvvoolu-tahhogeneraator

Asünkroonset vahelduvvoolu-tahhogeneraatorit kasutatakse väikesevõimsuselistes järgivajamites, automaatjuhtimissüsteemides ja arvutusseadmetes, mis töötavad vahelduvvoolul.



Joon. 12-18. Vahelduvvoolu-tahhogeneraator.

Asünkroonsel tahhogeneraatoril on reeglina rootor, mis kujutab endast mittemagnetilisest materjalist ühe põhjaga õõnessilindrit, ja staator, mis koosneb välimisest ja sisemisest osast nagu vahelduvvoolu-servomootorilgi (joon. 12-6). Sisemisel staatoril mähist pole, välisel aga on neid

kaks, mis on teineteise suhtes pööratud 90° võrra. Üks neist on ergutusmähis *1* (joon. 12-18), millele rakendatakse konstantse amplituudi ja sagedusega pinge U_e. Joonisel 12-18 on see paigutatud nii, et tema telg oleks vertikaalne. Teine on generaatormähis *2*, mille telg on horisontaalasendis. Õõnesrootori *3* seinte paksus on näidatud joonisel liialdatult suurena.

Staatorimähises *1* kulgedes tekitab vahelduvvool I_e pulseeriva magneetimisergutuse F_{st} ja magnetvoo Φ_{st}, mis indutseerib liikumatu rootori keres nagu trafo sekundaarmähises emj. ja pöörisvoolud. Viimaste suund on vastupidine voolu suunale ergutusmähises, kuid joonisel 12-18 ei ole neid näidatud. Need voolud tekitavad rootori magneetimisergutuse F_r, millega koos staatori magneetimisergutus F_{st} tekitabki pikivoo Φ_{pikk}, mille suund ühtib ergutusmähise teljega.

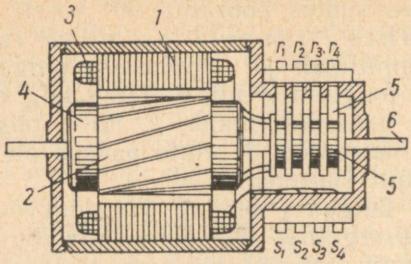
Kui õõnesrootor on pandud pöörlema, siis indutseeritakse temas pöörlemisel emj. E_p ja ka vool, mille rootoril (joon. 12-18) näidatud suund on määratud parema käe juhise järgi. Rootori vool tekitab ristivoo Φ_{ristt}, mille telg ühtib staatorimähise *2* teljega. Nii saadakse omapärane trafo, mille primaarmähiseks on rootor, sekundaarmähiseks aga mähis *2*. Ristivoog tekitab mähises *2* emj., mille sagedus võrdub rootorivoolu ja järelikult ka magnetvoo Φ_{pikk} muutumise sagedusega. Viimane aga on omakorda võrdne staatorimähist *1* läbiva ergutusvoolu I_e sagedusega, mis on konstantne. Seega on staatorimähises *2* indutseeritud emj. sagedus konstantne, tema amplituud aga võrdeline rootori pöörlemiskiirusega, sest sellega on võrdelised rootorivoolu ja magnetvoo Φ_{ristt} amplituudväärtused.

Nii nagu alalisvoolu-tahhogeneraatori puhul, peab koormustakistus z ka siin olema palju kordi suurem staatorimähise *2* takistusest.

12-11. Pöördtrafod

Pöördtrafosid kasutatakse kas pöördenurgaga α, sin α-ga või cos α-ga võrdelise pinge saamiseks. Arvutusseadmetes kasutatakse pöördtrafosid trigonomeetriliste ülesannete lahendamiseks, näiteks trigonomeetriliste funktsioonide saamiseks mingi võrrandi lahendamisel.

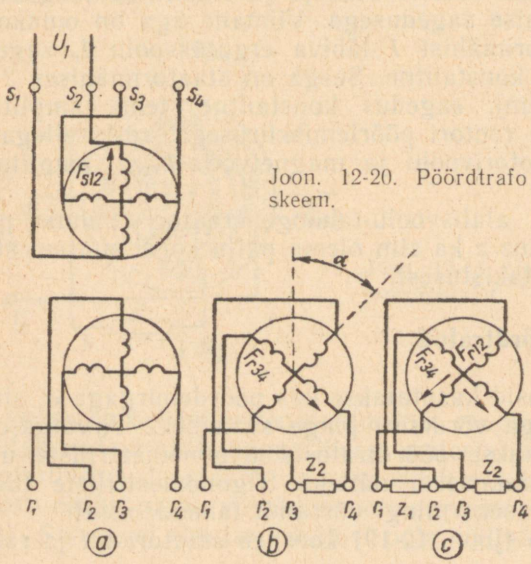
Pöördtrafo (joon. 12-19) koosneb staatorist *1* ja rooto-



Joon. 12-19. Pöördtrafo.

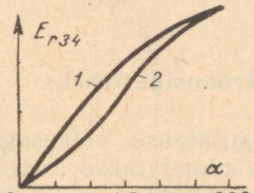
rist *2*, mis on valmistatud elektrotehnilisest lehtterasest. Staatori ja rootori uuretes paiknevad mähised *3* ja *4*, millest kumbki koosneb kahest mähisest, mis on teineteise suhtes 90° pööratud. Mähiste väljundklemmid — staatoril $s_1s_2s_3s_4$ ja rootoril $r_1r_2r_3r_4$ — on paigutatud ühele trafo laagrikilbile. Juhul kui rootori pöördenurk on piiratud $\pm 360°$ ulatuses, ühendatakse mähiste otsad klemmidega mitte kontaktrõngaste ja harjade abil, vaid painduvate lindikujuliste juhtmetega *5*, mis on keritud rootori võllile *6* kinnitatud isoleerainest trumlile.

Trafo lülitusskeem ja mähiste paigutus on näidatud joonisel 12-20, *a*. Kui näiteks anda mähisele s_1s_2 vahelduv-



Joon. 12-20. Pöördtrafo mähiste lülitusskeem.

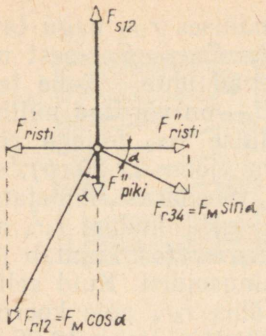
pinge, siis indutseeritakse rootorimähises r_1r_2 nagu tavalise trafo sekundaarmähiseski emj.: $E_{r12} = E_m$, sest mähiste s_1s_2 ja r_1r_2 telgjooned langevad ühte. Kahe teise mähise elektromotoorjõud E_{s34} ja E_{r34} on võrdsed nulliga, sest nende mähiste teljed on mähise s_1s_2 teljega risti. Kui pöörata rootorit nurga α võrra (joon. 12-20, *b*), siis $E_{r12} = E_m \cos \alpha$ ja $E_{r34} = E_m \sin \alpha$. Seepärast nimetatakse mähist r_1r_2 koosinusmähiseks, mähist r_3r_4 aga siinusmähiseks. Sõltuvust $E_{r34} = f(\alpha)$ kujutab joonisel 12-21 ülemine kõver *1* osa sinusoidist. Kuid sellise sõltuvuse saame vaid siis, kui mähis r_3r_4 pole koormatud. Kui lühistada mähis r_3r_4 läbi takisti z_2 (joon. 12-20, *b*), siis tekib tänu voolule I_{r34} magneetimisergutus F_{r34}, mille suund ühtib mähise r_3r_4 teljega, mis on näidatud joonisel 12-22.



Joon. 12-21. Pöördtrafo emj. sõltuvus rootori pöördenurgast.

See magneetimisergutus koosneb piki-magneetimisergutusest F''_{piki}, mille kompenseerib täielikult voolu suurenemine primaarmähises (nagu tavalises trafos), ja risti-magneetimisergutusest F''_{risti}. Viimane liitub magneetimisergutusega F_{s12}, moonutades trafo magnetvoogu ja järelikult ka kõverat $E_{r34} = f(\alpha)$, nagu on näidatud joonisel 12-21 (kõver *2*). Risti-magneetimisergutust võib kompenseerida mitmeti. Üks moodus oleks järgmine.

Mähisesse r_1r_2 lülitatakse takisti z_1 sellise arvestusega, et $z_1 + z_{12} = z_2 + z_{34}$, kus z_{12} ja z_{34} on vastavalt mähiste r_1r_2 ja r_3r_4 takistused. Selline lülitusskeem on näidatud joonisel 12-20, *c*. Siis iga nurga α puhul magneetimisergutus $F_{r34} = F_m \sin \alpha$ ja magneetimisergutus $F''_{risti} = F_m \sin \alpha \cos \alpha$. Teisest küljest magneetimisergutus $F_{r12} = F_m \cos \alpha$ ja tema komponent $F'_{risti} = F_m \cos \alpha \sin \alpha$. Seega on mõlemad risti-magneetimisergutused võrdsed ja



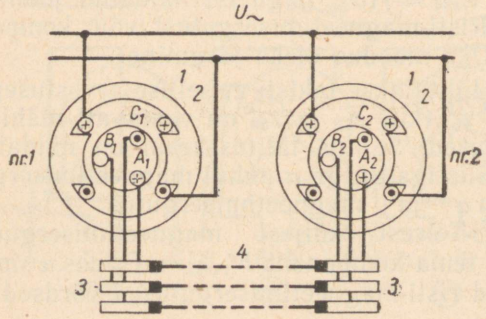
Joon. 12-22. Pöördtrafo risti-magneetimisergutuse kompenseerimist kujutav vektordiagramm.

kompenseerivad teineteist, joonisel 12-21 toodud kõver *2* muutub aga sinusoidiks. Lubatav ordinaatide vahe ei tohi suvalise nurga α korral olla suurem kui 0,05% sinusoidi ordinaadist.

12-12. Asünkroonmasinad sünkroonsidestuseks

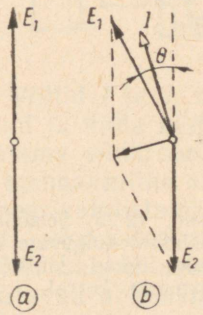
Elektrilistes järgivajamites kasutatakse väikesegabariidilisi induktsioonmasinaid, mida nimetatakse *selsüünideks*. Oma olemuselt on nad pöördtrafod, mille rootoril on peale mähise veel kontaktrõngad ja harjad ning millele on iseloomulik isesünkroniseerimisvõime. Sõnast «isesünkroniseerimine» (inglise keeles «self-synchronizing») tulenebki nende masinate nimetus.

Joonisel 12-23 on kujutatud kaks selsüüni. Iga selsüün on ehitatud järgmiselt: staatorile *1*, millel on alati vaid kaks väljepoolust, on paigutatud ühefaasiline ergutus-



Joon. 12-23. Selsüünide lülitusskeem lahkkõlastusnurga puudumise korral.

mähis *2*, mis on lülitatud vahelduvvooluvõrku. Rootori uuretes paikneb kolmefaasiline tähte ühendatud sünkroniseerimismähis, mille algused on joodetud kontaktrõngaste *3* külge. Selsüünid lülitatakse ühisesse vahelduvvooluvõrku ning nende rootorid on omavahel ühendatud läbi harjade ja sideliini *4*. Selsüünid töötavad alati paaris (andur — vastuvõtja). Töötagu joonisel 12-23 kujutatud selsüün nr. *1* signaalide andurina, selsüün nr. *2* aga nende vastuvõtjana. Lülitusskeemil näidatud selsüünid töötavad indikaatorirežiimis, mida kasutatakse siis, kui teostatakse kahe või enama omavahel mehhaaniliselt sidestamata masina või aparaadi võlli pöördenurga kaugülekannet.



Joon. 12-24. Selsüünide elektromotoorjõudude vektordiagrammid lahkkõlastusnurga puudumise ja olemasolu korral.

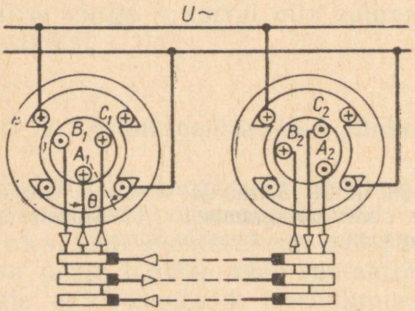
Joonisel 12-23 kujutatud rootorite asendis indutseerivad ergutusmähiste tekitatud vahelduvad magnetvood rootori faasimähistes elektromotoorjõud $E_{A1} = E_{A2}$, $E_{C1} = E_{C2}$, samal ajal kui E_{B1} ja E_{B2} võrduvad nulliga. Vool sideliinis *4* on võrdne nulliga, sest faasides A_1 ja A_2 ning C_1 ja C_2 toimivad teineteisele vastassuunas kaks võrdset elektromotoorjõudu. See olukord vastab kahe sünkroonmasina rööbiti töösse lülitamise hetkele (joon. 12-24, *a*).

Kui selsüüni nr. *1* rootoriga ühendatud mehhanismi pöörata või kui ta ongi juba mingil põhjusel pöördunud näiteks 30° võrra, siis on selsüüni nr. *1* rootori faasimähiste elektromotoorjõudude suunad sellised, nagu on näidatud joonisel 12-25. Elektromotoorjõud E_1 ja E_2 muutuvad kõigis faasimähistes võrdeliselt lahkkõlastusnurga Θ siinusega, mida joonisel 12-24, *b* näitab E_1 pöördumine nurga Θ võrra. Igas rootori faasimähistest koosnevas sule-

tud vooluringis toimib elektromotoorjõudude vahe ΔE ja kulgeb vool

$$I = \frac{\Delta E}{2z}.$$

Et rootori faasimähise aktiivtakistus on reaktiivtakistusega võrreldes väike, siis võime lugeda, et $z \approx x$ ja et vool jääb ΔE-st maha 90° võrra. Nagu sünkroonmasinas, nii on ka siin vool peaaegu faasis elektromotoorjõuga E_1 ja põhjustab pidurdusmomendi selsüüni nr. *1* rootori võllil ja pöördemomendi selsüüni nr. *2* võllil. Voolude suunad on näidatud joonisel 12-25. Selsüüni nr. *2* rootor püüab 30° võrra pöörduda. Kuid selsüüni-vastuvõtja pöördenurk jääb alati väiksemaks kui vaja, seda 0,25 ... 0,75°-se lahkkõlastusnurga võrra.

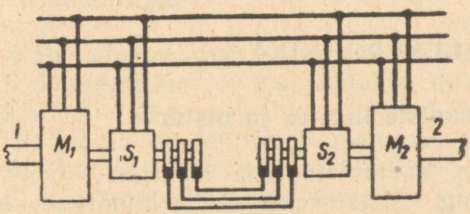


Joon. 12-25. Selsüünide mähistes kulgevate voolude toime lahkkõlastusnurga korral.

Konstruktsioonilt jaotatakse selsüünid anduriteks ja vastuvõtjateks; nad võivad olla kontaktidega selsüünid, nagu ülaltoodud näites, ja kontaktideta selsüünid. Neid valmistatakse nii koond- kui ka jaotatud mähisega; ergutusmähis võib olla nii rootoril kui ka staatoril. Selsüünipaar võib töötada ka transformaatorirežiimis, kus teda kasutatakse anduri ja vastuvõtja võllide vahelise lahkkõlastusnurga mõõtmiseks selsüüni-vastuvõtja väljundpinge suuruse järgi, mis on võrdeline selsüüni-anduri rootori pöördenurgaga. Selsüünide väljundvõimsus on kuni 20 W, kasutatav sagedus on 50, 400 või 500 Hz.

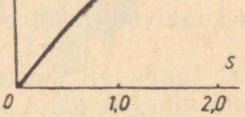
12-13. Elektrivõll

Eespool kirjeldatud masinate sünkroonse sidestamise põhimõtet kasutatakse ka nn. elektrivõlli puhul (joon. 12-26). Antud juhul on S_1 ja S_2 normaal-elektrimasinad, mis on mõeldud energia ülekandmiseks ühest süsteemi osast teise.



Joon. 12-26. Elektrivõlli skeem.

Võllid *1* ja *2*, mis pole omavahel mehhaaniliselt sidestatud ja mida käitavad eraldi mootorid M_1 ja M_2, peavad töötama sünkroonselt. Vahemaa võllide vahel on selline, et mehhaaniline sidestamine on kas tülikas või võimatu (paberivalmistamismasinad, portaalkraanad, karussellpingid, võimsates treipinkides käigukruvide asendamine jms.). Lahkkõlastusnurga tekkimisel võllide *1* ja *2* vahel tekitavad abimasinad S_1 ja S_2 täiendavad pöördemomendid, mis hoiavad peamootoreid M_1 ja M_2 sünkronismis.



Joon. 12-27. Elektrivõlli momendi sõltuvus libistusest.

Pöördemomendi sõltuvus libistusest $M = f(s)$ on kujutatud joonisel 12-27. Väikestel libistustel, kui masinate S_1 ja S_2 rootorid pöörlevad magnetvoo pöörlemise suunas, on arendatavad momendid väikesed. Suurte momentide ülekandmisel pöörlemiskiiruse muutumisel laiades piirides töötavad masinad S_1 ja S_2 magnetvälja pöörlemisele vastassuunas. Sel juhul on nii libistus kui ka momendid suured.

13. TÖÖSTUSELEKTROONIKA

13-1. Elektronseadiste liigitus ja otstarve

Elektroonika õpetab tundma elektron-, ioon- ja pooljuhtseadiste ning -riistade töötamispõhimõtteid, ehitust ja rakendusi.

Elektronseadisteks nimetatakse selliseid seadiseid, kus voolu tekkimine on seotud vaid elektronide liikumisega kõrge vaakuumi juures, mis välistab elektronide ja gaasi aatomite kokkupõrgete võimaluse. Sellesse seadiste rühma kuuluvad näiteks kahe ja kolme elektroodiga elektronlambid, mõningad fotoelemendid, elektronkiiretorud jms.

Elektronseadiseid kasutatakse alaldites, võimendites, generaatorites ja vastuvõtjates, samuti automaatika, telemehhaanika ning mõõte- ja arvutustehnika lülitustes.

Ioonseadisteks nimetatakse seadiseid, kus vool on seotud elektronide ja ioonide liikumisega, kusjuures ioonid tekivad gaasi või elavhõbedaauru ioniseerimisel liikuvate elektronidega. Nende hulka kuuluvad gasotronid, türatronid, elavhõbeventiilid jms.

Ioonseadised on elektronseadistest tunduvalt suurema inertsiga, sest iooni mass on elektroni massist palju suurem. Seepärast kasutatakse ioonseadiseid seadmetes, kus sagedus ei ületa mõnda kilohertsi, keskmise ja suure võimsusega alaldites, mitmesuguste mehhanismide automaatjuhtimise lülitustes ja mujal.

Pooljuhtseadisteks nimetatakse seadiseid, kus vool tekib elektronide ja aukude liikumisel ja kus kasutatakse ära mõningaid pooljuhtmaterjalide iseärasusi.

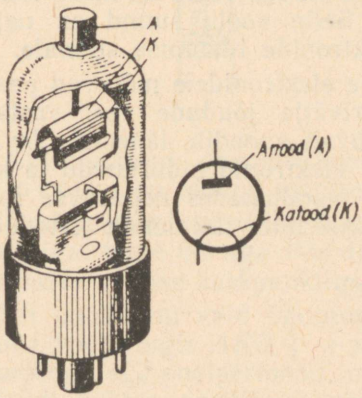
Viimasel ajal kasvab pooljuhtseadiste kasutamine pidevalt ja seda tänu mitmetele eelistele, võrreldes elektron-

ja ioonseadistega. Neist on tähtsamad järgmised: väike energiatarve, väikesed mõõtmed, pikk tööiga ja lihtne ekspluatatsioon. Reas raadiotehnika, energeetika, automaatika, telemehhaanika ja arvutustehnika harudes tõrjuvad pooljuhtseadised edukalt välja elektron- ja ioonseadised.

13-2. Väikese võimsusega elektronalaldid. Silumisfiltrid

Kahe elektroodiga elektronlamp ehk diood on metall-, keraamiline või klaasballoon, milles on kaks metallelektroodi — anood *A* ja katood *K* (joon. 13-1).

Balloonis on tekitatud vaakuum, mis ei juhi elektrivoolu. Lambis juhtivuse tekitamiseks vajalikud elektronid saadakse katoodi kuumutamisel kõrge temperatuurini (700 ... 2400° C) küttepatareist või -trafost saadava vooluga.



Joon. 13-1. Kaheelektroodilise elektronlambi ehitus ja tingmärk.

Selleks et väljuda metallkatoodist, peavad viimase pinnakihis asuvad elektronid ületama jõu, millega neile mõjuvad metalli positiivsed ioonid, s. t. elektronid peavad tegema nn. väljumistööd W_0. See on võrdne elektroni laengu e_0 ja väljumispotentsiaali φ korrutisega, s. t.

$$W_0 = e_0\varphi.$$

Suurus φ on igal metallil konstantne ja järelikult on konstantne ka väljumistöö W_0.

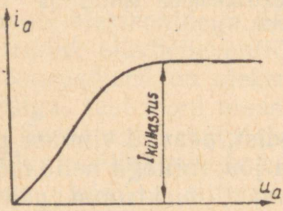
Väljumistööd mõõdetakse elektronvoltides (eV) ja ta on tavaliselt 1 . . . 6 eV.

Normaaltemperatuuril katoodi vabade elektronide kineetilisest energiast katoodist väljumiseks ei piisa. Katoodi temperatuuri tõstmisel vabade elektronide liikumiskiirus kasvab, osa neist saavutab kineetilise energia $mv^2/2$, millest piisab väljumistööks W_0, ja nad väljuvad katoodist. Elektronide väljumist kuumutatud metallist nimetatakse termoelektronemissiooniks.

Sageli kasutatakse volframkatoode, mis on töötemperatuuri alandamiseks ja emissioonivõime suurendamiseks kaetud õhukese kaltsium-, strontsium- või baariumoksiidi kelmega. Nende metallide väljumispotentsiaalid on väiksemad kui volframi väljumispotentsiaal.

Ühendades lambi katoodi toiteallika negatiivse ja anoodi positiivse klemmiga, s. o. rakendades lambile pinge u_a, mida nimetatakse anoodpingeks, saame lambi elektroodide vahel elektrivälja, mille mõjul elektronid hakkavad liikuma katoodilt anoodile, tekitades voolu i_a, mida nimetatakse anoodvooluks. Selle voolu suund on nagu juhtmeteski vastupidine elektronide liikumise suunale.

Katoodi lähedal asuvatele elektronidele mõjuvad peale anoodpinge tekitatud elektrivälja jõudude veel vastassuunalised jõud, mille tekitavad anoodile lähemal olevad elektronid. Selle tulemusena elektronid pidurduvad ja kogunevad katoodi lähedusse, moodustades negatiivse ruumilaengu, mis takistab elektronide väljalendu katoodist ja nende liikumist anoodile.



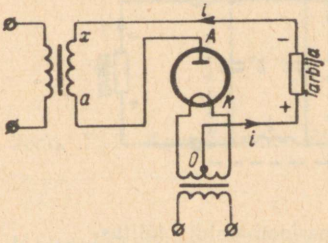
Joon. 13-2. Dioodi pinge-voolu karakteristik.

Anoodpinge u_a suurendamine põhjustab anoodvoolu i_a suurenemist vaid kindla väärtuseni — küllastusvooluni (joon. 13-2). Selle juures jõuavad kõik elektronid, mida katood antud temperatuuril emiteerib, anoodini,

järelikult on igas ajaühikus katoodilt lahkuvate elektronide arv võrdne anoodile jõudvate elektronide arvuga.

Ühendades lambi katoodi toiteallika plussiga ja anoodi miinusega, saame elektroodide vahel elektrivälja, mille mõjul katoodist väljunud elektronid pöörduvad katoodile tagasi, s. t. vool lampi ei läbi. Järelikult laseb lamp voolu läbi vaid ühes suunas ehk tal on ühesuunaline juhtivus. Sellise omadusega seadiseid nimetatakse elektrilisteks ventiilideks (suunajateks).

Kahe elektroodiga lampe kasutatakse sageli vahelduvvoolu alaldamiseks. Tööstusliku sagedusega voolu alaldamiseks kasutatavat elektronlampi nimetatakse kenotroniks.

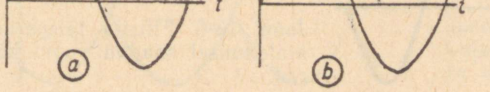


Joon. 13-3. Vahelduvvoolu alaldamine elektronlambi abil.

Lülitusskeem vahelduvvoolu poolperioodalaldamiseks on toodud joonisel 13-3.

Trafo sekundaarmähise üks klemm on ühendatud lambi anoodiga, teine on aga läbi tarbija ühendatud küttetrafo sekundaarmähise keskpunktiga *O*.

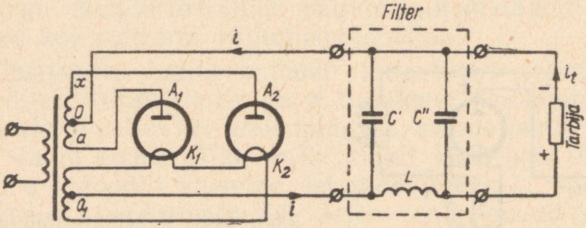
Et lambil on vaid ühesuunaline juhtivus, siis kulgeb vool i vooluringis $AKO + - xaA$ vaid sellel trafo sekundaarpinge u_{ax} poolperioodil, mille vältel lambi anood on katoodi suhtes positiivsel potentsiaalil. Järelikult läbib tarbija vooluringi perioodi vältel vaid üks voolu poollaine (joon. 13-4, *a*).



Joon. 13-4. Poolperiood-alaldamine.

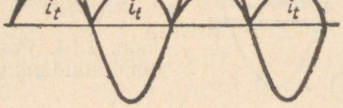
Selleks et vähendada voolu pulsatsiooni, lülitatakse tarbijaga rööbiti kondensaator *C*. Sel juhul toimub perioodi esimese veerandi vältel, mil trafo sekundaarpinge kasvab nullist maksimaalseni, kondensaatori laadimine. Perioodi ülejäänud osa kestel toimub kondensaatori tühjenemine läbi tarbija. Seega kulgeb vool i_t tarbijas kogu perioodi vältel (joon. 13-4, *b*).

Pulsatsiooni vähendamiseks kasutatakse ka drosselit (paispooli), mis lülitatakse tarbijaga jadamisi. Voolu kasvamisel salvestatakse pooli magnetvälja energiat. Voolu vähenemisel aga endainduktsiooni emj. tekitab täiendava samasuunalise voolu.



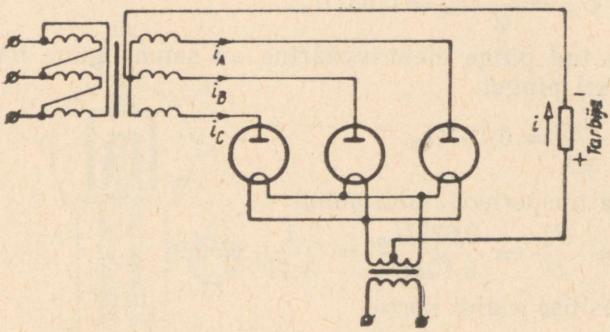
Joon. 13-5. Kenotronidega täisperiood-alaldi lülitusskeem.

Kui on vaja saada väga väikese pulsatsiooniga voolu, kasutatakse silumisfiltrit, mis koosneb poolist ja kondensaatorist või poolist ja kahest kondensaatorist (joon. 13-5). Kahe kenotroniga lülitusskeemis täisperioodalaldamiseks (joon. 13-5), kus kenotronid võib asendada ka ühe kahe anoodiga kenotroniga, on anoodid ühendatud trafo sekundaarmähise klemmidega. Sekundaarmähise keskpunkt on vooluringi miinuseks. Vooluringi plussiks on kenotronide katoode toitva küttemähise keskpunkt. Pinge u_{ax} ühe poolperioodi vältel kulgeb vool mööda teed *a*, A_1, K_1, O_1, *filter, tarbija, O, a,* s. o. läbi



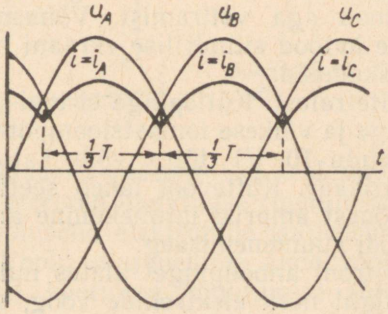
Joon. 13-6. Filtrita täisperioodalaldamisel saadud voolu kõverad.

ühe kenotroni, teisel poolperioodil aga mööda teed x, A_2, K_2, O_1, *filter, tarbija, O, x,* s. o. läbi teise kenotroni. Tarbija voolu i_t kõver filtrita täisperioodalaldamise korral on näidatud joonisel 13-6. Filtri kasutamine võimaldab saada tarbijas väga väikese pulsatsiooniga voolu.



Joon. 13-7. Kolmefaasilise alaldi lülitusskeem.

Kolmefaasilises alaldis (joon. 13-7) läbib vool igat kenotroni vaid $^1/_3$ perioodi vältel (joon. 13-8), sest omavahel ühendatud kenotronide katoodid on ühel potentsiaalil, vool aga kulgeb vaid läbi selle kenotroni, mille anoodi potentsiaal on kõige kõrgem (joon. 13-8). Kolmefaasilise alaldi alaldatud voolu pulsatsioon on tunduvalt väiksem kui vahelduvvoolu täisperioodalaldamisel saadava voolu pulsatsioon — see on kolmefaasilise alaldi suureks eeliseks.



Joon. 13-8. Joonisel 13-7 kujutatud alaldi pingete ja voolude kõverad.

Iga filtrita täisperioodalaldi alaldatud pinge (arvestamata pingelangu alaldis) on võrdne vahelduvpinge keskväärtusega poolperioodi ulatuses. Anoodpinge amplituudi $U_m = \frac{1}{2} U_{axm}$ (joon. 13-5) korral pinge keskväärtus

$$U_k = U_{al} = \frac{2}{\pi} U_m = 0{,}637 U_m.$$

Alaldatud pinge efektiivväärtus on samasugune nagu siinuselisel pingel:

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

Seega täisperioodalaldi puhul

$$\frac{U_{al}}{U} = \frac{U_k}{U} = \frac{0{,}673 U_m}{0{,}707 U_m} = \frac{1}{1{,}11} = 0{,}9;$$

kolmefaasilise alaldi korral

$$\frac{U_{al}}{U_f} = 1{,}17,$$

kus U_f on trafo (joon. 13-7) faasipinge efektiivväärtus.

13-3. Keskmise võimsusega ioonventiilid

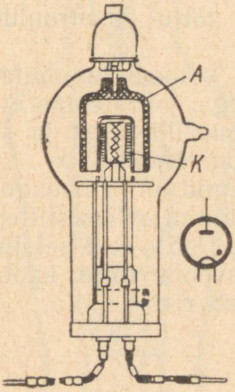
a) Gasotron

Gasotron on ioonseadis. Tema klaas- või metallballoon täidetakse pärast temas vaakuumi tekitamist elavhõbedaauruga või inertse gaasiga rõhuni 0,1 ... 0,5 mm elavhõbedasammast. Gasotronil on kaks elektroodi (joon. 13-9). Anood valmistatakse kas niklist või grafiidist, oksiidikihiga kaetud katood aga volframist. Võimsates gasotronides paigutatakse katood silindrilise ekraani keskele, mis vähendab soojuskadusid.

Katoodi toidetakse küttetrafost. Küttepinge ei tohi olla üle 5 V, sest suurema pinge ja väikese ionisatsioonipotentsiaali (elavhõbedal ligikaudu 10 V) tõttu võib katoodi otste vahel tekkida elektrikaar. Küttevool läheb seetõttu aga suureks, ulatudes mõnest amprist mitmekümne amprini, ja suureneb ka katoodi kuumenemisaeg.

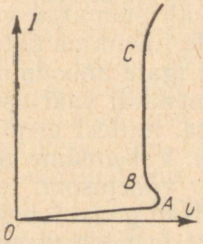
Kui me hakkame gasotroni anoodpinget alates nullist suurendama, siis tekib algul nõrk elektronide voog, sest

katoodi ja anoodi vahelises nõrgas elektriväljas on elektronide kiirused gaasi ioniseerimiseks väikesed. Sellele töörežiimile vastab gasotroni pinge-voolu karakteristiku lõik *OA* (joon. 13-10). Kui tõsta anoodpinget suuruseni, mis ületab pisut gaasi ionisatsioonipotentsiaali, siis saavad katoodilt lahkuvad elektronid elektrivälja mõjul



Joon. 13-9. Gasotron ja tema tingmärk.

kiiruse, millest piisab gaasi või elavhõbedaauru aatomite ergastamiseks ja ioniseerimiseks. Seega algab seadises gaasi ioniseerimine ja plasma tekkimine ning tekib k a a r l a h e n d u s, millele vastab gasotroni karakteristiku punkt *A*.



Joon. 13-10. Gasotroni pinge-voolu karakteristik.

Gaasi ioniseerimisel tekkinud positiivsed ioonid kompenseerivad negatiivse ruumilaengu katoodi lähedal, mille tulemusena elektronide emiteerimine suureneb.

Voolu suurenemine anoodvooluringi takistuse vähenemisel koormuse muutumise tõttu või toiteallika pinge

suurendamisel ei mõju peaaegu üldse pingelangule anoodi ja katoodi vahel.

Gasotroni tööreżiimile vastab tema pinge-voolu karakteristiku lõik *BC*. Edaspidine pinge ja voolu suurendamine (edasi punktist *C*) on lubamatu, sest see võib põhjustada gasotroni purunemise.

Gasotroni eeliseks vaakuumdioodi ees on see, et temal tekkiv pingelang on väiksem, mille tõttu gasotronidega alaldite kasutegur on kõrgem.

Nagu märgitud, kulub gasotroni katoodi kuumutamiseks töötemperatuurini rohkem aega. Töötemperatuur tuleb saavutada enne anoodpinge sisselülitamist ja seda selleks, et katood ei kaotaks emissioonivõimet.

Gasotronidega alaldite lülitusskeemid on samasugused nagu vaakuumdioodidega alalditel, ainult silumisfilter ei tohi alata kondensaatorist (*C'*, joon. 13-5), sest sel juhul võib katood kondensaatori laadimisvoolu tõttu kaotada emissioonivõime, s. t. gasotron langeb rivist välja.

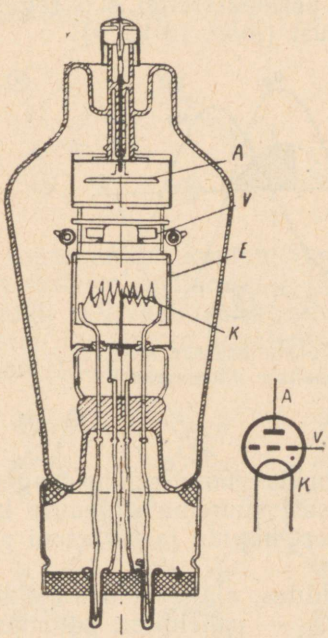
b) Türatron

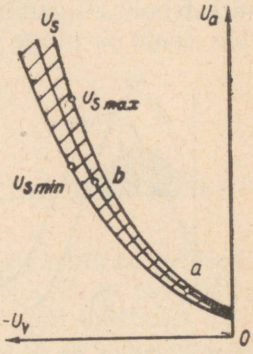
Türatron erineb gasotronist kolmanda elektroodi — võre poolest (joon. 13-11), mis on nagu ukseks, mis suleb või avab tee anoodvoolule. Türatroni katood on ümbritsetud metallekraaniga, mille ülemine ava on kaetud aukliku kettakujulise võrega. Ekraan suunab anoodi ja katoodi vahelise elektrivälja ainult läbi võre.

Kui anda võrele katoodi suhtes negatiivne potentsiaal, siis on katoodi ja võre vaheline elektriväli suunatud vastupidi türatroni põhiväljale ja elektronide liikumine katoodilt anoodile aeglustub. Seega vastavad igale anoodpinge väärtusele sellised võre negatiivse potentsiaali väärtused, mille puhul elektronid liiguvad kiirusega, millest ei piisa gaasi või elavhõbedaauru ioniseerimiseks. Vähendame võre negatiivset potentsiaali mingi kriitilise väärtuseni: siis saavutavad elektronid kiiruse, millest piisab gaasi ioniseerimiseks ning järelikult süttib elektrikaar ja tekib plasma. Põleva elektrikaare korral on võre kaetud positiivsete ioonide kihiga, mis neutraliseerib võre negatiivse laengu, ja see ei mõju enam anoodvoolule. Seepärast tuleb elektrikaare kustutamiseks vähendada anoodpinget väärtuseni, mis on lähedane nullile.

Konstantse võre ja katoodi vahelise pinge u_v korral

süttib elektrikaar mingil anoodpingel u_a, järelikult võib võrepinge muutumisega reguleerida anoodpinge väärtust u_s, mille juures türatron süttib.





Joon. 13-12. Türatroni süütekarakteristik ja süütepiirkond.

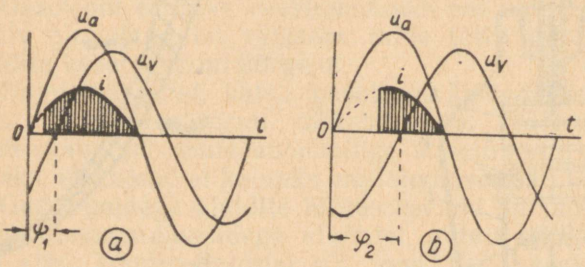
◀Joon. 13-11. Türatron ja tema tingmärk.
A — anood; *K* — katood; *V* — võre; *E* — ekraan.

Süttimispinge u_s ja võrepinge u_v vahelise sõltuvuse kõverat nimetatakse türatroni s ü ü t e k a r a k t e r i s t i k u k s (joon. 13-12). Mingi kindla võrepinge korral toimub anoodpinge tõstmisel süttimine pingete $u_{s\,min}$ ja $u_{s\,max}$ vahel, sest süütepinge sõltub rõhust kolvis, ümbritseva keskkonna temperatuurist, võrevooluringi takistusest, küttevoolust jms. Seepärast antaksegi tavaliselt süütekarakteristiku asemel süütepiirkond, mis on piiratud kõveratega $u_{s\,min}$ ja $u_{s\,max}$ (joon. 13-12).

Kui türatron töötab alaldis, siis ta ühe perioodi jooksul positiivse anoodpinge korral üks kord süttib ja üks kord kustub, kui anoodpinge läheneb nullile. Anname võrele anoodpingega u_a sama sagedusega vahelduvpinge u_v, mis on esimese suhtes nurga ψ_1 võrra nihutatud (joon. 13-13, *a*). Süttimine toimub siis, kui negatiivne võrepinge vähe-

neb ja anoodpinge suureneb nii, et mõlemad pinged vastavad mingile süütekarakteristiku punktile *a* (joon. 13-12).

Muutes võrepinge faasi, saab muuta türatroni süttimishetke (punkt *b* joonisel 13-12). Seega saab reguleerida anoodvoolu kulgemise kestust perioodi vältel, s. o. reguleerida voolu ja pinge keskväärtusi (joon. 13-13, *b*).



Joon. 13-13. Türatroni pinge ja voolu kõverad erinevate anood- ja võrepinge vaheliste nihkenurkade korral.

Türatrone kasutatakse vahelduvvooluringides sagedusega mitte üle 1 ... 10 kHz, sest suurema sageduse korral ei jõua laengud võre ümbert hajuda ja türartoni pole enam võimalik tüürida.

Türatrone kasutatakse alaldites, alalisvoolu vahelduvvooluks muundavates seadmetes — vaheldites, automaatikas, telemehhaanikas ja elekterkeevitusseadmetes.

13-4. Pooljuhtide elektrijuhtivus

a) Omajuhtivus

Pooljuhid on materjalid, mis juhtivuse seisukohalt asuvad juhtide ja dielektrikute vahel. Juhtide eritakistus on 0,017 ... 1,4 Ω mm^2/m, pooljuhtidel aga $10^2 \ldots 10^{14}$ Ω mm^2/m.

Pooljuhte iseloomustab tugev juhtivuse sõltuvus temperatuurist, elektrivälja ja magnetvälja tugevusest, valgustatusest, survest materjalile jne.

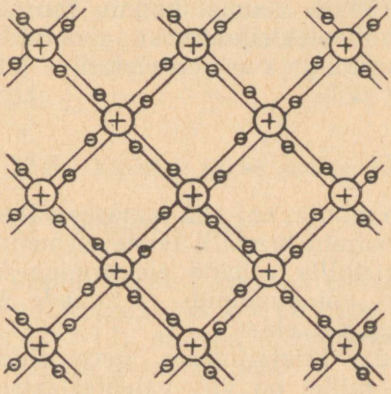
Elektrotehnikas on laialdasemat kasutamist leidnud germaanium, räni, seleen, vaskoksiid jt.

Kahe naaberaatomi keemilist sidet, mis on tingitud ühel orbiidil tiirleva ühise elektronpaari (joon. 13-14, *a*) moodustumisest, nimetatakse kovalentseks sidemeks. Tinglikult kujutatakse seda kahe aatomeid ühendava joone abil (joon. 13-14, *b*).



Joon. 13-14. Aatomite kovalentne side.

Germaanium kuulub Mendelejevi elementide perioodilise süsteemi neljandasse rühma. Järelikult on tal välisel orbiidil neli valentselektroni. Germaaniumi kristallis moodustab iga aatom kovalentse seose nelja naaberaatomiga (joon. 13-15).



Joon. 13-15. Germaaniumi kristallivõre elektronpaarsidemete skeem.

Absoluutsele nullile lähedasel temperatuuril on lisanditeta germaaniumi kristallis kõik aatomite valentselektronid omavahel seotud, vabu elektrone pole ja järelikult kristalli juhtivus puudub. Temperatuuri tõstmisel elektronide energia kasvab, mis viib osaliselt kovalentsete seoste rikkumisele ja vabade elektronide tekkimisele. Germaanium muutub pooljuhiks juba toatemperatuuril.

Välise elektrivälja mõjul vabad elektronid paiknevad ümber, tekitades elektronjuhtivuse (*n*-juhtivuse).

Sel hetkel, kui tekib vaba elektron, tekib kovalentses sidemes vaba koht — a u k.

Augu olemasolu korral võib mõni valentselektron asuda augu kohale ja normaalne side sel kohal taastub, teises kohas aga osutub rikutuks; selle uue augu võib omakorda täita mõni teine elektron jne. Välise elektrivälja mõjul toimub aukude liikumine välja suunas.

Aukude nihkumine on samaväärne selliste positiivsete laengute liikumisega, mille suurus on võrdne elektroni laenguga. Seda protsessi nimetatakse a u k j u h t i v u s e k s (*p*-juhtivus).

Seega koosneb pooljuhi juhtivus elektron- ja aukjuhtivusest.

Kovalentsete sidemete rikkumisel tekib kristallis üheaegselt ühesugune arv vabu elektrone ja auke. Kui temperatuuri tõusul ühest küljest toimub elektron-auk-paaride moodustumine, siis teisest küljest toimub ka nende osaline taasühinemine (rekombinatsioon). Igal temperatuuril jääb paaride keskmine arv kristalli ruumalaühikus konstantseks. Lisanditeta pooljuhi elektrijuhtivust nimetatakse pooljuhi o m a j u h t i v u s e k s ja see on metallide juhtivusega võrreldes ääretult väike.

b) Lisandjuhtivus

Pooljuhi omadusi saab muuta, kui viia temasse vähesel hulgal lisandeid. Viies pooljuhi kristalli teiste elementide aatomeid, võib saada kristallis vabade elektronide ülekaalu aukudega võrreldes või vastupidi — aukude ülekaalu vabade elektronidega võrreldes.

Kui näiteks asendada kristallivõres germaaniumi aatom arseeni aatomiga, millel on viis valentselektroni, moodustavad neli arseeni elektroni normaalsed sidemed naabruses olevate germaaniumi aatomitega, viies elektron aga, mis on arseeni aatomiga nõrgalt seotud, muutub vabaks elektroniks. Kaotanud viienda valentselektroni, muutub arseeni aatom positiivseks iooniks. Nende lisandilt saadud elektronide tõttu pooljuhi juhtivus suureneb.

Kui aga asendada germaaniumi aatom indiumi aatomiga, millel on kolm valentselektroni, siis moodustab see kovalentse sideme kolme germaaniumi aatomiga. Side neljanda germaaniumi aatomiga puudub, sest indiumil pole neljandat elektroni. Kõikide sidemete loomine on võima-

lik, kui puuduv elektron saadakse lähimalt germaaniumi aatomilt. Pidev katkenud (puuduvate) sidemete taasloomise protsess on samaväärne aukude liikumisega pooljuhis. Seega tekitab indiumlisand germaaniumkristallis aukjuhtivuse.

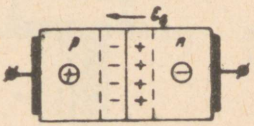
Pooljuhte, kus on ülekaalus elektronjuhtivus, nimetatakse *n*-tüüpi pooljuhtideks (ladinakeelsest sõnast negative — negatiivne), aukjuhtivuse ülekaaluga pooljuhte aga *p*-tüüpi pooljuhtideks (ladinakeelsest sõnast positive — positiivne). Laengukandjaid, mis määravad legeeritud (lisandiga) pooljuhi juhtivuse liigi, nimetatakse enamus-laengukandjateks (elektronid *n*-pooljuhis ja augud *p*-pooljuhis), vastupidise märgiga laengukandjaid aga vähemus-laengukandjateks.

Sõltuvalt lisandi sisaldusest kasvab legeeritud pooljuhi elektrijuhtivus puhta pooljuhiga võrreldes kümneid ja sadu tuhandeid kordi. Kui näiteks normaaltingimustel on 1 cm^3-s puhtas germaaniumis umbes 10^{22} aatomit ja 10^{13} juhtivuselektroni ning auku, siis 0,001% suurune kogus arseeni tekitab samas ruumalas täiendavalt 10^{17} juhtivuselektroni, mille tulemusena elektronjuhtivus kasvab umbes 10 000 korda.

13-5. Väikese ja keskmise võimsusega pooljuhtalaldid

a) Pooljuhtventiil

Pooljuhtventiil kujutab endast kahe pooljuhi kontaktühendust, kus üks on elektron- ja teine aukjuhtivusega (joon. 13-16), näitena võiks nimetada *p*-tüüpi germaaniumi ja *n*-tüüpi germaaniumi.

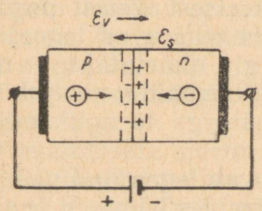


Joon. 13-16. Pooljuhtventiil.

Selle tõttu, et *n*-pooljuhis on elektronide kontsentratsioon suurem kui *p*-pooljuhis, toimub elektronide difusioon esimesest pooljuhist teise. Analoogiliselt toimub aukude difusioon *n*-pooljuhti.

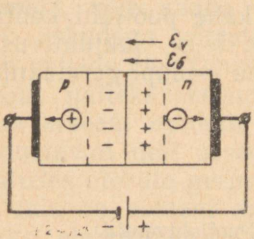
n-pooljuhi piirikihis tekib positiivne laeng, *p*-pooljuhi

piirikihis aga negatiivne laeng. Erinimeliselt laetud kihtide vahel tekib elektriväli väljatugevusega $\mathcal{E}_s$. See takistab edaspidist difusiooni, mis lõpeb siis, kui elektrivälja jõud ja difusiooni põhjustavad jõud saavad võrdseks. Sellist piirikihti, kus põhiliste laengukandjate arv on vähenenud, nimetatakse tõkkekihiks ehk *p-n*-siirdeks.



Joon. 13-17. Ventiili pingestamine pärisuunas.

Ühendades toiteallika positiivse klemmi *p*-pooljuhi metallelektroodiga ja negatiivse klemmi *n*-pooljuhi elektroodiga, saame välise elektrivälja, mis on suunatud vastupidiselt *p-n*-siirde väljale ja mille mõjul hakkavad elektronid ja augud üksteisele vastu liikuma (joon. 13-17). Sellisel elektronide ja aukude liikumisel kasvab enamuslaengukandjate arv tõkkekihis ning vähenevad tõkkekihi paksus ja takistus. Seega tekib vooluringis vool, mida nimetatakse pärivooluks I_p ja mis on küllalt suur ka suhteliselt väikeste pingete juures.



Joon. 13-18. Ventiili pingestamine vastusuunas.

Ühendades toiteallika ja ventiili klemmid vastupidiselt (joon. 13-18), saame *p-n*-siirde elektriväljaga samasuunalise tugevdava välise välja. Nüüd takistab väli veel enam enamus-laengukandjaid tõkkekihist läbi tungimast. Peale selle põhjustab väline väli *n*-pooljuhis elektronide ja *p*-pooljuhis aukude eemaldamist tõkkekihist. Seetõttu tõkkekihi paksus ja takistus kasvavad. Vool, mida sel juhul

nimetatakse v a s t u v o o l u k s I_v, on väga väike ja praktikas võib teda paljudel juhtudel lugeda võrdseks nulliga.

Kahe eri liiki juhtivusega pooljuhi kontaktühendus on seega ühesuunalise juhtivusega ja kujutab endast ventiili.

Voolude suhet ühesuguse pinge korral

$$k_a = \frac{I_p}{I_v}$$

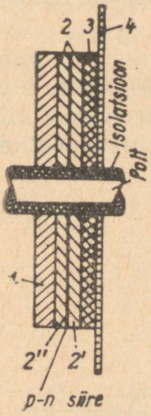
nimetatakse a l a l d u s t e g u r i k s.

b) Vaskoksiidventiil

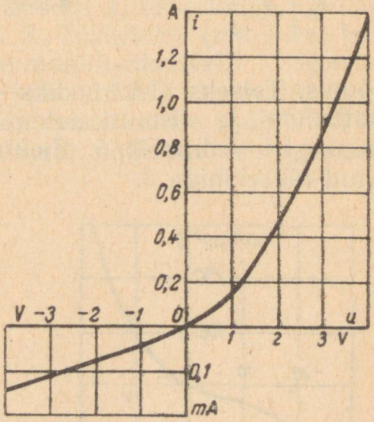
Vaskoksiidventiil (joon. 13-19) koosneb vaskkettast *1*, millele tekitatakse vaskoksiidikiht *2*. Viimasele liibub parema kontakti saamiseks pliiketas *3*, millele järgneb õhuke suure läbimõõduga messingketas *4* — soojuse ärajuhtimiseks mõeldud radiaator.

Vaskoksiidi (CuO_2) kiht saadakse vase termilisel töötlemisel hapnikus. Vaskoksiidi väliskiht *2'*, mis tekib hapniku ülekülluses, on *p*-juhtivusega. Vaskketta vastas olev sisemine oksiidikiht *2''*, mis tekib hapniku puudujäägi puhul, on aga *n*-juhtivusega. Kahe vaskoksiidi kihi vahel tekib *p-n*-siire.

Ventiilile lubatav pinge ei ületa 8 ... 10 V, sest 20 ...



Joon. 13-19. Vaskoksiidventiili ehitus.

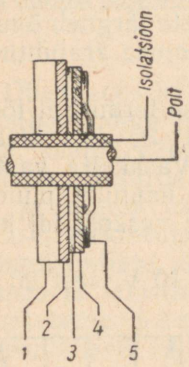


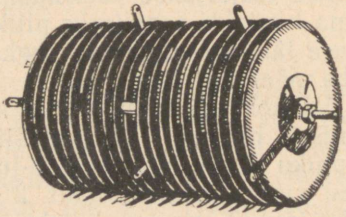
Joon. 13-20. Vaskoksiidventiili pinge-voolu karakteristik.

30-voldise vastupinge korral tekib läbilöök. Suuremate pingete puhul monteeritakse alaldamiseks mitu ventiili ühele poldile, mis moodustavad alaldi samba. Jahutamise parandamiseks kasutatakse radiaatorseibe. Temperatuur ei tohi tõusta üle 55°, vastasel juhul võib ventiil kaotada oma suunavad omadused. Ventiili pinge-voolu karakteristik on toodud joonisel 13-20.

c) Seleenventiil

Seleenventiil (joon. 13-21) koosneb alumiinium- või teraskettast *1*, mis on ühelt poolt kaetud aukjuhtivusega kristallilise seleeni kihiga 2. See ketas on ka üheks elekt-

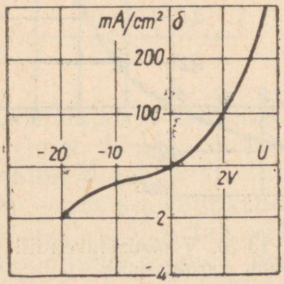




Joon. 13-22. Seleenventiilidest sammas.

◀Joon. 13-21. Seleenventiili ehitus.

roodiks. Teiseks elektroodiks *4* on seleenile kantud tina, kaadmiumi ja vismuti sulamist kiht, mille vastu liibub messingist vedruseib *5*. Elektroodid on teineteisest eraldatud tõkkekihiga *3*.



Joon. 13-23. Seleenventiili pinge-voolu karakteristik.

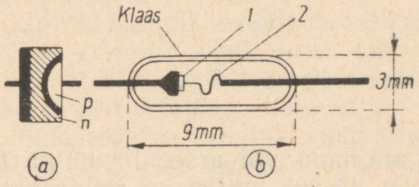
Seleenventiilile lubatav pinge on 20 ... 40 V. Ventiili läbilöök toimub vastupingel 60 ... 80 V.

Joonisel 13-22 on kujutatud seleenventiilidest sammas, joonisel 13-23 aga ventiili pinge-voolu karakteristik.

d) Germaanium- ja räniventiilid

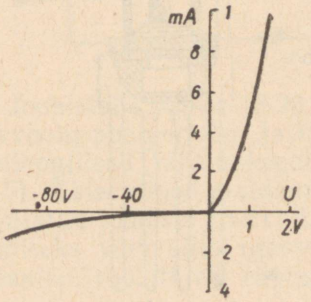
Germaanium- ja ränidioodides kasutatakse germaanium- või ränikristalli ja metalli vahelises *p-n*-siirdes toimuvaid nähtusi.

Neid dioode valmistatakse punkt- ja pinddioodidena.



Joon. 13-24. Germaanium-punktdiood.

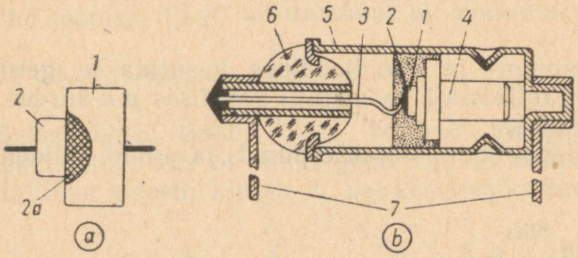
Д1Г-tüüpi germaanium-punktdiood (joon. 13-24) koosneb umbes 3 mm läbimõõduga ja 10 mm pikkusest klaasist (või ka metallist ja klaasist) kestast, millesse on joodetud kaks traadist väljaviiku. Ühe otsale neist on kinnitatud *n*-juhtivusega germaaniumkristall *1*, teise külge aga peen terava otsaga indiumtraat *2*. Tõkkekiht (*p-n*-siire) moodustub *n*-juhtivusega germaaniumkristalli sügavuses traadi teritatud otsa all (joon. 13-24, *a*) formeerimisel, s. o. vooluimpulsside läbilaskmisel, mille mõjul indiumi aatomid tungivad germaaniumkristalli, moodustades pool-



Joon. 13-25. Germaanium-punktdioodi pinge-voolu karakteristik.

kerakujulise aukjuhtivusega piirkonna. Selle poolkera pinnal tekibki *p-n*-siire.

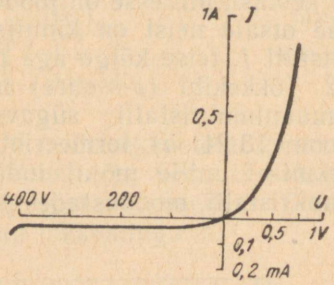
Selle dioodi maksimaalne alaldatud vool on 16 mA. Maksimaalne lubatav vastupinge — 50 V. Dioodi pinge-voolu karakteristik on toodud joonisel 13-25.



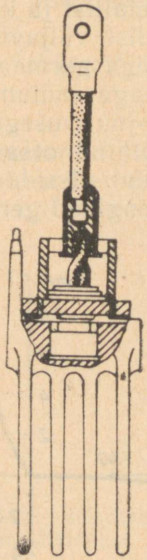
Joon. 13-26. Д-7-tüüpi germaanium-pinddiood.

Pinddiood koosneb antimon- või arseenlisandiga germaaniumplaadist *1* (joon. 13-26), millel on elektronjuhtivus, ja indiumplaadist *2*.

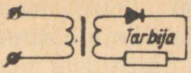
Pinddioodi valmistamisel kuumutatakse germaaniumi



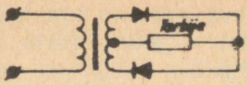
Joon. 13-27. Pinddioodi pinge-voolu karakteristik.



Joon. 13-28. Räniventiil BK-100. ▶



Joon. 13-29. Poolperiood-alaldamine.



Joon. 13-30. Täisperiood-alaldamine.

pinnale asetatud indiumplaati indiumi sulamistemperatuurini. Seejuures tungivad indiumi aatomid germaaniumisse, moodustades aukjuhtivusega piirkonna 2*a*. Selle piiril tekib *p-n*-siire.

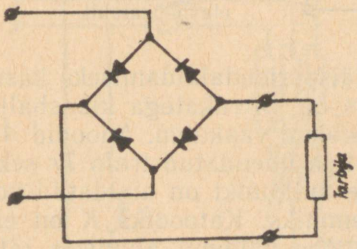
Joonisel 13-26, *b* on näidatud ühe Д-7 tüüpi germaanium-pinddioodi ehitus.

Ligi 20 mm pikkusesse metallkesta *5* on kinnitatud vooluvõtja *4*, mille ühel otsal asub germaaniumkristall *1*. Indiumist elektrood *2* on ühendatud ühega väljaviikudest *7* isolaatorit *6* läbiva vooluvõtja *3* abil.

Maksimaalne lubatav vastupinge on 50 V. Alaldatud vool — 300 mA. Joonisel 13-27 on toodud dioodi pinge-voolu karakteristik.

Germaanium- ja räniventiile ehk jõudioode valmistatakse nimivooludele kuni 100 A.

Joonisel 13-28 on kujutatud õhkjahutusega räniventiil BK-100 nimivooluga 100 A.



Joon. 13-31. Alaldi sildlülitus.

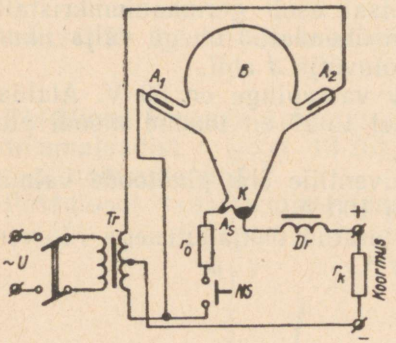
Joonistel 13-29 ja 13-20 on toodud lülitusskeemid vahelduvvoolu poolperiood- ja täisperiood-alaldamiseks, mis on analoogilised lülitusskeemidega lampidel (joon. 13-3 ja 13-5). Täisperiood-alaldamiseks kasutatav sildlülitus on kujutatud joonisel 13-31. Alaldatud pinge ja voolu suurendamiseks võib silla igasse õlga lülitada mitu omavahel jadamisi, rööbiti või rühmiti ühendatud ventiili.

Kasutegur on vaskoksiidalalditel 50...60%, seleenalalditel — 80...90%, germaanium- ja ränialalditel — üle 90%.

Alaldid on leidnud laialdast kasutamist elektrolüüsivannide toitmisel, akupatareide laadimisel, elektrimootorite ja aparaatide toitmisel mõõtetehnikas, automaatikas, raadiotehnikas jne.

13-6. Suure võimsusega elavhõbealaldid

Ehituselt jagatakse elavhõbealaldid klaas- ja metallalalditeks. Faaside arvu järgi jagatakse nad ühe- ja kolmefaasilisteks, anoodide arvu järgi ühe-, kahe-, kolme- ja kuueanoodilisteks.



Joon. 13-32. Ühefaasiline elavhõbealaldi.

Lihtsaima ühefaasilise täisperioodalaldamiseks kasutatava elavhõbeventiili kereks on varrukatega klaasballoon B (joon. 13-32), milles on loodud vaakuum. Anoodid A_1 ja A_2 on valmistatud grafiidist ja ühendatud trafo Tr sekundaarmähisega. Selle mähise nullpunkt on alaldatud voolu vooluringi negatiivseks klemmiks. Katoodiks K on elavhõbe ballooni põhjas. Elavhõbe ballooni alumises jätkus kujutab endast süüteanoodi A_s.

Alaldi käivitamiseks lülitatakse sisse vahelduvpinge, vajutatakse surunupplülitile NS ja kallutatakse ettevaatlikult ballooni nii, et katoodi ja süüteanoodi elavhõbe ühineksid. Trafo sekundaarmähise alumises pooles toimiva emj. mõjul tekib vool läbi takisti r_0 ja süüteanoodi ning katoodi vahelise elavhõbedasilla.

Ballooni vertikaalasendisse tagasiviimisel elavhõbeda-

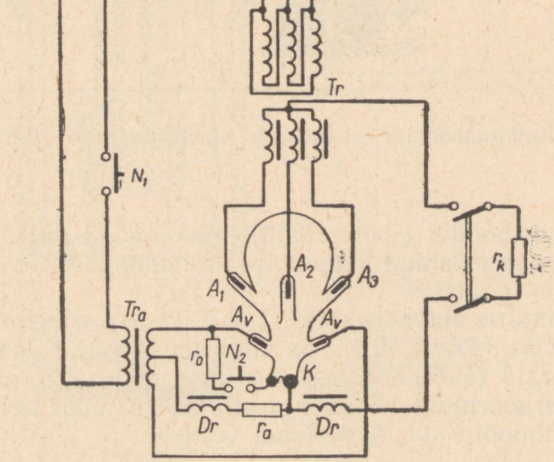
sild katkeb, kusjuures tekib elektrikaar ja katood hakkab emiteerima vabu elektrone. Elektrivälja mõjul suunduvad vabad elektronid katoodilt sellele anoodile, mille potentsiaal on sel hetkel katoodi suhtes positiivne. Liikumisel elektronid ioniseerivad elavhõbedaauru ning katoodi ja anoodi vahel tekib kaarlahendus. Pärast seda lastakse surunupplüliti *NS* vabaks.

Elektrikaare korral tekib katoodi elavhõbedal nn. katoodtäpp, millega kaasneb elavhõbeda aurumine ja intensiivne elektronide emiteerimine. Katoodtäpi ning järelikult ka elektrikaare alalhoidmiseks peab anoodvool olema vähemalt 4 ... 5 A. Kui ühe anoodi pinge langeb alla kriitilise, siis drossel *Dr* (joon. 13-32) takistab voolu vähenemist, mis on vajalik selleks, et kaar põleks nii kaua, kuni vool hakkab pärast anoodpingete märgi muutumist kulgema läbi teise anoodi. Nii põleb elektrikaar pidevalt ja pidevalt kulgeb ka vool koormuse r_k vooluringis.

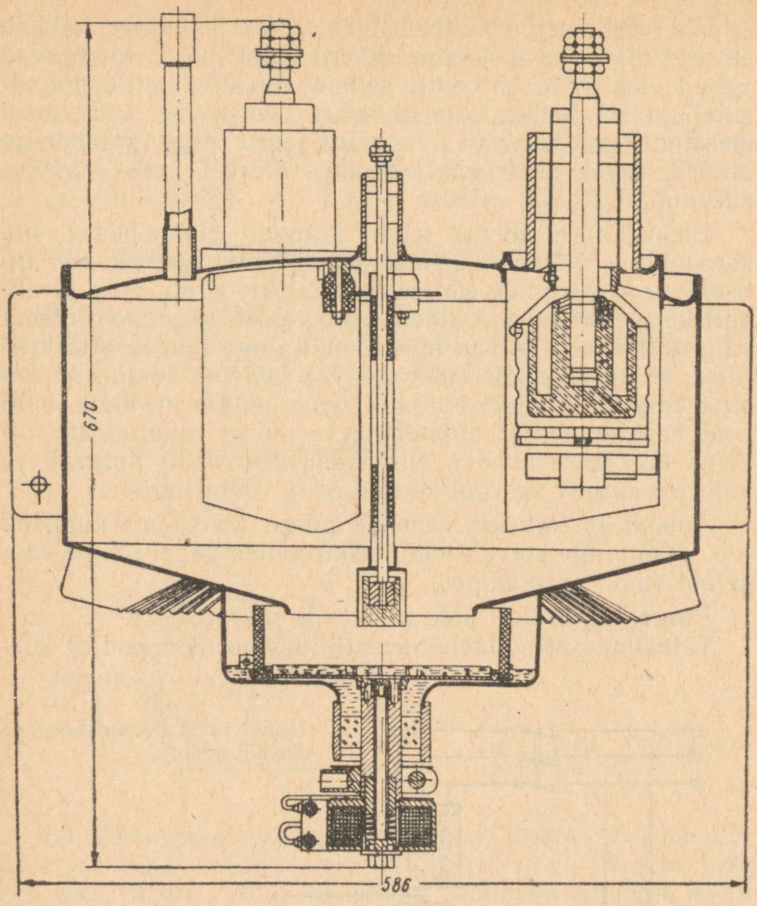
Anoodi ja katoodi vahelise pinge märgi muutumisel, s. o. vastupinge korral, tekib elektroodide vahel tühine vastuvool (mõni milliamper).

Pingelang alaldil pole tavaliselt suur (20 V).

Täiuslikumates elavhõbeventiilides on tööanoodide kõr-



Joon. 13-33. Kolmefaasiline elavhõbealaldi.



Joon. 13-34. Kolmeanoodilise pumpadeta elavhõbeventiili läbilõige.

val veel valveanoodid (joon. 13-33), mis saavad toite abitrafolt ja mis on mõeldud katoodtäpi alalhoidmiseks, sõltumata koormusvoolust.

Kolmefaasiline elavhõbealaldi (joon. 13-33) erineb ühefaasilisest selle poolest, et tal on kolm tööanoodi. Need on ühendatud trafo tähtühenduses sekundaarmähisega, mille nullpunkt on koormuse vooluringi miinuseks. Vool kulgeb läbi iga tööanoodi vaid $^1/_3$ perioodi vältel.

Klaasist kerega elavhõbealaldeid valmistatakse nimivooludele kuni 500 A ja pingetele kuni 600 V.

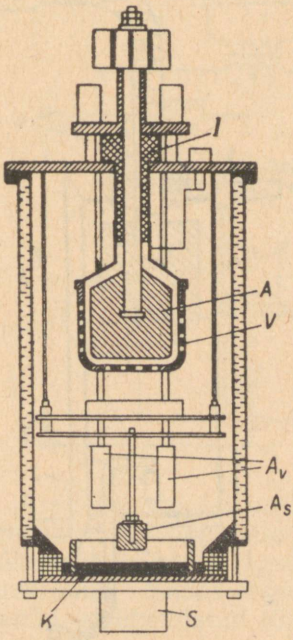
Klaasist kerega elavhõbeventiilide kõrval valmistatakse mitmeanoodilisi metallist elavhõbeventiile. Joonisel 13-34 on näidatud metallkerega kolmeanoodilise õhkjahutusega ventiili ehitus. Ventiili nimivool on 200 A ja nimipinge 250 V.

Võimsates tüüp-alaldusseadmetes kasutatakse komplekte mitmest ühefaasilisest metallkerega ventiilist nimivooluga 10 ... 12 kA.

Ühefaasilise ventiili ehitus on näidatud joonisel 13-35.

Ventiili kereks on metallsilinder, mille seintes on kanalid jahutusvee jaoks. Silindri kaanele on kinnitatud grafiidist tööanood A, valveanoodid A_v, süüteanood A_s ja sisestused võrele V. Katood K koosneb kerest isoleeritud anuma põhjast ja sellel olevast äärikust, mille sees on elavhõbe.

Süüteseadiseks on õõnessilinder koos temasse paigutatud elektromagneti südamikuga. Normaalselt hoiab vedru



Joon. 13-35. Ühеanoodilise elavhõbeventiili läbilõige.
A — anood; K — katood; V — võre; A_v — valveanood; A_s — süüteanood; S — süüteseadis; I — anoodi isolatsioon.

südamikku ülemises asendis. Kui elektromagneti pooli läbib vooluimpulss, siis südamik laskub alla ja tõrjub elavhõbeda õõnessilindrist välja. Kere põhjas olevast avast paiskub välja elavhõbedajuga. See juga suleb katoodi ja süüteanoodi ühise vooluringi. Joa katkemisel süttib elektrikaar.

Võre annab üheanoodilises elavhõbeventiilis nagu türatroniski võimaluse reguleerida kaare süttimishetke.

Ventiilide komplektid, mis koosnevad tavaliselt kuuest või kaheteistkümnest ventiilist, monteeritakse pumbaseadmega ühele raamile. Pumpa kasutatakse vaakuumi hoidmiseks ventiilides. Näiteks koosneb PMHB-500 × 12-tüüpi komplekt 12 ventiilist alaldatud voolu nimiväärtusega 6 kA ja alaldatud pinge nimiväärtusega 600 V.

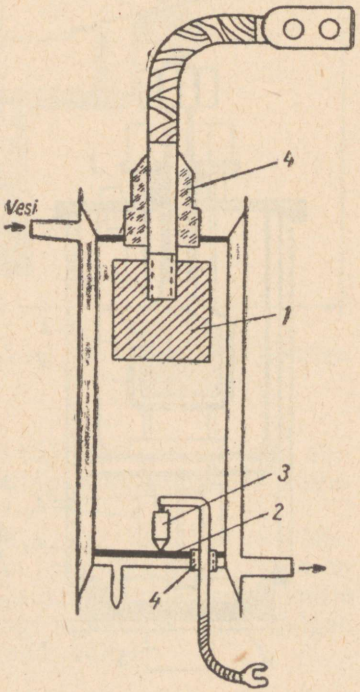
Elavhõbealaldeid kasutatakse elektrolüüsiseadmetes ning tööpinkide, mehhanismide, võimsate kraanade ja elektriraudteede toitmiseks.

13-7. Ignitron

Ignitron kujutab endast üheanoodilise elavhõbeventiili erivarianti.

Ignitroni (joon. 13-36) metallkere on terassilinder, mille seintes on kanalid jahutusvee jaoks. Keres asuvad süsianood *1*, elavhõbekatood *2* ja süüteelektrood (süütur) *3*, mis asendab üheanoodilises elavhõbeventiilis olevaid valveanoode ja süüteanoodi.

Süütur kujutab endast karborundist või mõnest teisest pooljuhtmaterjalist teravikuga varrast. Karborund elavhõbedas ei märgu, selle



Joon. 13-36. Ignitron.
1 — anood; *2* — elavhõbekatood; *3* — süüteelektrood; *4* — isolaator.

tulemusena tekivad süüturist vooluimpulsi läbilaskmisel kohal, kus ta puutub kokku elavhõbedaga, väikesed sädemed, mis lähevad kiiresti üle katoodi ja anoodi vaheliseks kaarlahenduseks.

Muutes süütevooluringis impulsside andmise aega, võib kaare süttimishetke reguleerida nagu türatroniski.

Pingelang ignitronil pole suur — 15 ... 20 V.

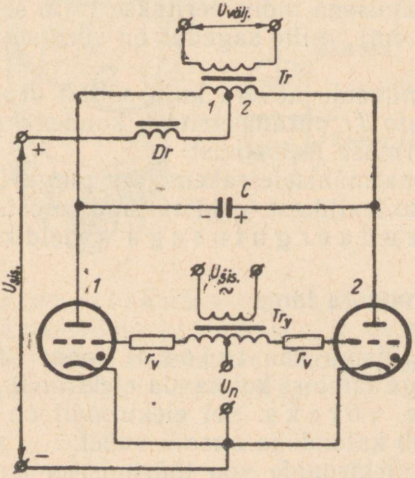
Klaaskerega ignitrone valmistatakse vooludele kuni 100 A, metallkerega ignitrone aga vooludele kuni 300 ... 500 A ja enam.

Ignitrone kasutatakse võimsates alaldusseadmetes, vaheldites, elekterkeevitusseadmetes ja mujal.

13-8. Vaheldi

Invertoriks ehk vaheldiks nimetatakse alalisvoolu vahelduvvooluks muundavat ioonseadist.

Üks lihtsamaid kahe türatroniga vaheldi lülitusskeeme on näidatud joonisel 13-37.



Joon. 13-37. Vaheldi lülitusskeem.

Alalisvooluallika positiivne klemm on läbi drosseli *Dr* ühendatud väljundtrafo *Tr* primaarmähise nullpunktiga, selle mähise otsad aga kondensaatori *C* klemmidega ja türatronide anoodidega. Sama toiteallika negatiivne klemm on ühendatud türatronide katoodidega.

Türatronide võrevooluringe toidetakse läbi võretrafo Tr_v täiendavast vahelduvvooluallikast. Selle trafo sekundaarmähise nullpunkt on läbi võre nihkepinge U_n allika ühendatud türatronide katoodidega. Selle tulemusena muutuvad pinged türatronide võredel vastandfaasis ja türatronid süttivad vaheldumisi poole perioodi suuruse faasinihkega.

Voolu kulgemisel läbi esimese türatroni ja väljundtrafo *Tr* primaarmähise vasaku poole *1* indutseeritakse sama mähise paremas pooles *2* samasugune emj. nagu vasakuski. Seega on trafo *Tr* primaarmähise klemmipinge võrdne tema vasaku poole kahekordse pingega.

Süttinud türatroniga ühendatud kondensaatori *C* plaat laadub negatiivselt, teine aga positiivselt. Teise türatroni süttimishetkel kondensaator tühjeneb läbi türatronide ja tühjenemisvool kompenseerib esimese türatroni voolu. Seega vool viimases väheneb ja türatron kustub, teise türatroni vool kasvab aga mingi kindla väärtuseni. Voolu kulgemisel teises türatronis kondensaator laadub ümber.

Seega kulgeb vool väljundtrafo primaarmähise pooltes vaheldumisi. Selle tulemusena indutseeritakse trafo sekundaarmähises vahelduv emj., mille sagedus on võrdne võretrafo toitesagedusega.

Väljundtrafo väljundvoolu kõvera kuju sõltub drosseli *Dr* induktiivsusest, trafo *Tr* parameetritest, kondensaatori *C* mahtuvusest ja koormuse iseloomust.

Kui võretrafo primaarmähisele rakendatav pinge *U* on saadud mitte välisest toiteallikast, vaid väljundtrafost, siis nimetatakse vaheldit e n d a e r g u t u s e g a vaheldiks.

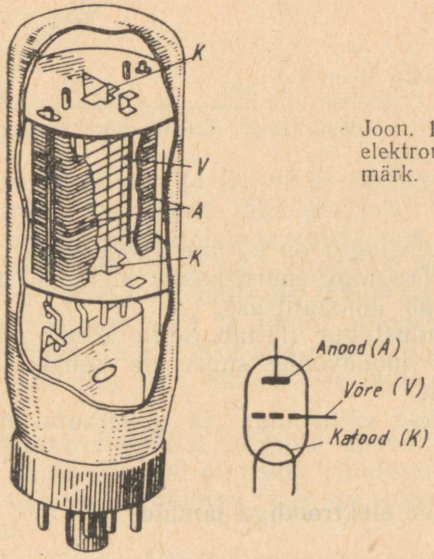
13-9. Kolme elektroodiga lamp

Kolme elektroodiga lamp ehk t r i o o d (joon. 13-38) erineb kahe elektroodiga lambist kolmanda elektroodi poolest, mida nimetatakse v õ r e k s. Sel elektroodil on spiraali kuju ning ta asub katoodi ja anoodi vahel.

Võret kasutatakse elektronide voo tüürimiseks lambis katoodi ja anoodi vahel, s. t. anoodvoolu tüürimiseks. Andes võrele katoodi suhtes positiivse potentsiaali, tekitatakse võre ja katoodi vahel täiendav elektriväli, mis on lambi põhiväljaga samasuunaline. Täiendav väli vähendab negatiivset ruumilaengut ja suurendab lambi anoodvoolu. Kui aga võre potentsiaal on katoodi suhtes nega-

tiivne, siis on täiendav väli vastassuunaline põhiväljale, mis põhjustab anoodvoolu vähenemist. Viimane saab võre teatud negatiivse potentsiaali väärtuse juures võrdseks nulliga ja lamp sulgub. Võre asub katoodile lähemal kui anood ja seepärast mõjub võre potentsiaali muutmine anoodvoolule palju rohkem kui anoodpinge muutmine.

Graafikut $I_a = f(U_v)$, mis kujutab anoodvoolu sõltuvust võre potentsiaalist katoodi suhtes (võrepingest), kui anoodpinge on konstantne, nimetatakse lambi võreka-



Joon. 13-38. Kolme elektroodiga elektronlamp ja tema tingmärk.

rakteristikuks (joon. 13-39).

Anoodvoolu juurdekasvu ja vastava võrepinge juurdekasvu suhet konstantse anoodpinge korral nimetatakse karakteristiku tõusuks, s. t.

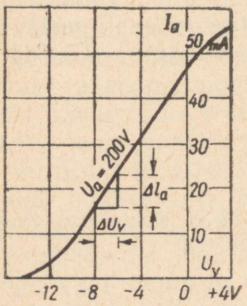
$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_v}.$$

Anoodpinge juurdekasvu ja vastava anoodvoolu juurdekasvu suhet konstantse võrepinge korral nimetatakse lambi sisetakistuseks, seega

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}.$$

Lambi sisetakistuse ja karakteristiku tõusu korrutist nimetatakse staatiliseks võimendusteguriks, s. o.

$$\mu = R_i S = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \cdot \frac{\Delta I_a}{\Delta U_v} = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_v}.$$



Joon. 13-39. Trioodi võrekarakteristik.

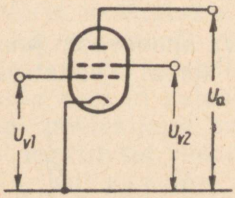
Staatiline võimendustegur on võrdne anoodpinge juurdekasvu ja sellise võrepinge juurdekasvu suhtega, mille korral anoodvool jääb konstantseks.

Staatiline võimendustegur näitab, mitu korda mõjub võrepinge muutmine anoodvoolu suurusele rohkem kui anoodpinge muutmine.

Trioode kasutatakse võimendus- ja generaatorlampidena.

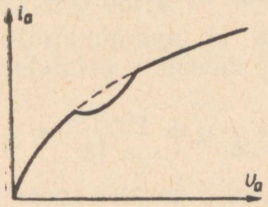
13-10. Nelja ja viie elektroodiga lambid

Nelja elektroodiga lamp, mida nimetatakse tetroodiks, erineb trioodist selle poolest, et esimese võre ja anoodi vahele on paigutatud teine võre — varivõre, millele antakse tavaliselt positiivne konstantne pinge U_{v2} (joon. 13-40), mis on kas anoodpingest pisut väiksem või sellega võrdne.



Joon. 13-40. Nelja elektroodiga elektronlambi tingmärk.

Varivõret kasutatakse võimendusteguri parendamiseks. Ta asub anoodi lähedal ja on elektrostaatiliseks ekraaniks e. varjeks, nõrgendades anoodi mõju elektriväljale ja elektronide voole lambis, mis põhjustabki võimendusteguri kasvu.



Joon. 13-41. Tetroodi anoodkarakteristik.

Kõrge anoodi ja varivõre potentsiaali korral tungivad elektronid varivõrest läbi, põrkavad vastu anoodi ja löövad sellest välja sekundaarelektrone (dünatronefekt). Kui varivõre potentsiaal on kõrgem kui anoodil, siis hakkavad anoodi sekundaarelektronid liikuma varivõrele, mille tõttu väheneb anoodvool ja lambi anoodkarakteristikus tekib lohk (joon. 13-41). Kui aga anoodpinge on võrdne või suurem kui U_{v2}, siis lähevad sekundaarelektronid anoodile tagasi.

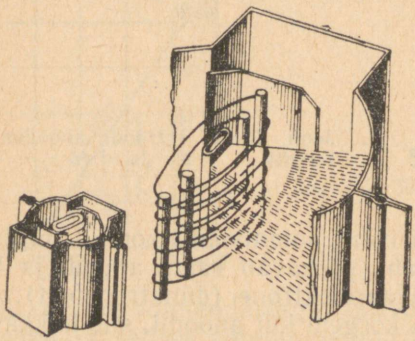
Dünatronefektist tingitud anoodkarakteristiku moonutumine on tetroodi oluliseks puuduseks, sest kui lamp töötab võimenduslambina, siis on anoodvoolu kuju moonutatud.

Spetsiaalse konstruktsiooniga tetroodide — jugatetroodide — anoodkarakteristikul dünatronefektist tingitud moonutusi pole.

Jugatetroodis (joon. 13-42) on mõlemad võred valmistatud ühesuguse keerdude arvuga. Võrede keerud on asetatud teineteisega kohakuti nii, et nad jaotavad lambi elektronide voo õhukesteks kiirtekimpudeks. Tasapinnalise katoodi ja anoodi külgpindade vahele on paigutatud plaadid, mis on katoodi potentsiaalil ja etendavad ekraanide osa. Järelikult koondatakse lambi elektronide voog kahte sektorisse. Elektronide voogude suure tiheduse tõttu tekitatakse kahes varivõre ja anoodi vahelise ruumi sektoris negatiivne ruumilaeng, mille väli sunnib sekundaarelektrone anoodile tagasi pöörduma. Seega kõrvaldatakse

dünatronefekti mõju anoodvoolule ja lambi anoodkarakteristikule.

Viie elektroodiga lamp, mida nimetatakse pentoodiks, erineb tetroodist selle poolest, et tal on veel kolmas võre — sulg- ehk antidünatronvõre. Sulgvõre on paigutatud varivõre ja anoodi vahele ning, olles ühendatud katoodiga, on nullpotentsiaalil. Sulgvõre ja anoodi vahe-



Joon. 13-42. Jugatetroodi ehitus.

line elektriväli sunnib anoodilt lahkunud sekundaarelektrone tagasi pöörduma. Seega anoodkarakteristikul moonutusi ei ole. Et anoodi mõjul emiteeritavatele primaarelektronidele on pentoodis veelgi nõrgem kui tetroodis, siis on pentoodi võimendustegur suurem kui tetroodil ja ulatub mitme tuhandeni.

13-11. Elektronvõimendid

Elektronvõimenditeks nimetatakse seadmeid, mis sisaldavad ühe või mitu elektronlampi ja mille abil toimub pinge, võimsuse ja voolu võimendamine toiteallika energia arvel.

Võimendites kasutatakse kolme, nelja ja viie elektroodiga lampe.

Lihtsaima kolmeelektroodilise lambiga võimendi või võimendi ühe astme põhimõtteskeem on toodud joonisel 13-43.

Kui sisendklemmidel (takisti r_v otstel) puudub pinge U_{sis}, kulgeb avatud lambi anoodvooluringis vool I_{a0}, mida nimetatakse jõudevooluks või anoodvoolu alalis-

komponendiks. Väljundklemmidel (takisti $r_{välj}$ otstel) on siis pinge alaliskomponent $U_{välj} = I_{a0} r_{välj}$.

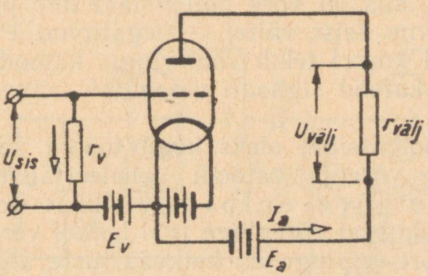
Kui sisendklemmidele rakendatakse pinge (signaal) ΔU_{sis}, siis võre potentsiaal suureneb või väheneb sama suuruse võrra, mille tulemusena anoodvool muutub suuruse ΔI_a võrra, väljundpinge aga suuruse $\Delta U_{välj} = \Delta I_a r_{välj}$ võrra.

Väljundpinge ja sisendpinge juurdekasvude suhet nimetatakse võimendi võimendusteguriks:

$$k = \frac{\Delta U_{välj}}{\Delta U_{sis}} = \mu \frac{r_{välj}}{R_i + r_{välj}} < \mu.$$

Seega seisneb võimendamine selles, et nõrk pinge muutus sisendklemmidel kutsub esile sarnase, kuid k korda suurema pinge muutuse väljundklemmidel, s. t. väljundtakistil tekitatakse lambi võrele antud väikesevõimsuselise elektrisignaaliga sarnane, kuid tunduvalt võimsam signaal.

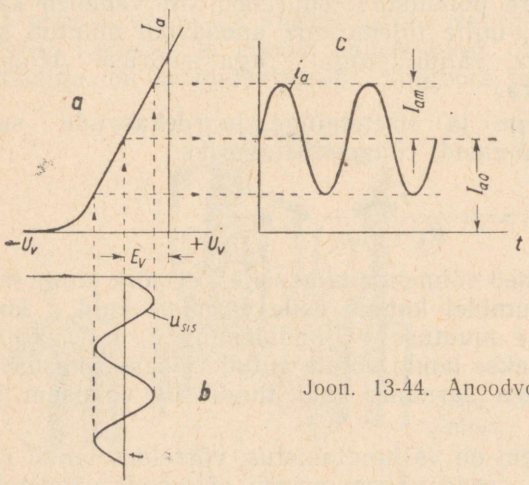
Mida suurem on väljundtakistus, võrreldes lambi sisetakistusega R_i, seda vähem erineb võimendi võimendustegur lambi staatilisest võimendustegurist.



Joon. 13-43. Elektronvõimendi põhimõtteskeem.

Trioodi võrekarakteristik (joon. 13-39) võetakse üles konstantse anoodpinge U_a juures. Lambi töötamisel võimendi lülituses põhjustab anoodvoolu muutus anoodpinge ja ka koormusel oleva pinge muutuse, sest $U_a = E_a - I_a r_{välj}$. Võrekarakteristikut $I_a = f(U_v)$ nimetatakse muutuva anoodpinge ning konstantse emj. E_a ja koormustakistuse $r_{välj}$ korral töö- ehk dünaamiliseks karakteristikuks. Sellel on samasugune iseloom kui harilikul võrekarakteristikul, kuid tõus on väiksem.

Joonisel 13-44 on antud sisendpinge — signaali u_{sis} — ja dünaamilise karakteristiku *a* järgi punkthaaval konstrueeritud anoodvoolu graafik *c*.



Joon. 13-44. Anoodvoolu graafik.

Kui lambi võre ja katoodi vahele on rakendatud vaid vahelduv sisendpinge, siis on võre potentsiaal ühe poolperioodi vältel positiivne, teise vältel — negatiivne. Positiivse võrepotentsiaali korral tekib vooluringis katood — takisti r_v — võre — katood signaali moonutav võrevool, mis on lubamatu.

Selleks et võre potentsiaal oleks kogu tööaja vältel negatiivne, lülitatakse võre ja katoodi vahele täiendav konstantse emj. E_v, s. o. võre-eelpinge allikas (joon. 13-43 ja 13-44). Sel juhul on võrepinge igal hetkel võrdne sisendpinge u_{sis} ja võre-eelpinge E_v hetkväärtuste algebralise summaga.

Anoodvool koosneb kahest komponendist: jõudevoolust I_{a0} ja vahelduvkomponendist $I_{am} \sin \omega t$, s. o.

$$i_a = I_{a0} + I_{am} \sin \omega t.$$

Voolu vahelduvkomponendist tingitud pingelang väljundtakistil

$$u_{välj} = r_{välj} I_{am} \sin \omega t = U_{välj\,m} \sin \omega t$$

kujutab endast k korda võimendatud sisendpinget u_{sis}.

Kui ühelt astmelt saadavast võimendusest ei piisa, siis kasutatakse mitmeastmelist võimendit.

Sel juhul on pinge esimese astme väljundtakistil teise astme sisendpingeks jne. Viimane aste on tavaliselt väljundil vajaliku võimsuse saavutamiseks.

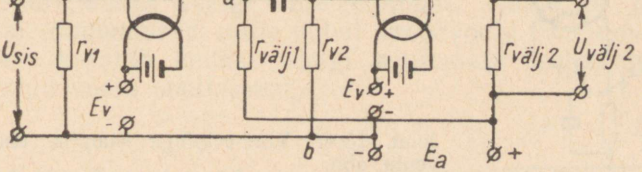
Mitmeastmelise võimendi võimendustegur on võrdne üksikute astmete võimendustegurite korrutisega:

$$k = k_1 k_2 k_3 \ldots k_n.$$

Astmeid võib omavahel sidestada mitmeti, näiteks takistite või trafode abil.

Joonisel 13-45 on toodud kaheastmelise takistussidestuses võimendi põhimõtteskeem.

Siin põhjustab vahelduv sisendpinge u_{sis} esimese lambi anoodvooluringis pulseeriva voolu. Selle anoodvoolu alaliskomponent läbib väljundtakisti $r_{välj\,1}$, kuid ei saa eralduskodensaatori C tõttu kulgeda läbi teise lambi võretakisti r_{v2}. Osa esimese lambi anoodvoolu vahelduvkomponendist, mis kulgeb läbi kondensaatori C ja takisti r_{v2}, tekitab sellel takistil pingelangu, mis kujutab endast esimese lambi poolt võimendatud sisendpinget. See pinge rakendatakse teise lambi võrele ja võimendatakse suuruseni $U_{välj\,2}$.

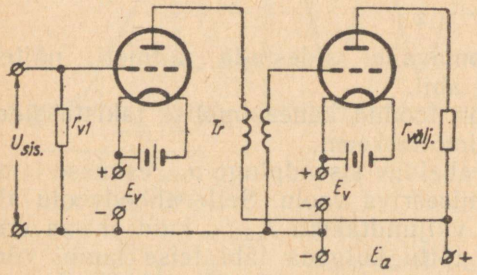


Joon. 13-45. Kaheastmeline takistussidestuses võimendi.

Trafosidestuses võimendi põhimõtteskeemis (joon. 13-46) on esimese astme väljundtakistus asendatud sidestustrafo primaarmähisega. Trafo sekundaarmähis on lülitatud teise lambi võre ja katoodi vahele. Kui kasutada trafot ülekandeteguriga 3 . . . 5, siis võimendustegur kasvab.

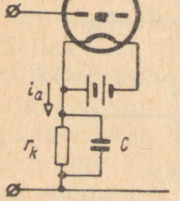
Võre-eelpinget ei saada enamasti vastavast patareist

(joon. 13-43); tema saamiseks kasutatakse pingelangu takistil r_k (joon. 13-47) — $I_{a0}r_k$, mis on tingitud takistis kulgeva voolu alaliskomponendist. Anoodvoolu vahelduvkomponent kulgeb peamiselt läbi kondensaatori C, mille takistus sellele komponendile on palju kordi väiksem kui r_k.



Joon. 13-46. Kaheastmeline transformaatorsidestuses võimendi.

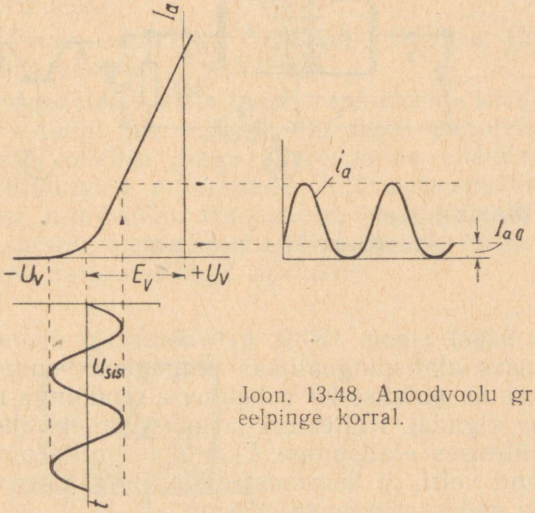
Võre-eelpinge suurus määrab ära elektronlambi töörežiimi ja anoodvoolu kõvera kuju. Eristatakse mitut võimendusklassi, mis vastavad võimenduslampide erinevatele töörežiimidele.



Joon. 13-47. Võre-eelpinge saamine anoodvoolu abil.

Joonisel 13-44 on võre-eelpinge valitud sellise arvestusega, et anoodvool oleks kõigil võrepinge väärtustel määratav dünaamilise karakteristiku sirgjoonelise osa järgi. Sel juhul anoodvoolu vahelduvkomponent reprodutseerib kujult täpselt sisendpinget ja võimendamine toimub moonutusteta — A-klassi võimendus. Jõudevool I_{a0} on väga suur, kasutegur on väike (alla 50%).

Joonisel 13-48 on võre-eelpinget suurendatud, nii et kujuneb *AB*-klassi võimendus. Anoodvoolu vahelduvkomponent on moonutatud, sest lamp töötab dünaamilise karakteristiku ebalineaarsel osal. Voolu alaliskomponent on vähenenud, kasutegur aga võrreldes eelmise variandiga suurenenud.



Joon. 13-48. Anoodvoolu graafik suure võre-eelpinge korral.

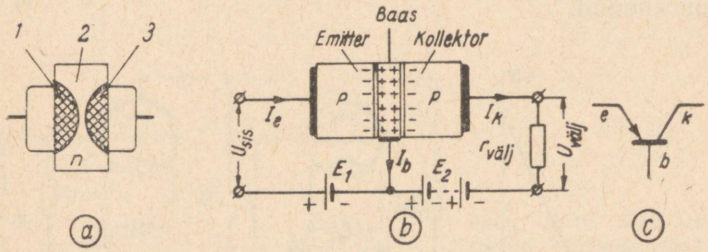
Suurendades veelgi võre-eelpinget, saame *B*- ja *C*-klassi võimendused, mille puhul anoodvoolu vahelduvkomponent kujutab endast veelgi suuremate moonutustega lõigatud voolu poollaineid.

13-12. Transistorid — pooljuht-võimenduselemendid

Viimasel ajal on võimenduselementidena laialdast kasutust leidnud pooljuhttrioodid ehk t r a n s i s t o r i d. Kasutatakse sulandatud pindtransistore.

Sulandatud transistor koosneb õhukesest elektronjuhtivusega (*n*-juhtivusega) germaaniumplaadikesest (joon. 13-49, *a*), mille külge on kahest vastasküljest sulatatud indiumitükikesed. Indiumi aatomid tekitavad germaaniumisse tungides seal aukjuhtivusega (*p*-juhtivusega) piir-

konnad (*1* ja *3*). Seejuures on *n*-juhtivusega piirkonna paksus mõni või mõnikümmend mikromeetrit. Naaberpiirkonnad on teineteisest eraldatud *p-n*-siiretega ja neid nimetatakse vastavalt emitteriks (*e*), baasiks (*b*) ja kollektoriks (*k*) (joon. 13-49, *b*).



Joon. 13-49. Pooljuhttriood.
a — ehitus; *b* — lülitusskeem; *c* — tingmärk.

Emitteri ja baasi (joon. 13-49, *b*) vooluringi ühendatakse pärilülituses alalispingeallikas pingega E_1 suurusjärgus 1 V ja sinna antakse ka vahelduv sisendpinge u_{sis} — võimendatav signaal. Kollektori ja baasi vahele ühendatakse vastulülituses alalispinge E_2 allikas, mille pinge on mitukümmend volti, ja koormustakisti. Pingelang viimasel kujutabki endast võimendatud signaali.

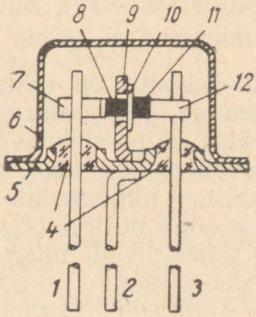
Emitteripiirkonda viiakse tunduvalt rohkem lisandi aatomeid kui baasipiirkonda. Sellest tingituna on aukude kontsentratsioon emitteris palju kordi suurem elektronide kontsentratsioonist baasis. Pinge E_1 toimib vooluringis emitter—baas pärisuunas. Et *p-n*-siirde pärijuhtivus on suur, siis on ka väikese pinge E_1 korral (suurusjärgus 1 V) emitterist baasi suunatud peamiselt põhiliste laengukandjate, aukude liikumisest tingitud vool I_e võrdlemisi suur. Baasis rekombineerub vabade elektronidega vaid tühine osa aukudest, peamine osa aga suundub allika E_2 elektrivälja mõjul läbi teise *p-n*-siirde kollektorisse. Seega tekib vooluringis baas—kollektor—koormus vool $I_k = I_e - I_b$, mis on samas suurusjärgus vooluga lõigul emitter—baas. Seejuures põhjustab sisendsignaali väike muutus mitte ainult voolude I_e ja I_k, vaid ka väljundpinge $U_{välj}$ tunduva muutuse, mis on tingitud küllaltki suurest koormustakistusest $r_{välj}$.

Transistori tegevus on analoogiline elektron-võimenduselemendi tegevusega.

Võrepinge kasv tekitab elektronlambis elektronide voo muutumise, anoodvoolu tugevnemise ja pinge kasvu koormusel. Transistoris põhjustab emitteri ja baasi vahelise pinge juudekasv emiteeritavate aukude hulga muutuse, voolu tugevnemise kollektori vooluringis ja pinge kasvu koormusel.

Peale vaadeldud transistori lülituse (joon. 13-49, *b*) kasutatakse ka teisi lülitusi.

Vaadeldud *p-n-p*-tüüpi transistoride kõrval kasutatakse *n-p-n*-tüüpi transistore. Viimastes põhjustab emitteri ja baasi vahelise pinge suurenemine elektronide liikumise *n*-piirkonnast *p*-piirkonda. Lülitusskeemides, kus kasutatakse *n-p-n*-tüüpi transistore, peab toiteallikate E_1 ja E_2 polaarsus olema vastupidine nende polaarsusele *p-n-p*-tüüpi transistoridega lülitustes.



Joon. 13-50. П-13-tüüpi germaanium-pindtrioodi ehitus.

П13-tüüpi germaanium-pindtransistori ehitus on kujutatud joonisel 13-50.

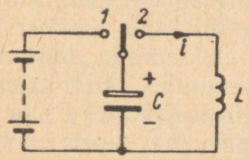
Trioodi baasiks on elektronjuhtivusega kristallilisest germaaniumist plaat *10*. See on kinnitatud toele *9*, mis on ühendatud väljaviiguga *2*. Kahest küljest on plaati sisse sulatatud indiumelektroodid *8* ja *11*. Valmistamisel tungivad indiumi aatomid germaaniumisse, moodustades kaks aukjuhtivusega piirkonda — emitteri *8* ja kollektori *11*. See *p-n-p*-tüüpi triood on suletud metallkesta *5, 6*. Väljaviigud emitterilt *7, 1* ja kollektorilt *12, 3* on kestast isoleeritud klaasist läbiviik-isolaatorite *4* abil.

Transistorid on vastupidavad, stabiilsed, väikeste mõõtmete ja massiga ning, võrreldes elektronlamp-trioodidega, tunduvalt pikema tööeaga.

13-13. Generaatorid

a) Siinusvõnkumiste lampgeneraatorid

Suure sagedusega (kõrgsagedusega) vahelduvvoolu saadakse lampgeneraatoritest, mille peamisteks elementideks on elektronlamp ja võnkering.



Joon. 13-51. Võnkering.

Pingel U_{Cm} on kondensaatori elektrivälja salvestatud energia $W_{Cm} = \frac{CU_{Cm}^2}{2}$. Sellise kondensaatori (joon. 13-51) lühistamisel pooliga, mille aktiivtakistus on tühiselt väike, algab kondensaatori tühjenemine ja vooluringis tekib vool. Pinge kondensaatoril väheneb ja elektrivälja energia muundub pooli magnetvälja energiaks, vool vooluringis kasvab. Hetkel, kui kondensaatori tühjenemine on lõppenud ja kui pinge temal on vähenenud nullini ($U_C = 0$), on elektrivälja energia läinud täielikult üle magnetvälja energiaks, mis saavutab oma maksimumi

$$W_{Lm} = \frac{LI_m^2}{2} = W_{Cm}$$

üheaegselt voolu maksimumiga vooluringis.

Saavutanud maksimumi, hakkab vool vähenema, kulgedes endises suunas, sest endainduktsiooni emj. väärtus on positiivne $\left(e_L = -L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}\right)$. See vool (näidatud noolega joonisel 13-51) põhjustab positiivsete laengute kogunemise plaadile, mis oli varem negatiivne, ja negatiivsete laengute kogunemise plaadile, mis oli varem positiivne (ülemisele plaadile).

Kondensaatori ümberlaadumine toimub seni, kuni kogu

vooluringi energia on koondatud elektrivälja ja kondensaatori pinge saavutab jälle maksimumi, nüüd aga vastupidise märgiga. Laadunud, hakkab kondensaator tühjenema, nüüd aga vastupidises suunas. Seejärel ta laadub jälle jne.

Seega läheb vooluringis LC elektrivälja energia üle magnetvälja energiaks ja vastupidi, s. o. vooluringis toimuvad sumbumatud energia võnkumised, millest tuleneb ka nimetus võnkering. Vool ja pinge muutuvad vaadeldavas vooluringis siinuseliselt. Pinge kondensaatoril on mistahes hetkel võrdne endainduktsiooni elektromotoorjõuga ja voolu suhtes $^1/_4$ perioodi võrra nihutatud.

Viies voolu amplituudi avaldise $I_m = U_{Cm}\omega C$ (§ 5-12) energia võrrandisse $W_{Lm} = \frac{LI_m^2}{2}$, saame:

$$W_{Lm} = \frac{LU_{Cm}^2\omega_0^2C^2}{2} = \frac{CU_{Cm}^2}{2} = W_{Cm},$$

millest avaldame võnkeringi omavõnkesageduse:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Voolu amplituud

$$I_m = U_{Cm}\omega_0 C = U_{Cm}\frac{1}{\sqrt{LC}}C = \frac{U_{Cm}}{\sqrt{L/C}}.$$

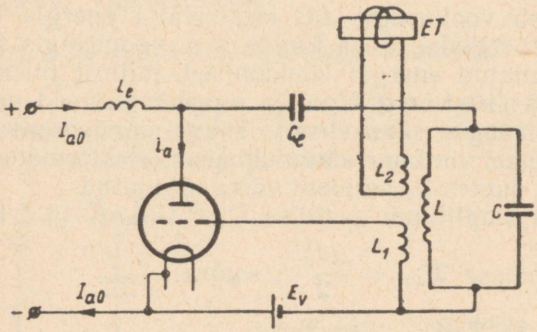
Suurust $\sqrt{L/C}$ nimetatakse tavaliselt võnkeringi lainetakistuseks.

Kui vooluringil LC on aktiivtakistus r, mis ei ületa kahekordset lainetakistust, siis tekib vooluringis samuti võnkeprotsess. Sealjuures muundatakse igal võnkel osa elektrienergiat soojuseks, mispärast voolu ja pinge amplituudid vähenevad iga poolperioodiga ja võnkumine sumbub.

Kui on tingimata vaja aktiivtakistusega LC-vooluringis saada sumbumatuid võnkumisi, siis tuleb vooluringi anda energiat, mis tasakaalustaks soojuskaod aktiivtakistuses. Kui võnkering peab andma osa energiat koormuse vooluringi, siis tuleb temasse suunata veel täiendav samasugune energiahulk.

Lampgeneraatoris muundub alalisvooluallika energia vooluringi parameetritega (L, C) määratud kõrgsagedus-

liku vahelduvvoolu energiaks. Elektronlamp on selle muundamise juures regulaatoriks, mille abil suunatakse energiat perioodiliselt võnkeringi, kust ta omakorda koormuse vooluringi edasi antakse.



Joon. 13-52. Lampgeneraatori põhimõtteskeem.

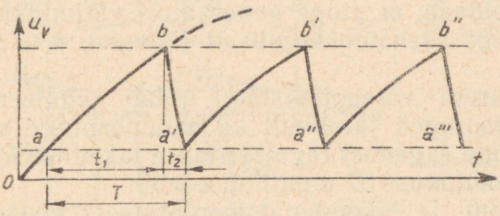
Üks lampgeneraatori lülitusskeemidest on toodud joonisel 13-52.

Kui me lülitame lampgeneraatori pluss- ja miinusklemmidele alalisvooluallika, siis laadub võnkeringi kondensaator C pingeni U_{Cm}. Seejärel hakkab kondensaator tühjenema läbi võnkeringi pooli L ja võnkeringis tekivad omavõnkumised nurksagedusega $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Tagasisidepool L_1 on ühendatud lambi võrega; seepärast on võrepinge määratud poolis L_1 indutseeritava elektromotoorjõuga, mille nurksagedus on ω_0. Lambi anoodvooluringis tekib pulseeriv vool i_a (joon. 13-44), mille iseloom sõltub võre-eelpingest E_v. Selle voolu alaliskomponent I_{a0} ei saa võnkeringi läbida, sest seda takistab eralduskondensaator C_e, ja ta kulgeb läbi toiteallika ning paispooli L_e. Anoodvoolu vahelduvkomponent $I_{am} \sin \omega_0 t$ ei suuda suure sageduse korral toiteallikat läbida paispooli suure reaktiivtakistuse $\omega_0 L_e$ tõttu ja kulgeb läbi võnkeringi pingega faasis, andes perioodiliselt energiat võnkeringi.

Koormuse vooluring koosneb tarbijast ET (joon. 13-52) ja poolist L_2, mis on induktiivselt sidestatud võnkeringi pooliga L. Seega toimub ülekanne võnkeringist tarbijasse poolidega L_2 ja L aheldatud magnetvoo abil.

b) Hammaspingegeneraatorid

Mõningates seadmetes, näiteks elektronostsillograafides, on vaja saada pinget, mille kõveral on saehamba kuju (joon. 13-53).

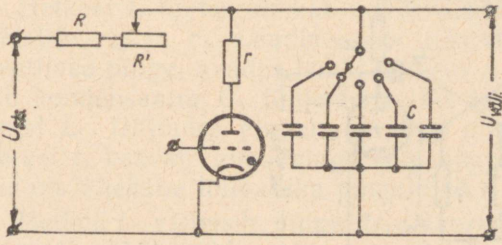


Joon. 15-53. Hammaspinge kõver.

Kõvera tõusev osa peab olema võimalikult lähedane sirgjoonele, langev osa aga maksimaalselt järsk. Samuti peab olema võimalik «hamba» perioodi pikkust või vastavalt hammaspinge sagedust laiades piirides reguleerida.

Üks võimalikest hammaspingegeneraatori (lineaarpingegeneraatori) lülitusskeemidest on toodud joonisel 13-54.

Pärast alalispinge lülitamist generaatori sisendklemmidele kondensaator C laadub läbi takistite R ja R'. Seejuures kasvab pinge kondensaatoril ja lambi vooluringis vastavalt kõverale Oab väärtuseni, mille juures türatron süttib (joon. 15-53, kõvera punkt b). Sellest hetkest algab kondensaatori kiire tühjenemine läbi türatroni, sest süttimisel muutub türatroni takistus väga väikeseks ja türat-



Joon. 13-54. Hammaspingegeneraatori põhimõtteskeem.

roni vooluringi takistus saab palju kordi väiksemaks takistustest R ja R'. Kondensaatori tühjenemine ja tema pinge vähenemine toimuvad väga kiiresti ja jätkuvad seni, kuni türatron kustub (joon. 13-53, kõvera punkt a'). Seejärel hakkab kondensaator uuesti laaduma, pinge temal aga kasvama (kõver $a'b'$) jne.

Siit võib järeldada, et pinge generaatori väljundklemmidel $U_{välj}$ muutub saehambakujuliselt (kõver a, b, a', b', a'', b'' jne.).

Muutes türatroni võrepotentsiaali, saab reguleerida türatroni süttimispinget, järelikult ka hammaspinge suurust. Hammaspinge sagedust reguleeritakse takistuse R' ja kondensaatori mahtuvuse C muutumise abil.

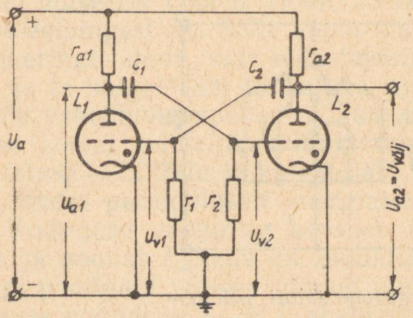
Et ionisatsiooni- ja rekombinatsiooniprotsess nõuavad mõningat aega, siis kasutatakse türatrongeneraatoreid hammaspinge saamiseks sagedusega mitte üle 50 kHz. Kõrgema sagedusega pinge saamiseks kasutatakse elektronlampidel töötavaid generaatoreid.

c) Multivibraatorid

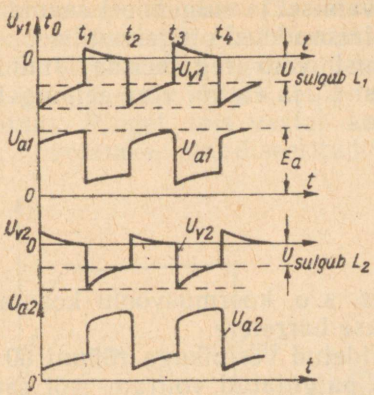
Viimasel ajal laieneb impulsstehnika ja mitmesuguste impulssgeneraatorite kasutamine. Multivibraator on elektronlampidel (või transistoridel) töötav ristkülikulisi pingeimpulsse andev generaator.

Joonisel 13-55 on toodud üks võimalikest multivibraatori lülitusskeemidest.

Sümmeetrilises multivibraatoris kasutatakse ühesuguseid elektronlampe, ühesuguseid võretakisteid ($r_1 = r_2$), kondensaatoreid ($C_1 = C_2$) ja anoodtakisteid ($r_{a1} = r_{a2}$).



Joon. 13-55. Sümmeetriline multivibraator.



Joon. 13-56. Multivibraatori pingete graafikud.

Alghetkel t_0 (joon. 13-56) on lamp L_2 avatud, lamp L_1 aga suletud, sest negatiivne võrepinge U_{v1} on suur. Esimese lambi anoodpinge U_{a1} on ligikaudu võrdne toiteallika pingega U_a, sest pingelang takistil r_{a1}, mis on tingitud kondensaatori C_1 laadimisvoolust, on tühine. Kondensaator laadub läbi takistite r_{a1} ja r_2 alalisvooluallika pinge U_a toimel. Kondensaatori C_1 laadimisvool tekitab takistil r_2 positiivse võrepinge U_{v2}, mille juures lamp L_2 on avatud. Samal ajal tühjeneb kondensaator C_2 läbi lambi L_2 ja takisti r_1. Selle kondensaatori tühjenemisvool tekitab takistil r_1 suure pingelangu U_{v2}, mis suleb lambi L_1. Kondensaatori C_2 tühjenemisel pinge U_{v1} lambi L_1 võrel väheneb ja saab hetkel t_1 selliseks, mille juures lamp L_1 avaneb, lamp L_2 aga sulgub. Anoodpinge U_{a1} väheneb kiiresti.

Hetkest t_1 alates hakkab kondensaator C_2 laaduma läbi takistite r_{a2} ja r_1. Laadimisvool tekitab lambi L_1 võrel positiivse pinge, avades lambi hetkeni t_2. Samal ajal hakkab kondensaator C_1 tühjenema läbi takisti r_2 ja avatud lambi L_1, tekitades pingelangu U_{v2}, mis suleb lambi L_2. Hetkel t_1 kasvab anoodpinge U_{a2} hüppeliselt suuruseni, mis on lähedane toiteallika pingele U_a.

Hetkel t_2 väheneb pinge U_{v2} suuruseni, mille juures lamp L_2 avaneb, lamp L_1 aga sulgub. Järelikult kasvab pinge U_{a1} hüppeliselt, pinge U_{a2} aga väheneb. Seejärel hakkab protsess korduma.

Perioodilisel lampide avamisel ja sulgemisel saame iga lambi väljundil ligikaudu täisnurksed pingeimpulsid.

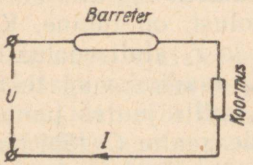
Multivibraatori sagedust võib reguleerida, muutes takistusi r_1 ja r_2, mahtuvusi C_1 ja C_2 või võre-eelpinget.

13-14. Stabilisaatorid

a) Voolustabilisaatorid

Voolu stabiliseerimiseks, s. o. koormusvoolu konstantsena hoidmiseks, kasutatakse barretere.

Barreteri balloon on täidetud vesinikuga rõhuni 50... 200 mm Hg ja sellesse on paigutatud volfram- või raudniit. Barreteri niidi jahtumis- ja kuumenemistingimused on valitud nii, et väljaviikude vahelise pinge muutus tekitab peaaegu endaga võrdelise niidi takistuse muutuse. Seega tekitab pinge muutumine teatavates piirides vaid tühise voolu muutumise.



Joon. 13-57. Barreteri lülitusskeem.

Lülitades barreteri jadamisi koormusega (joon. 13-57), saame vooluringis toiteallika pinge tunduval muutumisel tühise voolu muutuse. Kui koormuse takistus on konstantne, on võrgupinge muutumisel peaaegu konstantne mitte ainult vool, vaid ka pinge koormusel.

Stabiliseeriva elemendina võib kasutada ka kahe elektroodiga elektronlampi, mis töötab küllastuse olukorras.

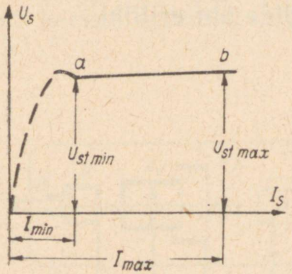
b) Pingestabilisaatorid

Konstantsete alalispingete saamiseks kasutatakse stabilisaatoreid, mis kujutavad endast enamasti huumlahendusseadiseid.

Kahe elektroodiga s t a b i l i t r o n koosneb klaasballoonist, milles asub silindriline katood ja traatanood, mis

paikneb katoodi sees. Gaasi rõhk balloonis on mõnikümmend millimeetrit elavhõbedasammast.

Stabilisaatori pinge-voolu karakteristikul (joon. 13-58) on lõik *ab*, mis näitab, et pingelang jääb voolust sõltumatuks. Pinget, mis vastab karakteristiku tööpiirkonnale *ab*, nimetatakse stabiliseeritud pingeks U_{st}.

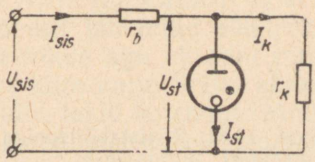


Joon. 13-58. Huumlahendus-stabilitroni pinge-voolu karakteristik.

Stabilitron lülitatakse koormusega r_k rööbiti, kusjuures viimase pinge on võrdne stabiliseeritud pingega U_{st}. Vooluringi hargneva osaga lülitatakse jadamisi ballasttakisti r_b (joon. 13-59). Sellel tekib pingelang, mis on võrdne sisendpinge U_{sis} ja stabiliseeritud pinge vahega, sest

$$U_{sis} = I_{sis} r_b + U_{st},$$

kus sisendvool $I_{sis} = I_{st} + I_k$.



Joon. 13-59. Huumlahendus-stabilitroniga stabilisaatori lülitusskeem.

Sisendpinge suurendamine põhjustab stabilitroni voolu kasvu, pinge viimasel jääb aga pingelangu tõttu ballasttakistil peaaegu muutumatuks.

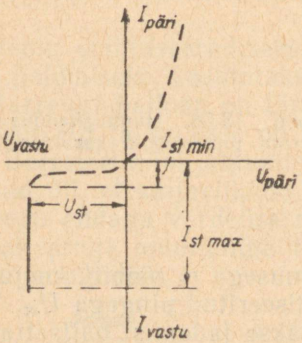
Koormusvoolu suurendamine põhjustab voolu vähenemist stabilitronis, pinge vooluringi hargnenud osal jääb peaaegu muutumatuks. Stabilisaatori töötamiseks on vaja soovitavast stabiliseeritud pingest suuremat sisendpinget ja stabilitroni voolu, mille väärtus oleks stabilitroni pinge-voolu karakteristiku tööpiirkonnas.

Selleks et saada suuri stabiliseeritud pingeid, kasutatakse stabilitronide jadaühendust.

Stabilitrone valmistatakse pingetele 70 V ja rohkem ning vooludele 5 . . . 40 mA.

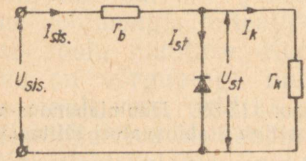
Vaadeldud huumlahendusstabilitronide kõrval kasutatakse elektron- ja pooljuhtstabilitrone.

Ränistabilitrone kasutatakse pinge stabiliseerimiseks. Nad kujutavad endast ränidioodide üht eriliiki.



Joon. 13-60. Ränistabilitroni pinge-voolu karakteristik.

Ränistabilitroni pinge-voolu karakteristiku (joon. 13-60) tööpiirkonnaks on tema see osa, mis vastab vastuvoolule ja -pingele ning asub peaaegu rööbiti vooluteljega (on joonisel 13-60 kujutatud pideva joonega).



Joon. 13-61. Ränistabilitroniga stabilisaatori lülitusskeem.

Joonisel 13-61 on toodud ränistabilitroniga pingestabilisaatori lülitusskeem, mis on analoogiline skeemiga huumlahendusstabilitroni kasutamise korral.

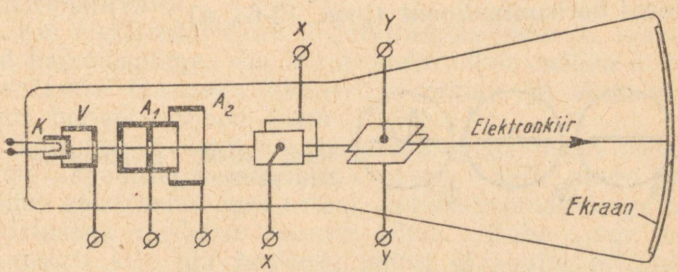
Stabilitron lülitatakse vastulülitusse. Koormus ühendatakse stabilitroniga rööbiti, jadamisi hargnenud osaga ühendatakse aga ballasttakisti.

Ränistabilitrone valmistatakse pingetele 7 . . . 14 V ja vooludele 20 . . . 33 mA.

13-15. Elektronkiiretoru

Elektronkiiretorud on leidnud laialdast kasutamist erinevates elektrotehnika harudes: raadiolokatsioonis, televisioonis, mõõtetehnikas jne.

Elektronkiiretoru klaasballoon on koonuselise kolvi kujuline (joon. 13-62). Kolvi laieneva osa põhi on seestpoolt kaetud luminofooriga ja kujutab endast ekraani.



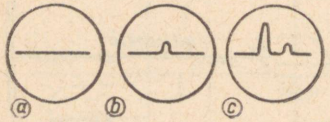
Joon. 13-62. Elektronkiiretoru.

Ekraani vastas olevasse toru ossa on paigutatud seadis, mis formeerib elektronkiire ja mida nimetatakse elektronkahuriks. See seadis koosneb katoodist K, tüürivast elektroodist ehk võrest V ja kahest silindrilisest anoodist A_1 ja A_2. Katoodi ja anoodi vaheline elektriväli annab katoodilt lahkunud elektronidele vajaliku kiiruse, elektronide voole aga ekraani pinnal asuvasse fookusesse koonduva kiire kuju. Selles ekraani punktis, kuhu langeb elektronkiir, tekib helendus. Muutes tüürelektroodi potentsiaali, saab reguleerida elektronide hulka kiires, s. o. kiire intensiivsust ja ekraani helenduse tugevust. Muutes ühe või teise anoodi potentsiaali, saab elektronkiirt ekraanil palju täpsemalt fokuseerida, et saada helendava punkti suuremat teravust.

Elektronkiir kulgeb läbi kahe hälvitus- e. kallutusplaatide paari vahelt, millele on rakendatud pinged. X-plaatide elektriväli hälvitab elektronkiirt horisontaaltasapinnas, teise Y-plaadipaari väli aga vertikaaltasapinnas.

X-plaatidele rakendatakse tavaliselt saehambakujuline laotuspinge (joon. 13-53).

Alates perioodi algusest kasvab pinge nullist maksimumini lineaarselt, s. o. võrdeliselt ajaga, ja elektronkiir liigub ekraanil konstantse kiirusega vasakult paremale; saavutanud maksimumi, pinge langeb kiiresti (aja t_2 jooksul) nullini ja elektronkiir liigub sama kiiresti äärmisest (paremalt) ekraani punktist vastassuunas, jõudes perioodi lõpuks tagasi lähtepunkti (vasakul). Seejärel protsess kordub. Kiire korduval liikumisel mööda üht ja sama trajektoori näeme ekraanil pinge puudumisel Y-plaatidel heledat horisontaaljoont (joon. 13-63, *a*).



Joon. 13-63. Elektronkiire jälg toru ekraanil.

Kui mingil hetkel antakse kiire liikumisel mööda ekraani Y-plaatidele pingeimpulss, siis põhjustab Y-plaatide elektriväli impulsiga võrdelise elektronkiire hälbimise vertikaalsuunas. Kui impulsid hakkavad korduma hammaspinge sagedusega, toimub kiire hälbimine ühes ja samas kohas ekraanil. Järelhelenduse tõttu on ekraanil näha hele joon (joon. 13-63, *b*), millel on impulsist tingitud «hammas».

Kahe «hamba» olemasolu näitab, et iga perioodi vältel antakse Y-plaatidele kaks impulssi.

Elektronkiirt võib hälvitada nii elektri- kui ka magnetvälja abil. Viimasel juhul tekitatakse hälvitav magnetväli toru ümber paigutatud poole läbivate voolude abil.

Elektronkiiretoru on põhiliseks raadiolokaatori osaks. Raadiolokaatori ülesandeks on määrata elektromagnetiliste lainete abil eseme asukoht. Sel eesmärgil saadetakse oletatavas suunas elektromagnetiliste lainete impulsse. Jõudnud esemeni, lained peegelduvad sellelt osaliselt. Impulsi väljasaatmise ja peegeldunud laine vastuvõtmise hetkel tekivad Y-plaatidel pingeimpulsid ja järelikult tekivad toru ekraanil «hambad». «Hammaste» vahekaugus sõltub eseme kaugusest raadiolokaatorist. Viimast saab kindlaks määrata, sest on teada elektromagnetiliste lainete levimiskiirus õhus — 300 000 km/s.

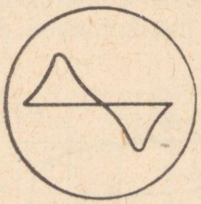
Elektronkiiretoru on ka televiisori põhiliseks osaks. Kujutis reprodutseeritakse elektronkiire abil kineskoobi (vastuvõtuelektronkiiretoru) ekraanil.

13-16. Elektronostsillograaf

Elektronostsillograaf on riist, mis on mõeldud kiiresti muutuvate elektriliste suuruste kõverate visuaalseks jälgimiseks või fotografeerimiseks. Tema peamiseks osaks on elektronkiiretoru.

Kui elektronkiiretoru X-hälvitusplaatidele on rakendatud hammaspinge, siis liigub elektronkiir mööda ekraani konstantse kiirusega vasakult paremale ja ekraanil on näha horisontaaljoon (joon. 13-64).

Lülitame Y-plaatidele hammaspingega faasis oleva ja sama sagedusega mõõdetava pinge. Selle pinge mõjul hälbib elektronkiir igal hetkel vertikaalsuunas pinge hetkväärtusega võrdelise suuruse võrra. Kahe pinge mõjul joonistab kiir iga perioodi vältel ekraanile mõõdetava pinge kõvera (joon. 13-64), mida võib vaadelda või fotografeerida.



Joon. 13-64. Uuritava pinge kõver ostsillograafi ekraanil.

Tundlikkus hälvitusplaatide pinge suhtes on tavaliselt väike, seepärast on iga plaadipaari jaoks kaheastmeline lampvõimendi, mis võimaldab võimendustegurit ka reguleerida.

Seega on elektronostsillograafis peale elektronkiiretoru veel terve rida seadiseid — sõlmi, mis on monteeritud ühte kesta. Elektronostsillograafi lahterskeemi, väliskuju ja käsitsemist vaatleme paragrahvis 13-20.

13-17. Fotoelemendid. Fototakistid

Möödunud sajandi lõpul uuris A. G. Stoletov fotoefekti, tegi kindlaks selle põhilised seaduspärasused ja valmistas esimese fotoelemendi.

Fotoelemendiks nimetatakse seadist, mis on mõeldud valgusenergia muundamiseks elektrienergiaks.

Eristatakse välist ja sisemist fotoefekti.

Väline fotoefekt seisneb selles, et valgusvoog, tungides ainesse, annab viimasele kogu oma energia. Selle tulemusena ühe osa elektronide energia kasvab, saades suuremaks vajalikust väljumistööst. Leiab aset elektronide väljumine aine pinnakihist, s. o. fotoemissioon.

Välist fotoefekti kasutatakse vaakuum- ja gaasitäitega fotoelementides ning fotokordistites.

Sisemine fotoefekt seisneb selles, et valgusvoo poolt ainele antava energia arvel kasvab üksikute elektronide energia, mis põhjustab osa aatomite ioniseerimise ja uute laengukandjate tekkimise (vabad elektronid ja augud). Selle tulemusena kas tekib foto-emj. või kasvab aine juhtivus.

Sisemist fotoefekti kasutatakse fotodioodides, ventiilfotoelementides [1] ja fototakistites.



Joon. 13-65. Välise fotoefektiga fotoelement.

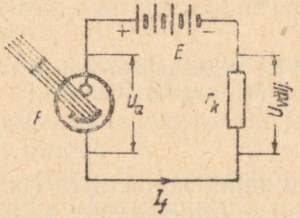
Hapnik-tseesium-vaakuumfotoelement (joon. 13-65) koosneb klaaskolvist, milles on tekitatud vaakuum. Tema sisepind, välja arvatud «aken» valgusvoo jaoks, kaetakse hõbedakihiga (alus), millele kantakse tseesiumoksiidi kiht. Hõbedakiht ja teda kattev pooljuhikiht on fotoelemendi katoodiks. Anoodiks on kolvi keskele paigutatud metallrõngas.

Peale vaadeldud fotoelemendi valmistatakse veel anti-

[1] Ventiilfotoelemendiks nimetatakse fotodioodi, mis töötab emj. allikana (välise pingeallikata). Tõlk.

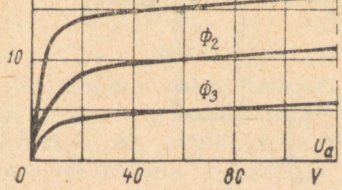
mon-tseesium-vaakuumfotoelemente, mille katoodi aluskiht on antimonist. Viimasele kantakse pooljuhikiht.

Gaastäitega fotoelemente valmistatakse vaid hapnik-tseesium-katoodiga. Nad erinevad vaakuumfotoelementidest selle poolest, et nende kolbides tekitatakse vaakuum ja seejärel täidetakse nad tavaliselt madalal rõhul oleva argooniga.



Joon. 13-66. Välise fotoefektiga fotoelemendiga lülitusskeem.

Toiteallika (joon. 13-66) lülitamisel fotoelemendi anoodi ja katoodi vahele tekitatakse elemendis elektriväli. Kui läbi fotoelemendi «akna» langeb katoodile valgusvoog, siis hakkavad emiteeritud elektronid välja mõjul liikuma katoodilt anoodile ja vooluringis tekib fotovool, mis püsib kogu katoodi valgustamise aja vältel.



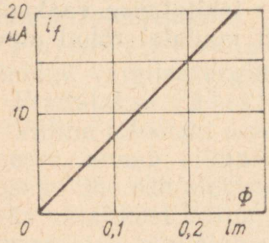
Joon. 13-67. Vaakuumfotoelemendi pinge-voolu karakteristik.

Fotovoolu suurus sõltub valgusvoost, toiteallika pingest ja koormuse takistusest.

Vaakuumfotoelemendi pinge-voolu karakteristik (joon. 13-67) näitab, et konstantse valgusvoo juures pinge suurenemisel fotovool algul kasvab, seejärel jääb aga peaaegu muutumatuks.

Vaakuumfotoelemendi valgusvoo-voolu karakteristik (joon. 13-68), mis annab fotovoolu sõltuvuse valgusvoost,

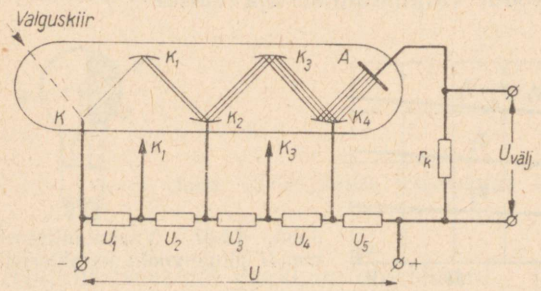
näitab, et emiteeritavate elektronide hulk ja järelikult ka fotovool on võrdelised valgusvooga, mis langeb fotoelemendi katoodi pinnale.



Joon. 13-68. Vaakuumfotoelemendi valgusvoo-voolu karakteristik.

Mikroamprites antud fotovoolu suhet luumenites (lm) [1] väljendatud valgusvoogu nimetatakse fotoelemendi t u n d l i k k u s e k s. Vaakuumfotoelementide tundlikkus on 20 ... 100 μA/lm.

Gaastäitega fotoelementidel on elektroodidevahelise gaasi ioniseerumisest tingituna tundlikkus 4 ... 5 korda suurem kui vaakuumfotoelementidel. Gaastäitega elementidel on märgatav inerts.



Joon. 13-69. Fotokordisti lülitusskeem.

F o t o k o r d i s t i — see on välise fotoefektiga fotoelement, mille fotovool elektronide sekundaaremissiooni tulemusena tugevneb.

Klaasballoonis (joon. 13-69) asub peale katoodi *K* ja

[1] Vt. § 18-1.

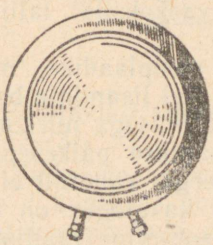
anoodi A rida sekundaarseid katoode — emittereid K_1, K_2 jne., mille pind on kaetud emissioonivõimelise kihiga. Iga katoodi potentsiaal on umbes 100 V võrra kõrgem kui eelmisel. Iga sekundaarkatood emiteerib elektrone rohkem, kui on teda pommitavaid primaarelektrone. Sekundaarelektronide ja primaarelektronide arvude suhet nimetatakse *sekundaaremissiooni teguriks* σ, mille väärtus on 3...4. Seega on n sekundaarkatoodiga fotokordisti väljundvool σ^n korda suurem ühe elemendi voolust.

Fotokordisti tundlikkus on kuni 1000 mA/lm.

Fotokordisti puudusteks on vananemine, s. o. tundlikkuse vähenemine aja jooksul, ning see, et ta vajab kõrget pinget.

Fotokordisti võimaldab real juhtudel toime tulla võimendeid kasutamata.

Fotodioodi (ventiilfotoelemendi) töö põhineb p- ja n-juhtivusega pooljuhtide vahelise tõkkekihi kasutamisel.



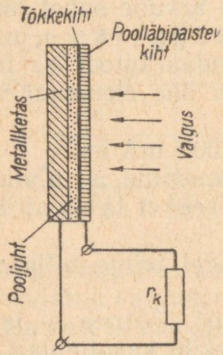
Joon. 13-70. Fotodioodi väliskuju.

Fotodioodi valgustamisel üksikute elektronide energia kasvab energia arvel, mille nad saavad valgusvoolt. See põhjustab osa aatomite ioniseerumist ja uute laengukandjate (elektronide ja aukude) tekkimist. Vabanevad elektronid siirduvad n-kihti, augud aga p-kihti. Seejuures tekib aukude ülejääk p-kihis ja elektronide ülejääk n-kihis. p- ja n-kihi vahel tekkiv potentsiaalide vahe (emj.) põhjustab voolu I, mis kulgeb vooluringi välisosas p-kihilt n-kihile. Selle voolu suurus on võrdeline elektronide ja aukude hulgaga, seega ka valgusvooga.

Fotodioodi väliskuju ja siseehitus on näidatud joonistel 13-70 ja 13-71.

Õhukesele teras- või alumiiniumkettale on kantud p-juhtivusega pooljuhi (näiteks seleeni) kiht, millele kan-

takse poolläbipaistev *n*-juhtivusega pooljuhi või metalli (näiteks hõbeda) kiht. Kõige peale kantakse läbipaistev kaitsekile. Tõkkekiht tekitab poolläbipaistva kihiga kokkupuutuvas pooljuhi kihis.



Joon. 13-71. Fotodioodi ehitus ja lülitusskeem.

Pooljuhtidena kasutatakse seleeni, vaskoksiidi, tallium-sulfiidi, hõbesulfiidi, räni, jms.

Räni-fotodiood on *n*-juhtivusega räniplaadike, mille pinnasse viiakse vaakuumis difusiooni teel lisandina boori, mis tekitab umbes 2 μm paksuse *p*-juhtivusega piirkonna.

Ränielementidest patareisid nimetatakse päikesepatareideks ja neid kasutatakse päikeseenergia vahetult elektrienergiaks muundamiseks, kusjuures kasutegur on umbes 10%. Märkimist väärib nende kasutamine raadiojaamade toitmiseks Maa tehiskaaslastel.

Fotodioodidel on suur tundlikkus (kuni 10 mA/lm). Nende eeliseks, võrreldes teiste fotoelementidega, on see, et neil pole vaja toiteallikat.

Fotoelemendid on leidnud laialdast kasutamist kõige erinevamates elektroonika, automaatika ja televisiooni harudes, helikinos, mõõtetehnikas jne.

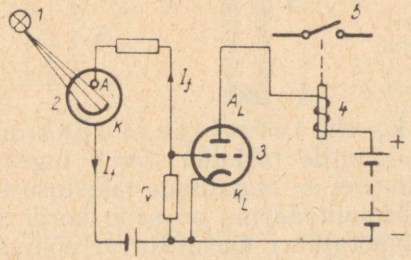
Näitena on joonisel 13-72 toodud lihtsaim fotorelee lülitusskeem.

Lambi *1* valgus tekitab fotoelemendi *2* aknale langedes fotovoolu I_f. See vool tekitab takistil r_v pingelangu $I_f r_v$. Sellest tingituna on lambi *3* võre potentsiaal madalam katoodi potentsiaalist ja lambi anoodvooluring on katkestatud, voolu kontaktori poolis *4* ei ole ja töövooluringi kontaktid *5* on avatud.

Kui ilmub ese, mis ei lase valgust langeda fotoelemendile, kaovad vool I_f ja pingelang $I_f r_v$. Lamp avaneb ja anoodvool läbib kontaktori pooli ning töövooluringi kontaktid sulguvad.

Sellist fotoreleed kasutatakse mööda konveierit liikuvate toodete automaatseks loendamiseks, ohtlike ja keelatud alade või ruumi osade piiramiseks jne.

Fototakistiks nimetatakse seadist, mille elektriline takistus valguse toimel muutub.

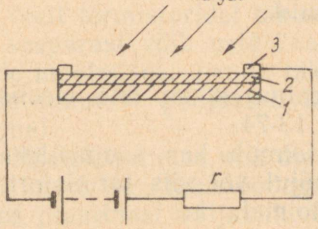


Joon. 13-72. Fotorelee lülitusskeem.

Fototakisti siseehitus ja lülitusskeem on toodud joonisel 13-73.

Õhukesele klaasist, keraamikast või vilgust plaadikesele *1* kantakse pooljuhikiht *2*. Vooluringi ühendamiseks kantakse pooljuhi pinnale kontaktid *3*. Kaitseks niiskuse eest kaetakse pooljuhikiht läbipaistva lakiga.

Valguse eest varjatud (pimedas olevat) fototakistit läbib väike vool, mida nimetatakse pimevooluks. Fototakisti valgustamisel läbib teda valgusvool. Viimane kasvab koos valgusvoo (valgustatuse) suurenemisega.



Joon. 13-73. Fototakisti ehitus ja lülitusskeem.

Valgusvoolu ja pimevoolu vahet nimetatakse *fotovooluks*.

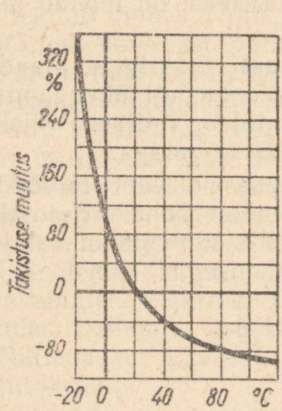
Fototakisteid valmistatakse mitmesugustest pooljuhtmaterjalidest: pliisulfiidist, vismutsulfiidist, kaadmiumsulfiidist jt.

Fototakisti tundlikkus on suurem kui välise fotoefektiga vaakuumfotoelementidel ja on kuni 100 mA/lm.

Fototakistitel on küllaltki suur inerts ja takistuse mittelineaarne sõltuvus valgusvoost. Fototakisteid kasutatakse laialdaselt tööstuselektroonikas, automaatikas, mõõtetehnikas ja mujal.

13-18. Termotakisti

Termotakistiteks ehk *termistoorideks* nimetatakse pooljuhttakisteid, mille takistus sõltub tugevasti temperatuurist. Termistoridel on negatiivne takistuse temperatuuritegur, mille absoluutväärtus on sadu kordi suurem kui metallidel. Temperatuuri tõusu korral põhjustab termistoride takistuse vähenemist vabade laengukandjate arvu suurenemine soojusenergia mõjul.

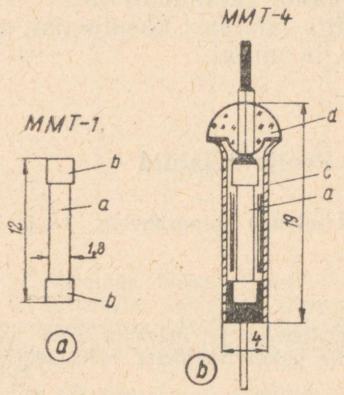


Joon. 13-74. MMT-tüüpi termistori takistuse muutumine sõltuvalt temperatuurist.

Takistuse sõltuvus temperatuurist on ühe termistori tüübi kohta näidatud joonisel 13-74.

Termistori kuumenemine toimub kas soojusülekande teel ümbritseva keskkonna mõjul või siis termistori või tema küttekeha läbiva voolu toimel.

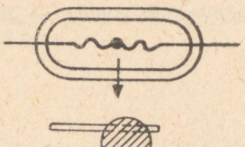
Selleks et välistada ümbritseva keskkonna mõju, kaetakse termistor kas kaitseümbrisega või paigutatakse klaaskesta.



Joon. 13-75. ММТ-tüüpi termistori ehitus.
a — takisti keha; *b* — kontaktnupud; *c* — metallist kaitsekapsel; *d* — klaasisolaator.

Sõltuvalt otstarbest on termistoride ehitus erinev ja neil on kas varda, ketta või kuulikese kuju (joon. 13-75 ja 13-76).

Helmekujulise termistori ehitus on näidatud joonisel 13-76. 3 × 8 mm suurusesse klaaskesta on paigutatud pooljuhtmaterjalist kuulike, mille takistus on 150 Ω. Kuulikese külge on kinnitatud volframist väljaviigud.



Joon. 13-76. Т8Д-tüüpi helmekujulise termotakisti ehitus.

Neil termistoridel on suhteliselt väike soojuslik inerts ja seepärast võib neid kasutada näiteks kõrgsagedusvoolude mõõtmiseks nende takistuse muutumise järgi. Takistuse muutust põhjustab kuumenemine mõõdetava voolu toimel.

Nõelakujulistes mikrotermistorides on mõne sajandiku millimeetrise läbimõõduga pooljuhtmaterjalist kuulike koos plaatinast väljaviikudega pressitud klaasümbrisesse,

mille välisläbimõõt on 0,5 mm. Klaasümbrise pikkus on 3 ... 100 mm. Selline termistor võimaldab mõõta temperatuuri vahemikus —70 ... +250°C ja tal on väike soojuslik inerts — mõõdetav sekundi sajandikosades.

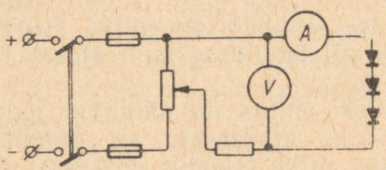
Termistorid on leidnud väga laialdast kasutamist, eriti automaatikas, mõõtetehnikas ja mujal.

13-19. Laboratoorne töö. Pooljuhtalaldid

Enne laboratoorse töö tegemist tutvuda paragrahvide 13-4 ja 13-5 sisuga.

Tööplaan

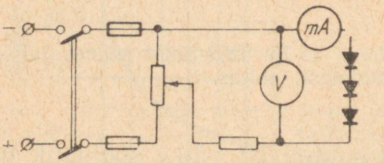
1. Tutvuda tööks vajalike seadistega ja märkida üles nende põhilised tehnilised andmed. Alaldite puhul tingimata välja selgitada nende nimivool ja -pinge.



Joon. 13-77. Lülitusskeem alaldi pärivoolu kõvera saamiseks.

2. Koostada lülitus (joon. 13-77) ja näidata seda juhendajale.

3. Pinge mitmesuguste väärtuste korral märkida ampermeetri ja voltmeetri näidud tabelisse 13-1 ja joonestada pärivoolu I_p graafik sõltuvalt pingest U, s. o. $I_p = f(U)$.



Joon. 13-78. Lülitusskeem alaldi vastuvoolu kõvera saamiseks.

4. Koostada lülitus (joon. 13-78) ja näidata seda juhendajale.

5. Samadel pinge väärtustel, mida kasutasite 3. punktis, märkida tabelisse 13-1 milliampermeetri ja voltmeetri näidud ning joonestada vastuvoolu I_v graafik sõltuvalt pingest U, s. o. $I_v = f(U)$.

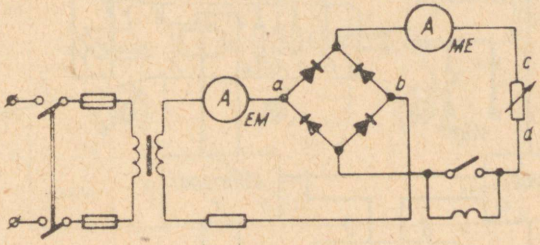
6. Iga 3. ja 5. punktis kasutatud pinge U väärtuse jaoks leida päri- ja vastuvoolu suhe, s. o. määrata alaldamistegur $k_a = I_p/I_v$. Joonestada alaldamisteguri graafik sõltuvalt pingest, s. o. $k_a = f(U)$.

Tabel 13-1

Katse nr.	U	I_p	I_v	$k_a = \frac{I_p}{I_v}$	Märkusi
	V	A	mA	—	

7. Koostada lülitus (joon. 13-79) ja näidata seda juhendajale.
8. Erinevatel takistuse (koormuse) väärtustel märkida suletud ühepooluselise vinnaklüliti korral tabelisse 13-2 vahelduvvoolu efektiivväärtust I ja alaldatud voolu keskväärtust I_k mõõtvate ampermeetrite näidud.

Iga väärtuse korral määrata suhe I/I_k.



Joon. 13-79. Lülitusskeem laboratoorseks tööks 13-19.

Tabel 13-2

Katse nr.	I	I_k	$\frac{I}{I_k}$	Märkusi
	A	A	—	

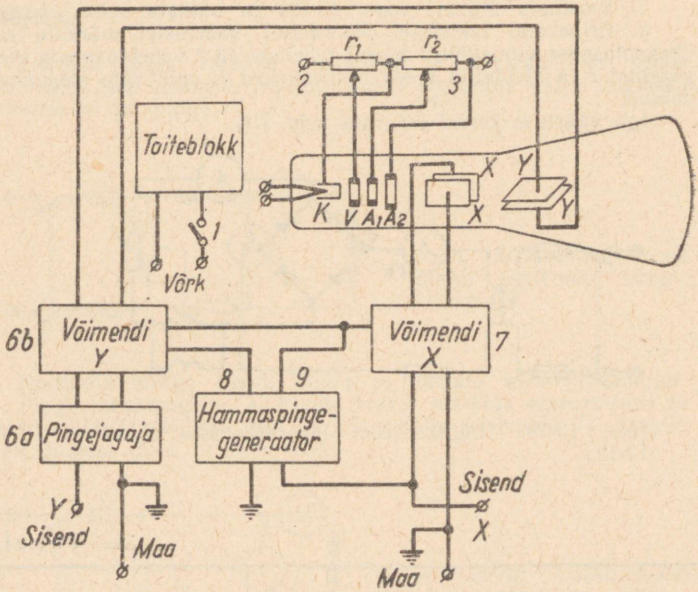
9. Ühendada klemmidega *ab* (joon. 13-79) elektronostsillograaf ja joonistada üles alaldile antava vahelduvpinge kõver.

Lülitada elektronostsillograaf klemmidele *cd* (joon. 13-79) ja joonistada alaldatud pinge kõver tarbijal nii suletud kui ka avatud ühepooluselise vinnaklüliti korral.

13-20. Laboratoorne töö. Elektronostsillograaf

Enne laboratoorse töö tegemist tutvuda paragrahvide 13-13, 13-15 ja 13-16 sisuga.

Joonisel 13-80 on kujutatud ЭО-7-tüüpi ostsillograafi blokkskeem, joonisel 13-81 aga selle välisvaade. Ostsillograafi esiküljel on peale ekraani veel juhtimispaneel.



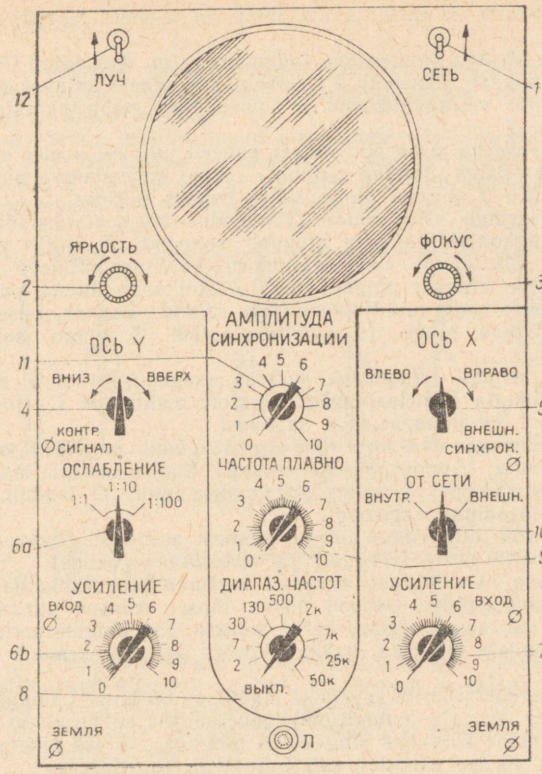
Joon. 13-80. Elektronostsillograafi ЭО-7 blokkskeem.

Ostsillograafi toidetakse vahelduvvooluvõrgust pingega 127 või 220 V ja ta ühendatakse võrku painduva juhtme abil.

Paneelil asuvad juhtimisnupud.

Lüliti *1* (joon. 13-80 ja 13-81) abil lülitatakse ostsillograaf vahelduvvooluvõrku; seejuures süttib signaallamp *Л*.

Nupp *2* kirjaga «*Яркость*» (heledus) on ühendatud reostaadi r_1



Joon. 13-81. Elektronostsillograafi Э0-7 väliskuju.

liugkontaktiga (joon. 13-80). Nupu pööramisel muutub tüürelektroodi potentsiaal ja muutub ka elektronide hulk kiires, s. t. muutub ostsillograafi ekraanil oleva täpi heledus.

Nupp *3* kirjaga *«Фокус»* (fookus) on ühendatud reostaadi r_2 liugkontaktiga. Nupu pööramisel muutub esimese anoodi A_1 potentsiaal ja fookuskaugus.

Osutinupud *4* ja *5* vastavalt kirjadega *«Ось Y»* (*Y*-telg) ja *«Ось X»* (*X*-telg) (joon. 13-81) on ühendatud pingejagurite liugkontaktidega, millede abil muudetakse hälvitusplaatide potentsiaa'e, seega ka elektronkiire asukohta ekraanil, nihutades seda vastavalt *Y*- või *X*-telje sihis.

Osutinupp *6a* kirjaga *«Ослабление»* (nõrgendamine) on ühendatud võimendi *Y* sisendi pingejaguri ümberlülitiga. Kui nupp on asendis 1 : 1, siis võib sisendklemmidele anda vahelduvpinget efektiivväärtusega kuni 2,5 V; kui nupp on asendis 1 : 10, ei tohi pinge si-

sendklemmidel ületada 25 volti, ja kui nupp on asendis 1 : 100, siis 250 volti.

Osutinupp *6b* kirjaga *«Усиление»* (võimendus) on ühendatud liugkontaktiga, mis muudab võimendi *Y* elektronlambi võrele antavat pinget; selle võimendi väljundklemmid on ühendatud elektronkiiretoru hälvitusplaatidega *Y*.

Nii võib nuppude *6a* ja *6b* abil muuta paneeli vasakul poolel asuvatele klemmidele *«Вход—Земля»* (sisend — maa) rakendatava pinge ja hälvitusplaatidele *Y* antava pinge suhet laiades piirides.

Osutinupp *7* kirjaga *«Усиление»* (võimendus horisontaalsuunas) on ühendatud liugkontaktiga, mis muudab võimendi *X*, mille väljundklemmid on ühendatud elektronkiiretoru hälvitusplaatidega *X*, elektronlambi võrele antavat pinget. Nupu *7* abil saab muuta paremale paneeli poolele paigutatud klemmidele *«Вход—Земля»* (sisend — maa) rakendatava pinge ja hälvitusplaatide *X* pinge suhet (joon. 13-80).

Osutinupu *8* kirjaga *«Диапазон частот»* (sageduspiirkond) abil saab astmeliselt muuta hammaspingegeneraatori mahtuvust *C* (joon. 13-54) ja järelikult ka hammaspinge sagedust.

Osutinupu *9* kirjaga *«Частота плавно»* (sagedus sujuvalt) abil võib sujuvalt muuta hammaspingegeneraatori kondensaatori laadimistakistust (joon. 13-54) ja seega ka kondensaatori *C* laadumise kiirust ning hammaspinge sagedust.

Osutinupp *10* võib olla viidud ühesse kolmest asendist: *«Внутренняя»* (sisemine), *«От сети»* (võrgust) ja *«Внешняя»* (väline).

Selleks et saada ostsillograafi ekraanil uuritava pinge liikumatut kujutist, peab hammaspinge periood olema täpselt võrdne uuritava pinge perioodiga või temast täisarv korda suurem. Kui pingete perioodid nimetatud nõudele ei vasta, hakkab kõvera kujutis ekraanil liikuma.

Hammaspingegeneraatorite sageduse stabiilsus on halb. Liikumatu kujutise saamiseks on vaja hammaspingegeneraatorit sünkroniseerida kas uuritava või mõne kõrvalise pingeallika pingega, näiteks pingega, mille sagedus on võrdne ostsillograafi toitevõrgu sagedusega.

Sünkroniseeriv pinge antakse läbi trafo hammaspingegeneraatori türatroni võrele, mis paneb türatroni kindla sagedusega süttima ja sünkroniseerib pinge.

Uuritava pingega sünkroniseerimisel viiakse osutinupp *10* asendisse *«Внутренняя»*; ostsillograafi toitevõrgu pingega sünkroniseerimisel aga asendisse *«От сети»*. Välisest pingeallikast, mis peab olema ühendatud klemmidega *«Внешняя синхронизация»* (väline sünkroniseerimine), sünkroniseerimisel viiakse osutinupp asendisse *«Внешняя»*.

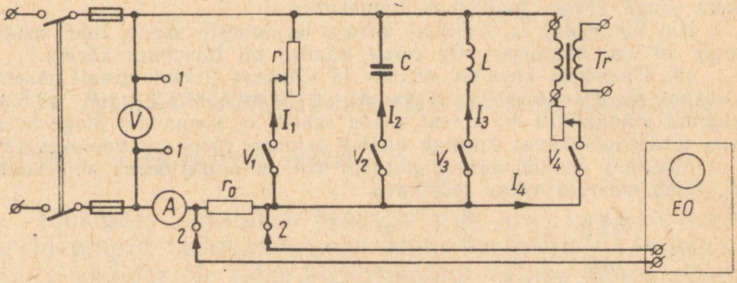
Osutinupu *11* kirjaga *«Амплитуда синхронизаций»* (sünkroniseerimise amplituud) abil reguleeritakse sünkroniseeriva pinge amplituudi, mis peab olema seda suurem, mida rohkem generaatori sagedus erineb sünkroniseeriva pinge sagedusest.

Lüliti *12* kirjaga *«Луч»* (kiir) on mõeldud elektronkiire välja- ja sisselülitamiseks. Elektronkiire tekitatud heledat fokuseeritud täppi ei tohi jätta liikumatuna seisma, et vältida ekraani tuhmiks muutumist.

Tööplaan

1. Tutvuda tööks vajalike aparaatidega, märkida üles nende nimiväärtused, täpsusklassid, süsteem, tehase number, valmistajatehas ja muud andmed.

2. Seada juhtimisnupud järgmistesse asenditesse: *1* — väljas; *2*, *3*, *4*, *5* — keskmises asendis; *6a* — asendis 1 : 100; *6b* ja *7* — nullasendis; *8* — asendis 30 või 130; *9* — nullasendis; *10* — asendis *«Внутренняя»*; *11* — asendis *2* või *3*; *12* — sees.



Joon. 13-82. Lülitusskeem elektronostsillograafi ühendamiseks laboratoorses töös 13-20.

3. Koostada lülitus (joon. 13-82), paneeli vasakul poolel olevad ostsillograafi klemmid *«Вход»* ja *«Земля»* ühendada vooluringi punktidega *1-1* ja näidata seda juhendajale.

4. Ühendada ostsillograafi toiteblokk vahelduvvooluvõrguga, lülitada ta lüliti *1* abil sisse.

5. Pärast seda, kui ekraanile on ilmunud helendav täpp, reguleerida see nuppude *2* ja *3*, s. o. *«Яркость»* ja *«Фокус»*, abil teravaks ning piisavalt heledaks.

6. Osutinuppude *4* ja *5*, s. o. *«Ось Y»* ja *«Ось X»* abil seada täpp ekraani keskpunkti.

7. Sulgeda kahepooluseline vinnaklüliti (joon. 13-82).

8. Osutinuppude *6a* ja *6b* pööramisega valida võimendus, mille

Tabel 13-3

Jrk. nr.	Vooluringi elemendid	U	AB	m_U	I	AO	m_I	I_m
		V	mm	V/mm	A	mm	A/mm	A
1	Reostaat							
2	Kondensaator							
3	Pool							
4	Transformaator							

juures pinge positiivse ja negatiivse amplituudi summale vastav vertikaaljoon ekraanil oleks vordne 0,25...0,40 ekraani läbimõõduga. Mõõta selle joone AB pikkus, mõõta voltmeetri abil pinge U ja määrata pinge mõõtkava (mastaap):

$$m_U = \frac{2\sqrt{2}\,U}{AB}.$$

Mõõdetud ja arvutatud suuruste väärtused märkida tabelisse 13-3.

9. Reguleerimisel osutinupu *9* abil saada püsiv liikumatu uuritava pinge kõver. Joonistada pingekõver.

Kui liikumatut ja stabiilset kõverat ei õnnestu saada, tuleb osutinupp *10* viia asendisse *«От сети»*, saades nii liikumatu kõvera.

10. Ühendada klemmid *«Вход»* ja *«Земля»* (ostsillograafi paneeli vasakul poolel) takisti r_0 klemmidega (klemmid 2-2, joon. 13-82); suletud vinnaklülliti V_1 korral saada takisti r_0 klemmidel pingekõver, mis teises mõõtkavas kujutab endast esimese rööpharu voolukõverat.

Mõõtnud voolukõvera amplituudi OA ja ampermeetri abil voolu I_1, tuleb määrata voolu mõõtkava

$$m_I = \frac{\sqrt{2}\,I_1}{AO}.$$

Joonistada voolukõver.

11. Sulgeda lüliti V_2 (ülejäänud ühepooluselised vinnaklülitid olgu avatud), saada ekraanil kondensaatori vooluringi voolukõver ja joonistada see.

Mõõta voolu I_2 efektiiv- ja amplituudväärtus.

12. Sulgeda järjekorras lülitid V_3 ja V_4 (ülejäänud ühepooluselised vinnaklülitid on avatud), saada voolude I_3 ja I_4 kõverad. Joonistada voolukõverad ja mõõta voolude efektiiv- ja amplituudväärtused.

Mõõtmis ja arvutustulemused märkida tabelisse 13-3.

14. ELEKTRIAJAMID JA JUHTIMISAPARATUUR

14-1. Elektriajami mõiste

Tööstuses käitatakse peaaegu kõik masinseadmed ja tööpingid elektrimootorite abil. Vastavalt töömasinate vajadustele tuleb elektrimootor valida sobiva võimsuse ja karakteristikutega ning peab olema väliskeskkonna kahjulike mõjude eest kaitstud. Elektrimootori juhtimisseadme moodustab käivitus-, reguleerimis- ja kaitseaparatuur. Mootor on töömasinaga sidestatud ülekandemehhanismiga (sidur, reduktor). Elektriajamiks nimetatakse masinseadme osa, mis koosneb ühest või mitmest elektrimootorist, ülekandemehhanismist ja juhtimisseadmest.

Üheks tähtsamaks etapiks elektriajami projekteerimisel on töömasina nõuetele vastava mootori valimine, siinjuures ka ajami mootori vajaliku ning piisava võimsuse määramine. Tuleb silmas pidada, et mingi mootori poolt arendatav võimsus ei ole konstantne suurus, vaid sõltub koormuse iseloomust ja ümbruse temperatuurist. Varem oli juttu mootori ülekoormatavusest, s. o. suhtest M_m/M_n. Tööstuses üldkasutatavatel asünkroonmootoritel on see 1,8 ... 2,5, kraanade asünkroonmootoritel 2,3 ... 3,3, sünkroonmootoritel 1,8 ... 2,5. Ülekoormatavus on suurus, mis näitab füüsikalist piirvõimsust, mida masin suudab lühiajaliselt arendada. Selleks et vältida mootori seiskumist, ei tohi töömasina pidurdav moment ületada suurust M_m. Alalisvoolumootoritel füüsikalist piirvõimsust pole (vt. § 8-17 ja 8-18), kuid kommuteerimise halvenemine ja kommutaatoril ringtule tekkimise võimalus piiravad lühiajaliselt arendatavat maksimaalset momenti. Alalisvoolu-

mootorite ülekoormatavus on nimi-pöörlemiskiiruse juures ligikaudu 2,5, kraanade alalisvoolumootoritel aga 3,0 . . . 4,0.

14-2. Elektrimasinate kuumenemine ja jahutamine

Pikaajalisel töötamisel on mootori nimimoment ja nimivõimsus määratud mootori kuumenemisega, mis on piiratud peamiselt mähise juures kasutatava isolatsiooni kuumuskindluse klassiga. Tabelis 14-1 on toodud elektrimasinaehituses kasutatavate materjalide piirtemperatuuride väärtused.

Terassüdamikud ja teised osad, mis puutuvad kokku mähistega, ei tohi *A*- ja *B*-klassi kuuluva mähise isolatsiooni korral olla kõrgema temperatuuriga kui vastavalt 65 ja 85 °C. Kontaktrõngaste kõrgeim temperatuur on samade mähise isolatsiooni klasside korral vastavalt 70 ja 90 °C, kommutaatori temperatuur aga 65 ja 85 °C. Liuge-

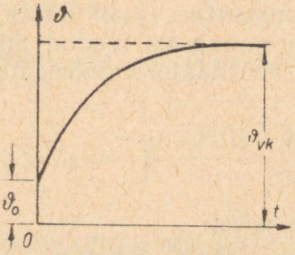
Tabel 14-1

Elektriisoleermaterjalide klassid

Kuumuskindluse klass	Lubatav piirtemperatuur °C	Materjali iseloomustus
Y	90	Immutamata puuvillased kangad, kedrus, paber ja kiudmaterjalid tselluloosist ning siidist
A	105	Samad materjalid, kuid immutatutena
E	120	Mõningad sünteetilised orgaanilised kiled
B	130	Orgaanilisi sideaineid sisaldavad vilgust, asbestist ja klaaskiust materjalid
F	155	Samad materjalid ühenduses sünteetiliste side- ja immutussegudega
H	180	Samad materjalid, kuid ühenduses räniorgaaniliste side- ning immutusainetega
C	üle 180	Vilk, keraamilised materjalid, klaas, kvarts, asbest, mida kasutatakse sideaineteta või anorgaaniliste sideainetega

laagrite temperatuur ei tohi olla üle 80 °C, veerelaagritel aga 95 °C.

Masina osadele lubatavad piirtemperatuurid on toodud jahutava keskkonna temperatuuri +35 °C kohta. Kui töötava masina isolatsiooni temperatuur on kõrgem kui tabelis 14-1 näidatud, lüheneb isolatsiooni tööiga tublisti. Madalam temperatuur pikendab masina tööiga, kuid sel juhul kasutatakse masinat halvasti ja see pole ökonoomne.



Joon. 14-1. Masina kuumenemise kõver tööprotsessis.

Joonisel 14-1 on toodud masina kuumenemise kõver tööprotsessis, s. o. $\vartheta = f(t)$, kus ϑ on masina temperatuur, t aga tööaeg. Masina sisselülitamise hetkel ($t = 0$) on tema kõigi osade temperatuur võrdne ümbritseva keskkonna temperatuuriga ϑ_0. Tööaja algul on masina ja ümbritseva keskkonna temperatuuride vahe väike, järelikult on väike ka ümbritsevasse keskkonda antav soojushulk, peaaegu kogu soojus läheb masina temperatuuri tõstmiseks. Kõver tõuseb järsult. Mida enam masin kuumeneb, seda suurem osa soojusest kiirgub ümbritsevasse keskkonda ja masina temperatuuri kasv aeglustub. Mõne aja pärast saab ühes ajaühikus ümbrusesse antav soojushulk võrdseks sama aja vältel masinas eralduva soojushulgaga ja masina temperatuuri tõus lõpeb. Väljakujunenud temperatuuril ϑ_{vk} ja muutumatul koormusel võib masin töötada määramatult pikka aega. Sellist töörežiimi nimetatakse kestevrežiimiks.

Masinaid, millel pole ette nähtud spetsiaalseid abinõusid jahutamiseks, nimetatakse loomuliku jahutusega masinateks. Selline soojuse ärajuhtimine loomulikul teel on aeglane ja seda kasutatakse vaid väga väikese võimsuse korral (kümned vatid).

Tavaliselt paigutatakse rootori võllile ventilaator, mis

imeb kuumenenud õhu masinast välja. Need on nn. omaventilatsiooniga masinad. Välisventilatsiooniga masinates juhitakse jahutusõhk masinasse eraldi asetsevast ventilaatorist. Seda moodust kasutatakse vaid suure võimsusega masinate puhul.

14-3. Mootori võimsuse valik kestevrežiimis

Kui mootori koormus on konstantne (joon. 14-2), siis võib ta võimsust määrata käsiraamatutes toodud mitmesuguste valemite abil. Näiteks ventilaatorit pöörlema paneva mootori võimsus

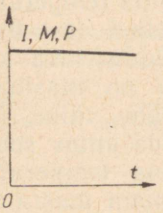
$$P = \frac{QH}{102\eta_v\eta_{ü}} \text{ kW},$$

kus Q on ventilaatori tootlikkus m³/s;

H — ventilaatori poolt arendatav rõhk mm vs.;

η_v — ventilaatori kasutegur (0,3 ... 0,7);

$\eta_{ü}$ — ülekande kasutegur (mootorilt ventilaatorile).



Joon. 14-2. Koormusgraafik mootori konstantse koormuse korral.

Kui mootor töötab muutuva koormusega, on tema võimsuse määramiseks vajalik koormusgraafik $I = f(t)$, nagu see on joonisel 14-3 näidatud kiirpsjoonega. See graafik asendatakse astmelise voolukõveraga, kusjuures konstrueerimisel eeldatakse, et aja t_1 vältel tarbib mootor voolu I_1, aja t_2 vältel voolu I_2 jne. Terve töötsükli aja t_{ts} vältel astmeliselt muutuv vool asendatakse konstantse vooluga, mille soojuslik toime on samaväärne astmeliselt muutuva voolu soojusliku toimega. Seda voolu nimetatakse ekvivalentvooluks I_{ekv}. Siis võime kirjutada, et

$$I^2_{ekv}rt_{ts} = I^2_{ekv}r(t_1 + t_2 + \ldots + t_n) =$$

$$= I_1^2rt_1 + I_2^2rt_2 + \ldots + I_n^2rt_n.$$

Siit arvutatakse ekvivalentvool

$$I_{ekv} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \ldots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \ldots + t_n}}. \qquad (14\text{-}1)$$

Ekvivalentvool peab olema võrdne valitava mootori nimivooluga või sellest väiksem:

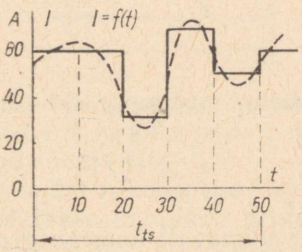
$$I_n \geqslant I_{ekv}.$$

Näide 14-1. Valida mootori nimivool vastavalt graafikule joonisel 14-3:

$$I_n \geqslant I_{ekv} = \sqrt{\frac{60^2 \cdot 20 + 30^2 \cdot 10 + 70^2 \cdot 10 + 50^2 \cdot 10}{20 + 10 + 10 + 10}} = 55{,}7 \text{ A}$$

Rööpergutusega alalisvoolumootoritel ja sünkroonmootoritel, mis töötavad konstantse ergutusvooga,

$$M = c_M \Phi I \equiv I.$$



Joon. 14-3. Koormusgraafik mootori võimsuse valikuks kestevrežiimis.

Seepärast võib ekvivalentvoolu valemi asemel kasutada ekvivalent-pöördemomendi valemit

$$M_{ekv} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \ldots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \ldots + t_n}} \qquad (14\text{-}2)$$

ja valida mootor selle momendi järgi.

Kui koormus mootori pöörlemiskiirusele praktiliselt ei mõju (jäik kiiruskarakteristik) või kui koormusgraafikuks

(joon. 13-3) on $P = f(t)$, siis valitakse mootor ekvivalentvõimsuse

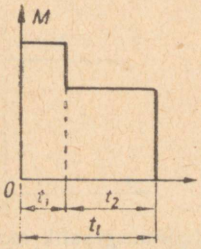
$$P_{ekv} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \ldots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \ldots + t_n}}, \qquad (14\text{-}3)$$

järgi.

See on võimalik sellepärast, et kui $\omega = \text{const}$, siis $P = M\omega \equiv M$.

14-4. Mootori võimsuse valik lühiajalises režiimis

Lühiajalises režiimis töötab mootor piiratud aja t_l vältel, mille jooksul temperatuur ei jõua tõusta väljakujunenud väärtuseni. Siis lülitatakse mootor välja ja ta jahtub ümbritseva keskkonna temperatuurini. Nii töötavad lüüsiseadmete, ülestõstetavate sildade ja metallilõikepinkide kinnitusrakiste mootorid.



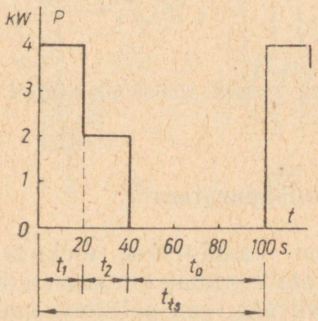
Joon. 14-4. Mootori koormusgraafik lühiajalises režiimis.

Niisugusel juhul kasutatakse vastavalt koormusgraafikule joonisel 14-4 valemit (14-2), arvestades, et $t_1 + t_2 + \ldots + t_n = t_l$.

Seejärel valitakse kataloogi järgi mootor, mis on mõeldud lühiajaliseks tööks ja mille nimimoment on tööaja t_l vältel ekvivalentmomendiga võrdne või sellest suurem, s. o. $M_n \geqslant M_{ekv}$. Järgnevalt kontrollitakse mootorit lühiajalisele ülekoormusele, s. t. kas I_m/I_{ekv} on antud mootorile lubatav.

14-5. Mootori võimsuse valik vaheajalises režiimis

Vaheajalisele ehk korduv-lühiajalisele töörežiimile on iseloomulik, et tööperioodid vahelduvad seisakutega. Seejuures kuumeneb mootor tööperioodi vältel väljakujunenud temperatuurini, seisaku ajal aga ei jõua jahtuda ümbruse temperatuurini. Niisugusele tööle vastav diagramm on toodud joonisel 14-5. See töörežiim on iseloomulik kraanade, liftide, tõstemehhanismide, ekskavaatorite ja reale valtsimismasinate mootoritele. Neil spetsiaalsetel kraanade ja metallurgiatööstuse jaoks mõeldud seeria-mootoritel on tugevdatud ehitus ja tavalisest suurem käivitusmoment.



Joon. 14-5. Mootori koormusgraafik vaheajalises režiimis.

Nende mootorite passis näidatakse ära suhteline töötamiskestus ε (vene k. ПВ), mis on võrdne kogu tööaja $t_1 + t_2 + \ldots + t_n$ ja summaarsest tööajast ja seisuajast t_0 koosneva kogu tsükli aja t_{ts} suhtega ning väljendatakse tavaliselt protsentides:

$$\varepsilon = \frac{t_1 + t_2 + \ldots + t_n}{t_1 + t_2 + \ldots + t_n + t_0} \cdot 100\% \qquad (14\text{-}4)$$

Elektrimootoreid valmistatakse standardsetele suhtelise töötamiskestuse väärtustele $\varepsilon = 15$, 25, 40 ja 60%, kusjuures nimiväärtuseks loetakse $\varepsilon = 25\%$. Mida suurem on ε, seda väiksem on mootori nimivõimsus võrdsete gabariitide korral.

Mootor loetakse vaheajalises režiimis töötavaks, kui tsükli kestus ei ületa 10 minutit.

Arvestused tehakse ekvivalentvõimsuse valemi (14-3)

järgi, seejärel leitakse kraanamootorite kataloogist etteantud ε järgi mootori nimivõimsus. Juhul, kui leitud ε ei vasta lähimale standardsele väärtusele, arvutatakse valemi (14-3) järgi leitud ekvivalentvõimsus $P_{ekv\,1}$ ümber standardsele ε-le:

$$P_{ekv\,2} = P_{ekv\,1} \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}}. \qquad (14\text{-}5)$$

Näide 14-2. Valida nimivõimsus mootorile, mille koormusgraafik on toodud joonisel 14-5:

$$P_{ekv} = \sqrt{\frac{4^2 \cdot 20 + 2^2 \cdot 20}{20 + 20 + 60}} = 2 \text{ kW};$$

$$\varepsilon = \frac{20 + 20}{20 + 20 + 60} 100\% = 40\%.$$

Vastavalt väärtusele $\varepsilon = 40\%$ leitakse kraana alalisvoolumootori või asünkroonmootori võimsus.

14-6. Elektrimasinate juhtimisaparatuur

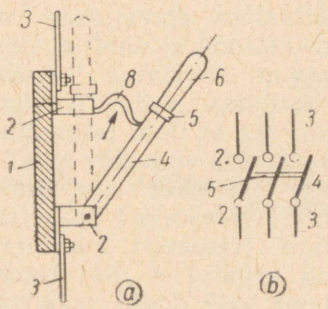
Kaasaegsetes elektriajamites kasutatakse elektriaparaate kõige erinevamateks operatsioonideks: mootorite käivitamiseks ja seiskamiseks, kiiruse ja pöörlemissuuna muutmiseks, kaitseks ülekoormuse eest jne. Sõltuvalt lülitusskeemi kuuluvate aparaatide konstruktsioonist võib teenindav personal teostada neid operatsioone nii käsitsi kui ka automaatjuhtimise teel.

Veel käesoleva ajani toimub mootorite töö juhtimine paljudel juhtudel käsitsi ja seepärast on järgnevalt toodud mõnede levinumate käsitsi juhitavate seadmete ja aparaatide kirjeldused. Arvestades automaatjuhtimise vaieldamatuid eeliseid on loodud rida aparaate, mille abil võib toimuda elektrimootori käivitamine, reguleerimine, seiskamine ja kaitse inimese osavõtuta. Enamasti tagavad need seadmed teenindamise suurema ohutuse ja annavad töös-tuses suurt efekti.

14-7. Vinnaklülitid

Vinnaklüliteid kasutatakse alalis- ja vahelduvvooluringides elektrimasinate ja tarbijate käsitsi sisse- ja väljalülitamiseks. Enamasti kasutatakse neid pingetel kuni 500 V ja voolude juures kuni 1000 A.

Vinnaklüliti väliskuju on näidatud joonisel 14-6, *a* ja tema tähis, mida kasutatakse skeemides, joonisel 14-6, *b*.

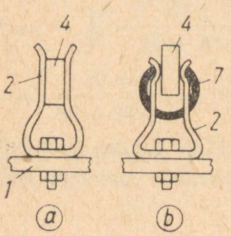


Joon. 14-6. Lihtne vinnaklüliti.

Isoleermaterjalist plaadile *1* on kinnitatud kontaktlehtede (põskede) paarid *2*, mis on ühendatud juhtmete otstega *3*. Alumiste kontaktlehtede vahele on šarniirselt kinnitatud metallist noad *4*, mis on omavahel ühendatud isoleermaterjalist liistuga (traaversiga) *5*. Nugade pööramiseks ja ülemiste ning alumiste kontaktlehtede *2* ühendamiseks on selle liistu külge kinnitatud käepide *6*. Joonisel 14-6, *b* on toodud kolmepooluselise vinnaklüliti tähis, kuid vinnaklülitid võivad olla ka ühe-, kahe- ja enamapooluselised. Liist *5* joonisel 14-6, *b* näitab, et kõik kolm nuga sulevad ja katkestavad liini üheaegselt.

Et tagada head kontakti, peavad kontaktlehed *2* suruma end tihedalt vastu nuge. Sellepärast valmistatakse nad vetruvast materjalist: messingist, külmalt valtsitud vasest, spetsiaalsest pronksist. Joonisel 14-7, *a* kujutatud kontaktlehed *2* ja nuga *4* peavad moodustama teineteisega pindpuute ja kindlustama voolule minimaalse takistuse ning järelikult ka minimaalse pingelangu kontaktidel. Sellist kontaktlehtede asendit on aga võimatu välja reguleerida ja kokkupuutumine toimub vaid pinna üksikutes punk-

tides. Õnnestunum konstruktsioon, mis tagab 2 . . . 3 korda väiksema üleminekutakistuse kui esimesel juhul, on kujutatud joonisel 14-7, *b*. Siin on vetruvate kontaktlehtede *2* otstel silindrilised pinnad ja nad puutuvad noaga *4* kokku mööda sirgjooni selle külgedel. Selleks et suurendada survet nugadele, surutakse kontaktlehed kokku tugeva rõngasvedruga *7*. Sellega tagatakse küllaldane surve, sisse- ja väljalülitamistel aga hõõrutakse noalt ja kontaktlehtedelt maha oksiidikiht, millega väheneb kontakti takistus ja kontaktlehtede kuumenemine.



Joon. 14-7. Vinnaklüliti kontaktlehtede konstruktsioon.

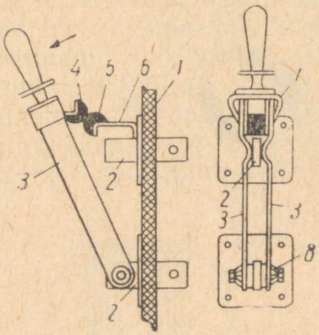
Vinnaklüliti avamisel tekib ülemiste kontaktlehtede *2* (joon. 14-6, *a*) ja noa *4* vahel elektrikaar *8*, mis sulatab kontakte ja halvendab vinnaklülitit. Joonisel 14-6 näidatud vinnaklülitil on ainult töökontaktid (kontaktlehed), mis pole kaitstud elektrikaare toime eest; teda kasutatakse vahelduvvooluringides kuni 220 V pingega. Kui katkestatav vool on väiksem kui 70 . . . 100 A, siis elektrikaar kustub tema mehhaanilisel pikendamisel, s. o. noa eemaldamisel kontaktlehtedest. Suurte voolude korral liigub elektrikaar aga kiiresti üles, nagu on noolega näidatud joonisel 14-6, *a*, mis on tingitud vooluringis toimivate elektrodünaamiliste jõudude mõjust ja kaare poolt tugevasti kuumendatud õhu voolusest.

380- ja 500-voldise pingega vahelduvvooluseadmetes ja 200-voldise või kõrgema pingega alalisvooluseadmetes varustatakse koormuse all olevate vooluringide katkestamiseks mõeldud vinnaklülitid kaarekustutusseadistega.

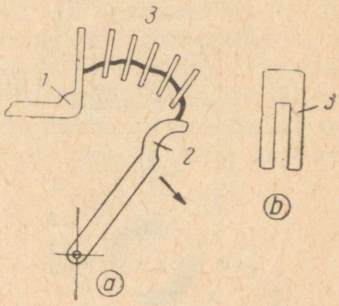
Joonisel 14-8 on kujutatud üks sellise vinnaklüliti poolus. Isoleermaterjalist alusest *1* on läbi viidud ja selle külge kinnitatud kontaktlehed *2*, mida võib ühendada kontaktlehti kahest küljest haarava kaksiknoa *3* abil. Selleks

et saada joonkontakti, on nugadele kontaktlehe kohal antud poolsilindri kuju. Kaksiknoaga on jäigalt ühendatud kaart kustutav süsikontakt *4*, teine samasugune kontakt *5* on aga lehtvedru *6* abil ühendatud ülemise kontaktlehega *2*. Asendis, mis on kujutatud joonisel 14-8 vasakul, on töökontaktideks olevad kontaktleht *2* ja nuga *3* teineteisest lahutatud, kaart kustutavad kontaktid aga veel suletud. Noa edasisel liikumisel vasakule kontaktid *4* ja *5* lahutatakse teineteisest, nende vahel tekkiv elektrikaar aga kustub kiiresti. Nii on töökontaktide sulamine välistatud, kaart kustutavate kontaktide söest otsikuid saab aga vahetada. Noa ja kontaktlehtede vahelise kontakti parandamiseks surutakse nugade ülemised otsad vetruva klambri *7* vahele, alumised otsad aga kontaktlehe külge kinnitamisel mutrite alla paigutatud vedruseibide vahele.

Teine võimalus elektrikaare kustutamiseks on näidatud joonisel 14-9. Liikumatu kontakti *1* ja liikuva kontakti *2* kohal asub kaarekustutusvõre, mis koosneb reast metallplaatidest *3* (terasest). Eraldi on selline plaat kujutatud joonisel 14-9, *b*. Liikuva kontakti *2* eemaldumisel tekkiv elektrikaar liigub üles plaatide vahele ja jaguneb eraldi kaarteks. Iga sellise üksiku kaare põlemiseks on vajalik teatud kindel pinge. Kui jagada kaar nii suureks arvuks osadeks, et kontaktide *1* ja *2* vaheline pinge osutub väiksemaks üksikute kaarte põlemiseks vajalike pingete summast, siis kõik kaared kustuvad kiiresti. Mitmesuguse



Joon. 14-8. Kaarekustutuskontaktidega vinnaklüliti.



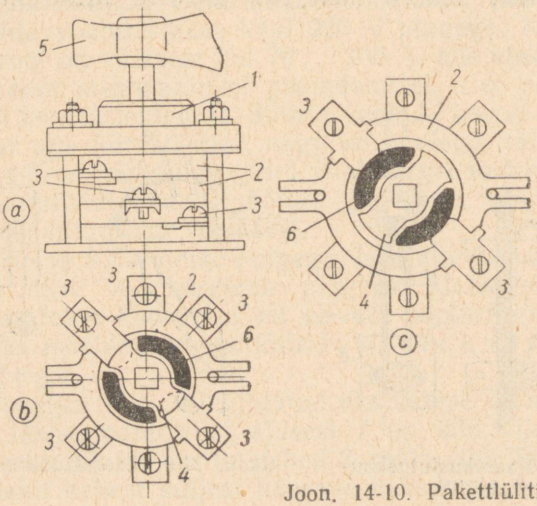
Joon. 14-9. Kaarekustutusvõre.

konstruktsiooniga kaarekustutuskontakte ja -võresid kasutatakse laialdaselt ka igat liiki automaatsetes lülitites.

Ohutustehnika nõuete kohaselt peavad vinnaklülitid pingetele 220, 380 ja 500 V olema kas kaitsekestaga või siis kangajamiga.

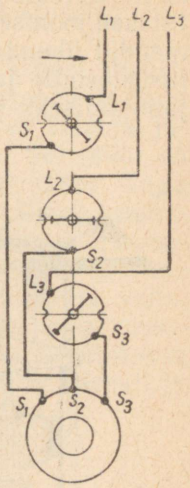
14-8. Pakettlülitid

P a k e t t l ü l i t i on väikeste mõõtmetega lülitamisseade, mida kasutatakse 10- kuni 400-ampriste voolude korral ja mis on mõeldud tööks vahelduvvooluvõrgus pingega kuni 380 V. Joonisel 14-10, *a* on kujutatud pakettlüliti välisvaade, joonisel 14-10, *b* aga tema pealtvaade, kusjuures ülemine kaas on eemaldatud. Lüliti koosneb liikumatutest isoleermaterjalist rõngastest (seibidest) *2*, millele on kinnitatud liikumatud kontaktid *3*. Viimastega on ühendatud võrgujuhtmed. Liikuvad kontaktid *4* on paigutatud nelinurksele võllile. Võlli pööramisel käepideme *5* abil võivad nad võtta kaks asendit, mis on teineteise suhtes 90° pööratud (näidatud joonisel 14-10, *b* ja *c*). Kontaktid *4* on kahekordsed ja nad haaravad vooluringi sulgemisel liikumatuid kontakte ülalt ja alt. Joonisel 14-10, *b* kujutatud asendis on liikumatud kontaktid *3* ühendatud kontaktide *4* abil, joonisel 14-10, *c* on nad aga lahutatud.



Joon. 14-10. Pakettlüliti.

Joon. 14-11. Asünkroonmootori lülitamine pakettlüliti abil.



Nii on see kõigil kolmel rõngal *2*, mis on asetatud ülestikku üksteise suhtes pööratuina, et oleks mugavam juhtmeid külge ühendada.

Liikuvate kontaktidega *4* asuvad ühes tasapinnas kahekordsed fiiberseibid *6*. Nad pöörduvad koos liikuvate kontaktidega ja katavad joonisel 14-10, *c* näidatud asendis kontakte *3* nii ülalt kui alt. Need seibid on vajalikud elektrikaare kustutamiseks. Kontaktide *3* ja *4* lahutamisel tekkiv elektrikaar lagundab fiibrit, mis eraldab vesinikku, süsihappegaasi ja veeauru, soodustades kaare kustumist. Lüliti ülemises osas kaane *1* all asub vedrumehhanism, mis küllaldase surve korral käepidemele *5* pöörab lüliti võlli kiiresti teise asendisse. Joonisel 14-11 on toodud asünkroonmootori lülitusskeem pakettlüliti kasutamise korral.

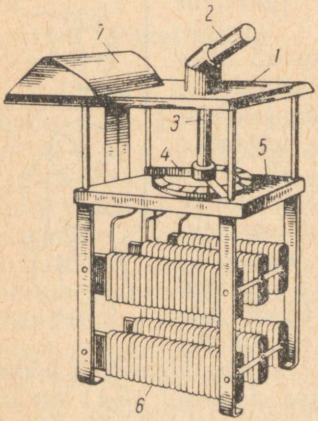
14-9. Elektrimootorite käivitus- ja reguleerimisreostaadid

Kõikides varem toodud elektrimootorite ja generaatorite lülitusskeemides on näidatud reostaadid, mis on mõeldud kas masina käivitamiseks või reguleerimiseks. Kõik reostaadid koostatakse standardsetest elementidest, mis kujutavad endast isoleermaterjalist alusele kinnitatud takisteid. Üks traatreostaadi raamtüüpi element on kujutatud joonisel 14-12. Terasplaadile *1* on paigutatud portselanist poolsilindrid *2*, mis on aluseks neile keritavale



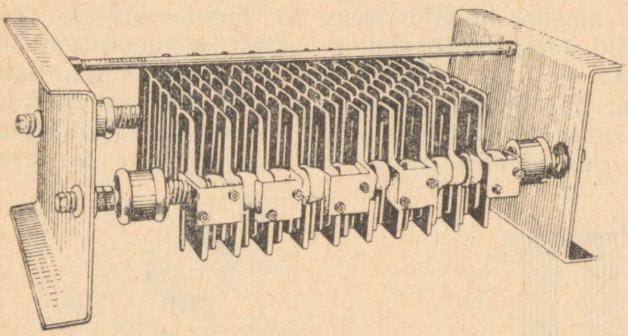
Joon. 14-12. Raamtüüpi takistuselement.

suure eritakistusega traadile. Sellistest elementidest koostatakse joonisel 14-13 toodule sarnane konstruktsioon. Elemendid ühendatakse omavahel elektriliselt vastavalt voolusüsteemile ja otstarbele ning paigutatakse paremaks jahutamiseks õliga täidetud paaki. Paagi ülemisele kaa-



Joon. 14-13. Raamtüüpi sektsioonidest reostaat.

nele *1* (joon. 14-13) on paigutatud käepide *2*, mille abil pööratakse võlli *3* koos libisevate kontaktharjadega *4*. Isoleermaterjalist plaadile *5* on kinnitatud liikumatud kontaktid, mis on ühendatud reostaadi sektsioonidega *6*. Karbi *7* all asuvad reostaadi väljundklemmid.



Joon. 14-14. Malmsektsioonidest takisti.

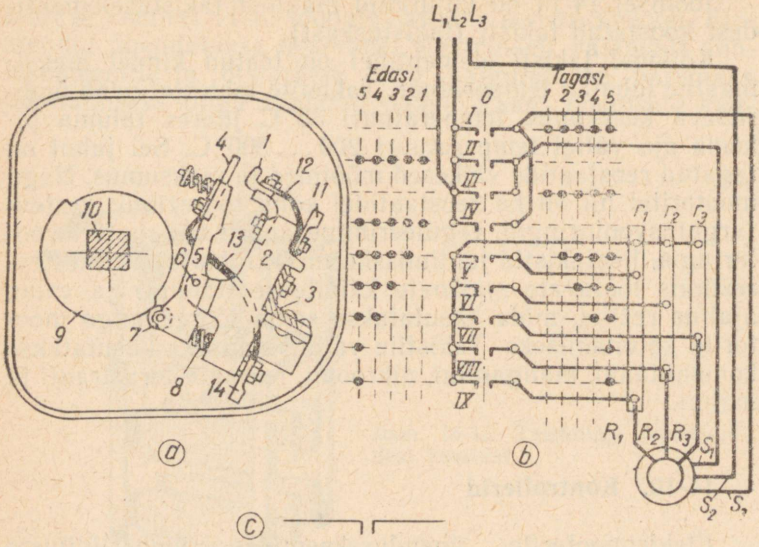
Joonisel 14-14 on kujutatud malmist takistuselementidest koostatud takisti (takistuskast).

Kõikidel takisti elementidel on teatud kindel maksimaalne lubatav temperatuur. Takistite materjal peab ümbritseva keskkonna temperatuuri 35° C juures taluma pikema aja vältel temperatuuri 200 ... 300° C. Sel juhul on tagatud reostaatide väikesed mõõtmed ja maksumus. Nagu mootoritel nii on ka reostaatidel kolm töörežiimi: kestev- (ergutusvooluringid, reguleerimine ankru või rootori vooluringis, lisatakistid juhtimisskeemis), lühiajaline (kestevrežiimis töötavate masinate käivitusreostaadid) ja vaheajaline režiim, mida kasutatakse sama töörežiimiga mootorite käivitamiseks. Takistite valmistamiseks kasutatakse konstantaani, manganiini, nikroomi, fekraali, terastraati ja malmi.

14-10. Kontrollerid

Elektrimootorite ühendusskeemides ümberlülituste tegemiseks, lisatakistite sisse- ja väljalülitamiseks käivitamisel ning mootorite pöörlemissuuna muutmiseks kasutatakse ümberlülitamise aparaate, mida nimetatakse kontrolleriteks. Kontroller kujutab endast ümberlülitatavat mehhanismi; takistid paigaldatakse komplektidena eraldi (joon. 14-14). Nagu vinnaklülitil võib olla mitu nuga, nii vastab ka kontrolleri lülitite arv katkestuskohtade arvule juhitavas lülituses. Erinevalt vinnaklülitist sulevad või katkestavad kontrolleri lülitid vooluringe katkestuskohtades mitte üheaegselt, vaid järjekorras, vastavalt teostatavale operatsioonile. Pealtvaade nukktüüpi kontrolleri lülitile on toodud joonisel 14-15, *a*.

Vertikaalraamile *3* on kinnitatud plastmassist isolaator *2*, millel asub lüliti liikumatu kontakt *1*. Viimasesse juhitakse vool ümberlülitatava ahela kaablikingalt *11* juhtme *12* abil. Liikuva kontakti *4* aluseks on plastmassist isolaator *5*, mis võib pöörduda teljel *6*. See kontakt ühendatakse võrgu kaablikingaga *14* juhtme *13* abil. Vedru *8* püüab liikuvat kontakti *4* suruda alati vastu kontakti *1*. Vertikaalvõllil *10* asub rulli *7* vastas nukkseib *9*, mille abil võib võlli *10* pöörates sulgeda või lahutada kontakte *4* ja *1*. Sellised lülitid (nukkelemendid) paigutatakse võllile *10* ülestikku, nende arv on määratud mootori lülitus-

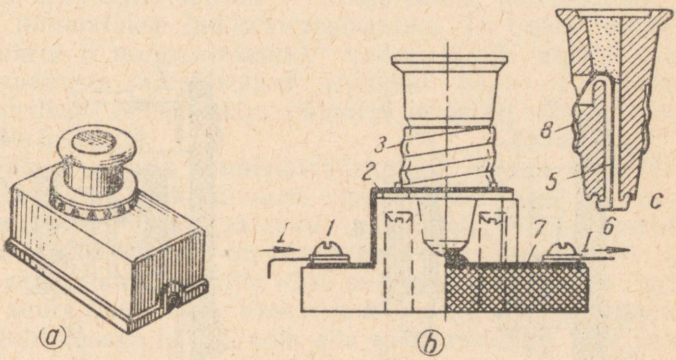


Joon. 14-15. Nukkmehhanismiga kontrolleri töötamine.

skeemiga. Kontaktrõngastega asünkroonmootori käivitusskeemil (joon. 14-15, *b*) on näidatud, et lüliteid peab olema 9 (*I, II, III, IV, V, VI, VII, VIII, IX*), nende tinglik tähistus on aga näidatud joonisel 14-15, *c*. Kontrolleri ülemisel kaanel on võlli *10* pöörava vända kohal näidatud asendid *1, 2, 3, 4, 5 edasi* ja *tagasi*. Suletuks tuleb skeemil (joon. 14-15, *b*) lugeda see lüliti, mille kohal on vända asendile vastaval joonel punkt. Asendis *O* on staator ühendatud võrguga klemmi S_2 abil; rootori vooluringi on lülitatud tähte ühendatud takistid r_1, r_2, r_3 ja mootor on välja lülitatud. Asendis *1 edasi* sulguvad lülitid *I* ja *IV*, staator ühendatakse võrku ja mootor hakkab pöörlema, kusjuures rootori vooluringi takistus on maksimaalne. Vända pööramisel asendisse *2* suletakse lüliti *V* ja takisti r_1 sillatakse osaliselt. Vända edasisel pööramisel asenditesse *3, 4, 5* sulguvad järk-järgult lülitid *VI, VII, VIII* ja *IX*, kusjuures sillatakse takistid kõigis rootori faasides.

14-11. Sulavkaitsmed

Sulavkaitsmed on seadised, mis kaitsevad seadmeid lühisvoolude eest. Nad ei taga aga kindlat kaitset ülekoormuse eest, sest nad võivad taluda nimivoolust 1,5 korda suuremat voolu tunni vältel ja kauemgi. Kaitsmesse on paigutatud sulavpanus e. sulavelement, mis lühise korral sulab ja seadme seega välja lülitab. Omavalmistatud sulavpanuste kasutamine on keelatud.

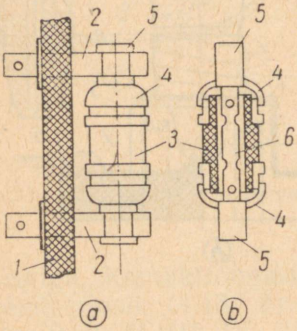


Joon. 14-16. Keermekaitse.

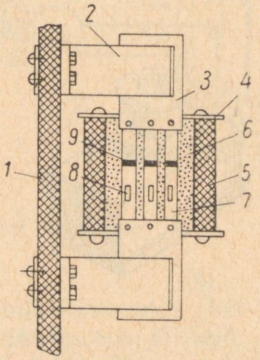
Joonisel 14-16, *a* on kujutatud keermekaitsme välisvaade, joonisel 14-16, *b* ja *c* aga tema lõige, kusjuures kaas on ära võetud, ja sulavpanusega kaitsekork lõikes. Korgi portselankeha ümber on metallkeere *8*, mille abil ta kaitsme padrunisse *3* keeratakse. Vool kulgeb klemmilt *1* mööda padruniga *3* ühendatud metall-lehte *2*, suundub korgi keermesse *8* ja sealt viimase külge joodetud sulavpanust *5* mööda läbi kontakti *6* teise klemmiga ühendatud juhtmesse *7*. Keermekaitsmeid kasutatakse kuni 380-voldiste pingete ja kuni 60-ampriste voolude korral. Kaitsekorke võib vahetada n.-ö. pinge all, sest seda saab teha voolu juhtivaid osi puudutamata.

Joonisel 14-17, *a*, *b* on näidatud torukaitse ПР-2 ja selle lõige. Neid kaitsmeid kasutatakse pingetel kuni 500 V ja nimivooludel kuni 1000 A. Isoleermaterjalist plaadile *1* on kinnitatud kontaktlehed *2*, mille vahele on vinnaklüliti

noaga sarnaselt lülitatud kaitsepadrun. Viimane koosneb fiibertorust *3*, mille otstele on keeratud messingist kuplid *4*, kuhu on kinnitatud kaitsepadruni noad *5*. Nugade külge kinnitatakse kruvide abil spetsiaalse kujuga tsingist sulavpanus *6*, mis ülekoormusel sulab kitsamatest kohtadest läbi. Elektrikaare mõjul osa fiibrist muutub gaasiks, mis koosneb vesinikust, süsihappegaasist ja veeaurust. Torus tekib rõhk kuni 10 MN/m² (ca 100 at) ja kaar kustub kiiresti. Kaitsepadrunitel kuni 60-ampristele vooludele noad *5* puuduvad ja kontaktlehtede vahele surutakse nende kuplid (otsikud) *4*.



Joon. 14-17. ПР-2-tüüpi torukaitse.



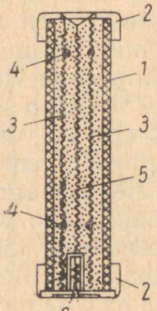
Joon. 14-18. ПН-2-tüüpi kaitse.

Pingetel kuni 500 V kasutatakse ПН-2-tüüpi kaitsmeid, mille lahtivõetavad kaitsepadrunid on täidetud kvartsliivaga ning on mõeldud vooludele 100 ... 600 A, ja НПН-tüüpi kaitsmeid lahtivõtmatute padrunitega vooludele 15 ja 60 A. Esimest tüüpi kaitse on näidatud joonisel 14-18. Kaitsme noad *3* on surutud isoleermaterjalist plaadile *1* kinnitatud kontaktlehtede *2* vahele. Noad *3* on viidud läbi kvartsliivaga *6* täidetud protselantoru *5* külge kruvitavate kaante *4*. Nugade sisemiste otste külge kinnitatakse sulavpanused *7*, mis on stantsitud õhukestest vasklintidest. Sulavpanuste keskele on nende peale sulatatud tinast «sillakesed» *9*. Ülekoormusel sulavpanus kuumeneb, tina hakkab sulama ja lahustab järk-järgult vaske ja sulavpanus

«põleb läbi». Lühise korral sulavad sulavpanused läbi kitsamates kohtades, kuhu on perforeeritud augud *8*.

Seadmetele pingetega 1000 V ... 35 kV ja vooludega kuni 400 A valmistatakse spetsiaalseid kvartsliivaga täidetud ПК-tüüpi torukaitsmeid. Joonisel 14-19 ongi kujutatud selline kaitse. Kvartsliivaga täidetud portselantoru *1* on otstest hermeetiliselt kinni joodetud kuplitega *2*, mis on ka ühendusklemmideks kaitseseadmes. Spiraalikujulised sulavpanused *3* valmistatakse hõbetatud vasktraadist, millele on sulamise kiirendamiseks sulatatud tinast kuulikesed *4*. Keskmine spiraal *5* valmistatakse terastraadist ja teda nimetatakse indikaatorspiraaliks. Ta hoiab indikaatorankrut *6* normaalasendis. Vedru surub ankru kõigi sulavpanuste läbipõlemisel alumises kuplis *2* olevast silindrilisest õõnest välja, näidates seega, et sulavpanused on läbi põlenud.

Sulavpanuseid valmistatakse pliist, plii ja tina sulamist, tsingist, alumiiniumist, vasest ja hõbedast. Plii ja ta sulamid ning tsink sulavad madalatel temperatuuridel (200 ... 400 °C), mis on nende heaks omaduseks. Neil on aga väike juhtivus, mille tõttu sulavpanused tuleb valmistada suure ristlõikega. Vasest ja hõbedast sulavpanused on hea juhtivusega ja neil võib olla väike ristlõige. Nad sulavad vastavalt temperatuuridel 1080 ja 960 °C. Hõbedast sulavpanused on kallid ja neid kasutatakse vaid väikeste voolude korral pingetel üle 1000 voldi. Sagedamini kasutatakse vasest sulavpanuseid, mis on oksüdeerumise vältimiseks hõbetatud. Vasest sulavpanused võivad sulamata kuumeneda 900 °C-ni, kusjuures nad kuumutavad kogu konstruktsiooni, sealjuures ka kontakte ning soodustavad

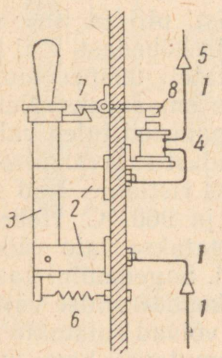


Joon. 14-19. ПК-tüüpi kaitse.

seega nende riknemist. Sellest tingituna kasutatakse metallist lahusteid. Neiks on sulavpanusele joodetud plii- või tinakuulikesed.

14-12. Automaatsed õhklülitid (automaadid)

Automaadid täidavad nii vinnaklüliti kui ka kaitsme ülesandeid. Lühise korral lülituvad nad välja ja kaitsevad sellega võrku ülekoormuse eest. Neid kasutatakse ka vooluringi katkestamiseks pinge kadumisel või vähenemisel mingi kindla väärtuseni. Vahelduvvooluautomaate kasutatakse pingetel kuni 500 V (kaasa arvatud), alalisvooluautomaate aga ka kõrgematel pingetel. Automaate kasutatakse siis, kui väljalülitamisi esineb harva; nende sisselülitamine toimub käsitsi.



Joon. 14-20. Automaatne õhklüliti.

Joonisel 14-20 on lihtsustatult näidatud ühepooluselise maksimaalvooluautomaadi töötamispõhimõte. Vool *1* kulgeb juhtmest *1* alumistesse kontaktlehtedesse *2*, sealt läbi noa *3* ja ülemiste kontaktlehtede *2* elektromagneti mähisesse *4* ning edasi juhtmesse *5*. Vedru *6* püüab nuga vasakule pöörata ja vooluringi katkestada. Link *7* takistab seda seni, kuni vool saavutab rakendumisvoolu väärtuse. Nii nimetatakse minimaalset voolu, mille kulgemisel pooli mähises *4* tõmmatakse ankur *8* vastu elektromagneti südamikku. Sama voolu juures vabastab link *7* noa *3* ja vedru *6* katkestab ühenduse kontaktlehtede *2* paaride vahel.

Antud juhul nimetatakse vahetult automaadi lingile mõjuvat elektromagnetit *4* maksimaalvooluva-

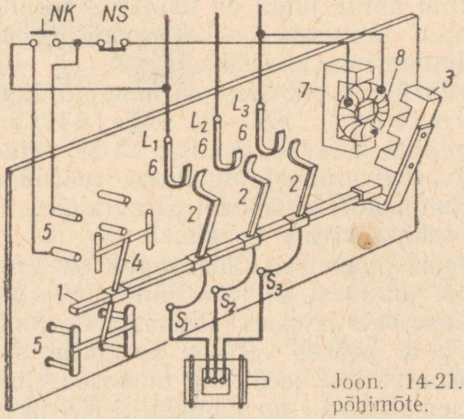
bastiks. Ta on lihtsaimaks otsese toimega elektromagnetiliseks maksimaalvoolureleeks. Aeg t_v, mille vältel automaat teostab väljalülitamise, on 0,05 ... 0,025 s. Kui automaat on mõeldud väljalülitamiseks pinge vähenemisel, siis ta rakendub pingel $U = 0{,}4U_n$.

Automaat peab lühise korral ka siis välja lülituma, kui tema käepidet hoitakse sisselülitamisasendis. Selleks puhuks on nugade sisselülitamise mehhanismil spetsiaalne konstruktsioon, mis on vajalik ka inimese kaitsmiseks automaadi käepideme löögi eest ootamatul väljalülitumisel.

Automaatide kontaktide süsteem koosneb tavaliselt töökontaktidest ja kaarekustutuskontaktidest (joon. 14-8). Viimastel on vahetatavad süsi-, messing- või metallkeraamilised otsikud. Elektrikaare kustutamise kiirendamiseks varustatakse automaadid kaarekustutusvõredega (joon. 14-9), mis koosnevad metallplaatidest või elektrikaarele vastupidavast isoleermaterjalist plaatidest.

14-13. Kontaktorid

Nagu varem nimetatud, pole automaatsed õhklülitid mõeldud sagedasteks sisse- ja väljalülitamisteks. Selleks kasutatakse aparaate, mida nimetatakse kontaktoriteks ja mis lubavad vooluringi tunnis kuni 1500 korda sisse lülitada. Neid kasutatakse alalis- ja vahelduvvooluringides pingega kuni 1000 V. Kontaktorid ei kaitse lühiste



Joon. 14-21. Kontaktori töötamispõhimõte.

ja ülekoormuste eest ja peavad seetõttu töötama kas koos sulavkaitsmetega või teiste kaitseseadistega. Nad on töökindlad pingetel (0,95 ... 1,03) U_n ja lülitavad seadme automaatselt välja pinge vähenemisel kuni (0,5 ... 0,6) U_n.

Joonisel 14-21 on toodud kolmepooluselise vahelduvvoolukontaktori töötamise skeem. Neid kontaktoreid valmistatakse 1 ... 5 poolusega vooludele 20 ... 600 A. Kontaktori suurusest sõltuvalt on nende rakendumisaeg 0,05 ... 0,1 s piirides.

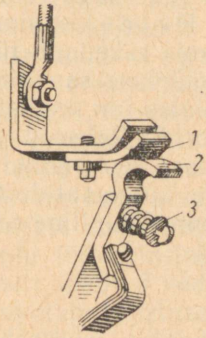
Ruudukujulise ristlõikega isoleeritud teljele, mille laagreid pole lihtsuse mõttes näidatud, on paigutatud liikuvad töökontaktid *2*, elektromagneti ankur *3* ja ristvarras *4* (traavers) niinimetatud blokeerkontaktide (blokk-kontaktide) tarvis. Isoleermaterjalist plaadile on kinnitatud liikumatud töökontaktid *6*, blokeerkontaktid *5* ja ike *7* koos elektromagneti ergutusmähisega *8*.

Joonisel 14-21 kujutatud asendis on töökontaktid lahutatud ja peavooluringis L_1, L_2, L_3 voolu pole. Kui poolis *8* tekib vool, siis tõmmatakse ankur *3* vastu iket *7*, võll *1* pöördub, töökontaktid *2* ja *6* ning ülemised blokk-kontaktid *5* suletakse, alumised blokeerkontaktid aga lahutatakse teineteisest. Sellepärast nimetataksegi töökontakte ja ülemisi blokeerkontakte sulgkontaktideks, alumisi blokeerkontakte aga lahkkontaktideks. Skeemidel näidatakse kontaktid alati asendis, mis vastab voolu puudumisele kontaktorite või releede mähistes, s. t. sulgkontakte kujutatakse lahutatutena, lahkkontakte aga suletutena. Tavaliselt kasutatakse kontaktorite juhtimiseks releesid (vt. allpool), kuid antud juhul on näidatud surunupplülititega lihtsustatud lülitusskeem lühisrootoriga asünkroonmootori *9* käivitamiseks ja seiskamiseks.

Juhtimisahelas on kujutatud kaks surunupplülitit: *NK* — sisselülitamiseks; *NS* — väljalülitamiseks. Lülitite kontakte hoiavad joonisel 14-21 näidatud asendis, s. o. vastavalt avatuna ja suletuna, vedrud. Sõltumata kontaktori ja mootori asukohast paigutatakse surunupplülitid juhtimiseks sobivale kohale.

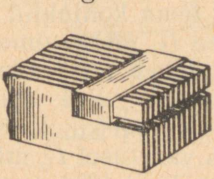
Käivitamine toimub järgmiselt. Surunupplüliti *NK* sulgemisel kulgeb vool juhtmest L_1 läbi lülitite *NK* ja *NS* elektromagneti mähisesse *8* ja sealt juhtmesse L_3. Ankrule mõjub tõmbejõud ja ta pöörab võlli *1*. Seejuures sulguvad üheaegselt töökontaktid *2* ja *6* ning ülemised blokeerkontaktid *5*. Viimased sildavad surunupplüliti *NK* ja luba-

vad nupu vabastada. Mootori väljalülitamiseks piisab juhtimisahela katkestamisest nupule *NS* vajutamisega ja liikuvad kontaktid eemalduvad teistest seadme enda raskuse mõjul.



Joon. 14-22. Kontaktori töökontaktide ehitus.

Kontaktori töökontaktid töötavad väga rasketes tingimustes ja töökindluse tagamiseks on nad allpool kirjeldatud konstruktsiooniga. Joonisel 14-22 on näidatud vahetatavatena valmistatavate töökontaktide *1* ja *2* ligikaudne kuju. Liikuva kontakti *2* kinnitamine toimub vedru *3* abil nii, et kontaktide kokkupuutumine toimub hõõrdumise ja teineteisel rullumisega. Tänu sellele kõrvaldatakse nende pinnale tekkivad metalli oksiidid. Töökontaktid varustatakse tingimata kaarekustutusvõredega.

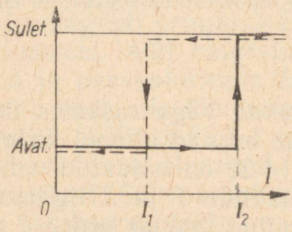


Joon. 14-23. Moodus kontaktori ankru vibreerimise kõrvaldamiseks.

Vahelduvvoolukontaktorites läbib ergutusmähise magnetvoog perioodiliselt nullväärtust, mis põhjustab konstruktsiooni vibratsiooni ja urinat. Selle kõrvaldamiseks paigutatakse pooli südamiku otsale lühiskeerd, nagu on näidatud joonisel 14-23. Selles keerus tekib nagu trafo sekundaarmähiseski vool, mis on poolis kulgeva voolu suhtes faasilt nihutatud. Keeru tekitatud magnetvoog sulgub läbi ankru ja takistab selle eemaldumist hetkel, kui peamagnetvoo väärtus on null.

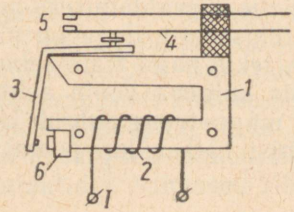
14-14. Releed

Eelmises lõigus oli juba juttu sellest, et kontaktori juhtimisskeemis võib kasutada releed ja et sel juhul kaob vajadus käsitsi juhtimise järele. Peale selle saab võimalikuks tööahela automaatne kaitsmine. Releeks nimetatakse sellist juhtimisskeemi elementi, mis rakendub tüüritava suuruse (näiteks voolu) teatud väärtuse saavutamisel silmapilkselt (hüppeliselt). Tööahelates on sellisteks aparaatideks automaadid ja kontaktorid. Releesid aga kasutatakse peamiselt juhtimisskeemides, kus voolud on väikesed, sest releesid võib valmistada automaatidest ja kontrolleritest palju kordi tundlikumatena. Tüüpiline releekarakteristik on näidatud joonisel 14-24.



Joon. 14-24. Relee-tüüpi seadme karakteristik.

Oletagem, et relee rakendumishetk sõltub tema mähist läbiva voolu väärtusest. Seni kui vool on väiksem väärtusest I_2, on relee ühes asendis (näiteks tema kontaktid on lahutatud). Kui vool saavutab väärtuse I_2, mida nimetatakse rakendumisvooluks, siis läheb relee silmapilkselt teise asendisse (kontaktid suletud). See asend säilib mistahes voolu väärtusel, mis on suurem kui I_2. Kui vool hakkab vähenema, siis mingil tema väärtusel I_1, mida nimetatakse tagastumisvooluks, kontaktid eemal-

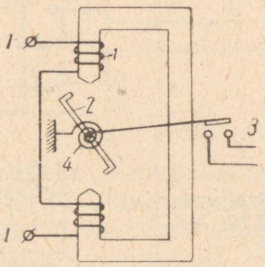


Joon. 14-25. Elektromagnetiline vahelduvvoolurelee.

duvad teineteisest hüppeliselt. Relee rakendumiseks vajalik võimsus on palju kordi väiksem selle vooluringi võimsusest, mida relee tüürib.

Releed on mõeldud seadmete kaitseks ja juhtimiseks, nad töötavad kas vahelduv- või alalisvoolul ning rakenduvad silmapilkselt või viivitusega. Viimasel juhul nimetatakse neid aegreleedeks. Ehituse järgi jagatakse releed elektromagnetilisteks, induktsioon-, elektrodünaamilisteks, termo-, elektron- või ioon- ning mehhaanilisteks jne. releedeks.

Elektromagnetiline vahelduvvoolurelee on kujutatud joonisel 14-25. Elektrotehnilisest lehtterasest südamikule *1* on paigutatud mähis *2*, mis saab voolu töövooluringist. Joonisel 14-25 näidatud asendis püsib ankur *3* vedru *4* jõu ja omakaalu mõjul. Kui vool *I* saavutab väärtuse I_2 (joon. 14-24), tõmbub ankur vastu südamikku, sulgedes juhtimisvooluringi kontaktid *5*. Sellises asendis on ta seni, kuni vool *I* väheneb suuruseni I_1; siis ankur eemaldub südamikust ja kontaktid lahutuvad. Soonega kahestatud elektromagneti südamiku otsale on relee vibreerimise kõrvaldamiseks (§ 14-23) paigutatud lühisrõngas *6*.



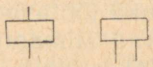
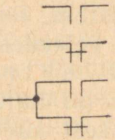
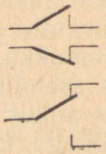
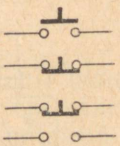
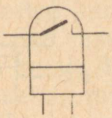
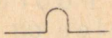
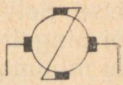
Joon. 14-26. Pöörduva ankruga elektromagnetiline relee.

Pöörduva ankruga elektromagnetiline relee on kujutatud joonisel 14-26. Kui elektromagneti mähiseid *1* läbib rakendumisvool *I*, siis Z-kujuline terasankur *2* pöördub ja suleb juhtimisvooluringi kontaktid *3*. Tagastumisvoolu korral viib vedru *4* ankru tagasi algasendisse. Selline relee, mis lülitatakse vooluringi läbi vooluvõi pingetrafo, rakendub maksimaalse voolu, maksimaalse või minimaalse pinge vms. korral.

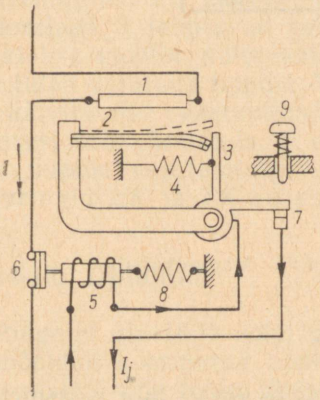
Joonisel 14-27 on toodud kaitseks ülekoormuse eest

Tabel 14-2

ГОСТ 7624-62-le vastavad kommuteerivate seadmete elementide tingmärgid

1.	Relee, kontaktori ja magnetkäiviti mähised (ГОСТ 7624-62, 8.4)	
2.	Kontaktori ja käiviti kontaktid ning blokeerkontaktid (ГОСТ 7624-62, 8.4) a) sulgkontaktid b) lahkkontaktid c) ümberlülitatavad kontaktid	
3.	Relee kontaktid (ГОСТ 7624-62, 8.3) a) sulgkontaktid b) lahkkontaktid c) ümberlülitatavad kontaktid	
4.	Isetagastuvad surunupplülitid (ГОСТ 7624-62, 8.56, 8.57, 8.58) a) sulgev b) lahutav c) ümberlülitav	
5.	Tähistatud kontaktide ja mähise väljaviikudega relee (ГОСТ 7624-62, 8.72, 3)	
6.	Termorelee kütteelement (ГОСТ 7624-62, 2.47)	
7.	Elektrimasinvõimendi (ГОСТ 7624-62, 4.40)	

laialdaselt kasutatava termorelee lülitusskeem. Selle töö põhineb kahe teineteisega kogu pikkuses keevitatud erinevate joonpaisumisteguritega metallplaatide (bimetall) kasutamisel. Kuumenemisel selline liitplaadike kooldub ja võib avaldada vooluringi sulgevale või katkestavale seadisele mehhaanilist toimet. Kaitstava võrgu vool *I* kulgeb läbi kütteelemendi *1*, mis kuumutab ühest otsast jäigalt kinnitatud bimetallplaati *2*. Kuumenedes see kooldub ülespoole, nagu on näidatud kriipsjoonega, vabastab kangi *3*, mis vedru *4* mõjul vasakule pöördudes lahutab juhtimisvooluringi kontakti *7*. Vool elektromagneti *5* mähises kaob ja vedru *8* lahutab juhitava vooluringi kontaktid *6*.



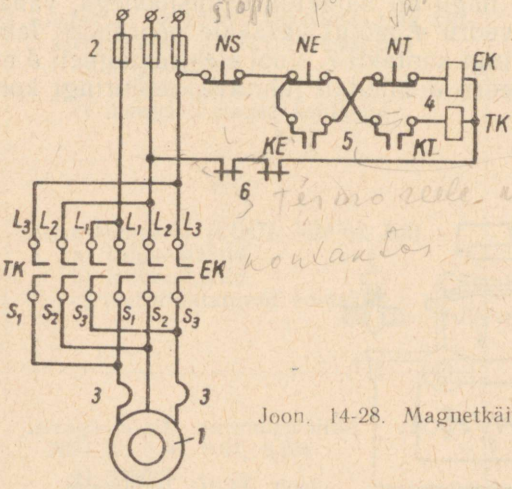
Joon. 14-27. Termorelee.

Selleks et mugavamalt kujutada kõiki järgmisi elektrimootorite juhtimisskeeme, tähistatakse nende üksikuid elemente vastavalt standardile ГОСТ 7624-62, nagu on näidatud tabelis 14-2.

14-15. Magnetkäivitid

Magnetkäivititeks nimetatakse seadmeid, mida kasutatakse täiele võrgupingele lülitatavate lühisrootoriga asünkroonmootorite käivitamiseks. Nad kaitsevad mootoreid ülekoormuse ja pinge vähenemise korral. Kaitseks lühise eest kasutatakse sulavkaitsmeid. Magnetkäiviti koosneb kolmepooluselisest kontaktorist, termo-

releedest ja blokeerkontaktidest, mis on paigutatud ühte kasti. Juhtimiseks kasutatavad surunupplülitid paigutatakse eraldi, tavaliselt töömasina juurde. Juhul, kui on vaja muuta mootori pöörlemissuunda, peab magnetkäivitis olema kaks kontaktorit käikudeks *«edasi»* ja *«tagasi»*. Selline käiviti on kujutatud joonisel 14-28 toodud skeemil, kus on kasutatud tema elementide standardseid tähiseid.



Joon. 14-28. Magnetkäiviti.

Mootori *1* staator ühendatakse võrku läbi kaitsmete *2*, sulguvate päri- ja vastassuunas käivitavate kontaktorite *EK* ja *TK* töökontaktide ning läbi termoreleede kütteelementide *3*. Juhtimisvooluring koosneb surunupplülitist *«stopp»* (*NS*), surunupplülititest päri- ja vastassuunas käivitamiseks (*NE* ja *NT*), päri- ja vastassuunas käivitamiseks mõeldud kontaktorite elektromagnetite mähistest *4* ja avanevatest termorelee kontaktidest *6*, mis on kujutatud suletutena (vt. joon. 14-28). Surunupplüliteid *NE* ja *NT* blokeerivad vastavalt kontaktorite *EK* ja *TK* sulgkontaktid *5* (blokeerkontaktid).

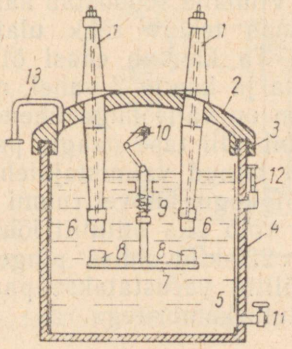
Et mootori pöörlemissuuna muutmiseks vahetatakse ümber faasijuhtmete L_1 ja L_3 otsad, siis tuleb blokeerimisega välistada mõlema kontaktori üheaegne sisselülitamine, sest see oleks faaside lühistamine. Blokeerimine saavutatakse surunupplülitite *NE* ja *NT* lülitamisel tänu

lülitite vastavale ehitusele. Mõlemal neist on üks paar lahkkontakte (ülemised) ja üks paar sulgkontakte (alumised).

Käivitamine pärisuunas (*«edasi»*) toimub järgmiselt. Surunupplülitile *NE* vajutamisel lahutatakse tema ülemised kontaktid ja suletakse alumised. Vooluring, mis kulgeb läbi elektromagneti *TK*, osutub katkestatuks. Vool kulgeb faasijuhtmest L_3 läbi lüliti *NS* ja lüliti *NE* suletud alumiste kontaktide, edasi läbi lüliti *NT* suletud ülemiste kontaktide kontaktori *EK* elektromagneti mähisesse *4* ning sealt läbi termorelee *6* suletud kontaktide faasijuhtmesse L_2. Töökontaktid *EK* ja blokeerkontaktid *5 EK* sulguvad ja nupu *NE* võib vabaks lasta. Pinge langemisel, kui vool elektromagneti *EK* mähises väheneb, ja ülekoormusel, kui termoreleed *3* lahutavad juhtimisvooluringi kontaktid *6*, lülitatakse mootor automaatselt välja. Mootori seiskamiseks tuleb vajutada nupule *NS*. Sarnaselt toimub ka mootori käivitamine vastupidises suunas (*«tagasi»*). Nagu joonisest võib järeldada, ei saa mootorit üheaegselt mõlemale nupule vajutamisega sisse lülitada, sest juhtimisvooluringid *EK* ja *TK* on siis katkestatud.

14-16. Õlilülitid

Pingetel üle 1000 voldi peavad lülitamisseadmed, mis on mõeldud koormatud vooluringide sulgemiseks ja katkestamiseks ning tööks lühise olukorras, olema plahvatuskindlad ja tuleohutud, peale selle veel lihtsad ja ekspluatatsioonis mugavad. Üheks sellistest seadmetest on õ l i -



Joon. 14-29. Õlilüliti.

lüliti. Joonisel 14-29 on kujutatud suure õlihulgaga kolmefaasilise õlilüliti lõige. Selles toimub töökontaktide lahutamine ja sulgemine õlis, mis isoleerib kindlalt voolujuhtivad osad üksteisest ja lüliti kerest. Peale selle on õlil omadus kiiresti kustutada kontaktide lahutamisel tekkinud elektrikaart sel hetkel, kui vahelduvvoolu hetkväärtus on null.

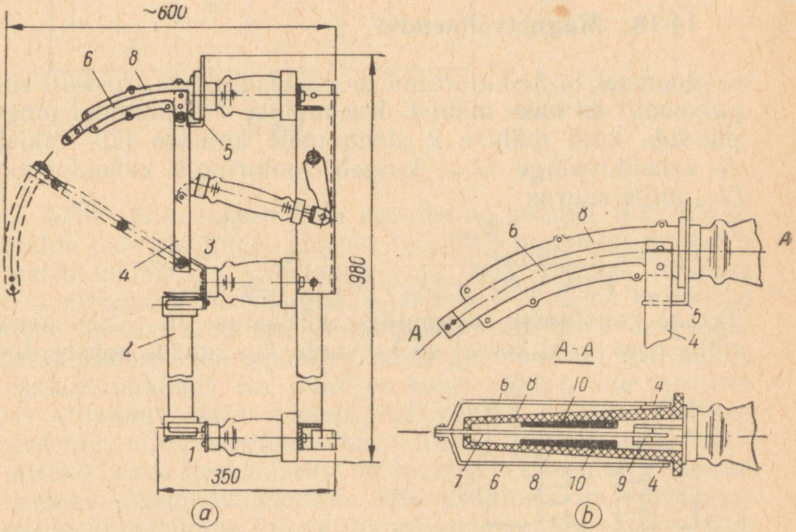
Vool juhitakse lülitisse malmkaanele *2* kinnitatud läbiviikisolaatorites *1* olevate voolujuhtide kaudu. Tihenditega *3* varustatud kaas suleb õliga *5* täidetud teraspaagi *4* ja on viimase külge kinnitatud poltidega. Paagi sisepind isoleeritakse kas vineeri või elektriisoleerkartongiga. Kui pinge on väiksem kui 10 kV, paigutatakse kõik kolm faasi ühte paaki ja kõrvutiasetsevate faaside kontaktid eraldatakse teineteisest isoleermaterjalist vaheseintega. See väldib elektrikaare tekkimise kõrvutiasuvate faaside kontaktide vahel ja selle siirdumise paagi kerele. Läbiviikisolaatorite alumisse ossa on kinnitatud liikumatud kontaktid *6*; nende vastas asuvad aga juhtivast materjalist ristvardal *7* (traaversil) liikuvad kontaktid *8*, mis sisselülitamise korral ühendavad kontaktid *6* nagu vinnaklüliti noad. Vedru *9* surub ristvarda alla (lülitab välja), võlli *10* pööramisel kellaosuti suunas aga surutakse ristvarras üles (lülitatakse sisse) ja hoitakse vastava lingi abil selles asendis. Sisse- ja väljalülitamine toimub kas käsiratta (käsiajami) abil või automaatse ajami, juhtimisseadme ja juhtimisvooluringis oleva relee abil.

Paak varustatakse õli väljalaskmise kraaniga *11* ja nivoomõõturiga *12*. Et igas faasis tekib kaks katkestust, tekib kontaktide *6* ja *8* lahutamisel kaks elektrikaart. Nende ümber tekib aurustunud õlist kaks gaasimulli, mis sisaldavad 70 ... 80% vesinikku. Viimane soodustab kaare kiiret kustumist. Kaare piirkonnas tekkiv rõhk ulatub 0,5 ... 1 MN/m^2-ni (5 ... 10 at). Ta kandub edasi õlile, paagi kerele ning õhule õli pinna ja kaane *2* vahel, mis etendab puhvri osa. See ruum on välisõhuga ühendatud gaaside väljalasketoru *13* abil. Õli tase paagis peab alati ulatuma märkeni, mille on teinud valmistajatehas. Vastasel juhul täidab «keev» õli kogu puhver-ruumi ja rõhk paagis kasvab kiiresti, mis võib viia õlilüliti lõhkemiseni ja õli süttimiseni. 35 ... 220-kilovoldise pingega seadmete mitmemahutilised õlilülitid varustatakse paaki asetatud spetsiaalsete kaarekustutuskambritega.

Peale tutvustatud õlilülitite on laialdast kasutamist leidnud väikesemahulised õlilülitid. Neis kasutatakse õli vaid kaare kustutamiseks, voolu juhtivate osade isoleerimine toimub aga keraamiliste ja orgaaniliste isoleermaterjalide ning õhu abil. Neid lüliteid loetakse plahvatuskindlateks, sest neis oleva õli kogus on väga väike. Iga vooluringi katkestuskoht paigutatakse eraldi paaki. Seega on kolmefaasilisel lülitil, mille igas faasis on üks katkestuskoht, kolm paaki, on aga kaks katkestuskohta, siis kuus paaki.

14-17. Koormuslülitid

K o o r m u s l ü l i t i d on kasutamist leidnud linna-, põllumajanduslike ja muude alajaamade väikesevõimsuselistes seadmetes, kus võib piirduda kaarekustutusseadmega, mis on arvestatud vaid koormuse väljalülitamisel tekkiva elektrikaare kustutamiseks. Kaitseks lühise eest on koormuslülititega jadamisi lülitatud sulavkaitsmed (näiteks kvartstäidiskaitsmed). Koormuslülitid võimaldavad katkestada voole kuni 400 amprini pingetel 6 või 10 kV.



Joon. 14-30. Koormuslüliti.

Joonisel 14-30, *a* on näidatud selle lüliti külgvaade, joonisel 14-30, *b* aga orgaanilisest klaasist vahelehtedega kaarekustutuskambri ehitus. Koormuslüliti on sarnane erikonstruktsiooniga vinnaklülitile. Joonisel 14-30 on ta kujutatud sisselülitatuna.

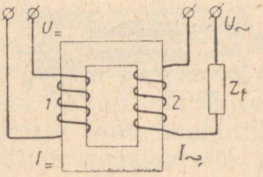
Vool kulgeb alumise tugiisolaatori kontaktilt *1* läbi sulavkaitsme *2* lüliti noa *4* liikuvale kontaktile *3*. Nuga koosneb kahest vaskribast, mis lüliti sulgemisel haaravad kahelt poolt ülemisi liikumatuid töökontakte *5*. Väljalülitamisele vastavas asendis nuga *4* on kujutatud kriipsjoonega. Noa vaskribade ülemiste otsade külge on kinnitatud terasribad *6*, mille vahele on surutud kaarekustutusnuga *7*. Sisselülitamise asendis on see surutud kahe liikumatu kaarekustutuskontakti *9* vahele, mis on suletud plastmasskambrisse *8*. Väljalülitamisel lahutuvad teineteisest esmalt liikumatu töökontakt *5* ja nuga *4*, seejärel eemaldub liikumatutest kaarekustutuskontaktidest *9* kambrist väljuv kaarekustutusnuga *7*. Kambris tekkiv elektrikaar lagundab osa orgaanilisest klaasist, millest on valmistatud vahelehed *10*. Rõhu all olev gaas kustutab kaarleegi enne, kui nuga *7* väljub kambrist. Lüliti juures võib kasutada nii käsitsi- kui ka kaugjuhtimist.

14-18. Magnetvõimendid

Joonisel 14-31 kujutatud terassüdamikuga drosselil ehk paispoolil on kaks mähist. Kui mähise *1* klemmidel pinge puudub, kuid mähise *2* klemmidele antakse läbi takisti z_t vahelduvpinge $U_\sim$, kulgeb vooluringis vahelduvvool $I_\sim$, mille suurus

$$I_\sim = \frac{U_\sim}{\sqrt{(r_2 + r_t)^2 + (x_2 + x_t)^2}} \approx \frac{U_\sim}{x_2 + x_t}.$$

Terase konstantse magnetilise küllastuse ja $U_\sim = \text{const}$ ning $x_t = \text{const}$ korral on ka voolu $I_\sim$ suurus konstantne.

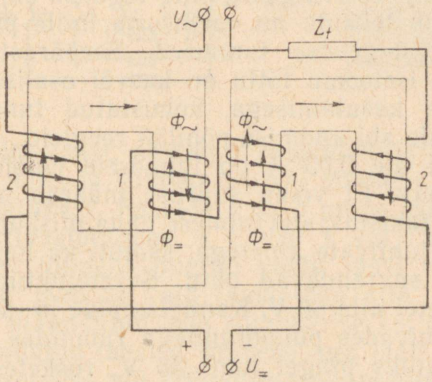


Joon. 14-31. Magnetvõimendina töötav drossel.

Kui mähisele *1* rakendada alalispinge $U_{=}$, siis selles kulgev alalisvool magneedib südamikku täiendavalt ja terase magnetiline küllastus kasvab. Sel juhul mähise *2* induktiivsus L_2 ja tema takistus x_2 vähenevad, vool $I_{\sim}$ aga kasvab. Selles lülitusskeemis võib mähise *1* sisendvõimsuse P_s väikese muutuse abil tekitada suure väljundvõimsuse P_v muutuse mähise *2* vooluringis. Selles mõttes on siin tegemist võimendamisega. Võimsusvõimendustegur

$$k_p = \frac{P_v}{P_s}.$$

Seega kujutab joonisel 14-31 toodud lülitusskeem lihtsaimat m a g n e t v õ i m e n d i t.



Joon. 14-32. Magnetvõimendi.

Sellel lülitusskeemil on aga tõsine puudus, mis ei võimalda teda kasutada. Terases tekitatav magnetvoog indutseerib mähises *1* vahelduva emj., mis, liitudes pingega $U_{=}$, moonutab sisendsignaali. Joonisel 14-32 on kujutatud teine lülitusskeem, kus eelmagneetimismähis *1* on paigutatud kahele südamikule, mille magnetvood on igal hetkel vastassuunalised. Sel juhul on kahe mähisepoole resulteeriv vahelduv elektromotoorjõud võrdne nulliga. Lülitusskeemid, mida tegelikult kasutatakse mõõtmisteks, juhtimiseks ja reguleerimiseks, on tavaliselt kirjeldatust keerulisemad. Magnetvõimendite sisendvõimsus on murdosast vatist kuni kümne kilovatini, võimendustegur aga ulatub keerukates skeemides 5 000-ni. Need võimendid on pika

tööeaga ja töökindlad, sest neil pole liikuvaid osi. Magnetvõimendite puuduseks on suur inerts sisendsignaali edasiandmisel.

14-19. Elektriseadmete kaitsemaandus

Elektriseadmetega töötamisel on vaja vastavaid teadmisi ja suurt tähelepanelikkust. Igasugune hooletus ja ohutustehnika reeglite täitmata jätmine võib põhjustada tõsiseid tagajärgi. Juhuslikul voolu juhtivate osade külge puutumisel läbib inimkeha vool, mis tekitab keha kudedes füüsikalisi ja keemilisi muutusi ning tõsiseid, kaua paranevaid põletushaavu.

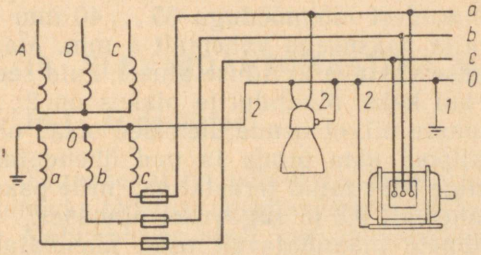
Eriti ohtlik on *elektrilöök*. Inimene kaotab teadvuse ja hingamis- ning vereringeorganite tegevus on häiritud või lakkab. Võib tekkida nn. varjusurm, mille puhul inimesel puuduvad elutegevuse tunnused. Seepärast on igaüks, kes oma töö iseloomu tõttu on kasvõi osaliseltki seotud elektrienergia kasutamisega, kohustatud tundma voolu läbi kannatanule abi andmise põhilisi reegleid.

Loetakse, et vool üle 0,05 A on inimesele eluohtlik, üle 0,1 A aga surmav. Et voolu suuruse määrab mitte ainult pinge, vaid ka takistus, siis inimese naha niiskumine ja saastumine voolu juhtivate ainetega, samuti ka halvad ja niisked jalanõud suurendavad ohtu. Surmajuhtumeid on esinenud ka pingetel alla 60 V. Kandelampide ja -seadmetega töötamisel kuivades puupõrandaga ruumides loetakse suhteliselt ohutuks pinget kuni 36 V, rõsketes ja palavates ruumides või siis metall-taladel, kateldel, paakidel jne. töötamisel loetakse ohutuks pinget kuni 12 V. Neil juhtudel maandatakse pinget madaldava trafo sekundaarmähis tingimata.

Kui ohutustehnika nõuded pole täidetud, osutub eriti ohtlikuks sisemine isolatsiooni läbilöök kas elektrimasina või -aparaadi kere ja mähise või mähiste vahel. Sel juhul kujutavad kõik normaalolukorras pingestamata osad endast ohtu teenindavale personalile. Selleks et kaitsta inimest ohu eest, kasutatakse *kaitsemaandust*.

Elektrivõrgud, mis on mõeldud valgusallikate ja elektrimootorite toitmiseks, ehitatakse tavaliselt neljajuhtmelistena pingele 380/220 V või 220/127 V. Neljas juhe maandatakse vahetult ja et tema potentsiaal on sel juhul võrdne nulliga, nimetatakse teda *nulljuhtmeks*. Vahetuks

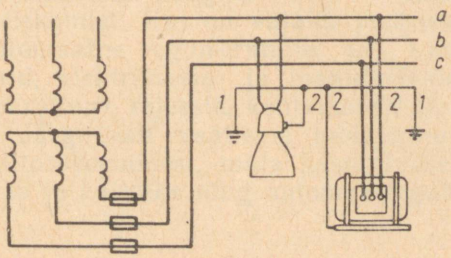
nimetatakse maandusühendust sellepärast, et ta valmistatakse metallist ja väga väikese üleminekutakistusega. Nulljuhtmega ühendatakse elektrimasinate, trafode, valgustite ja elektriaparaatide ajamite kered, mõõtetrafode sekundaarmähised, kilpide metallsõrestikud jms. Nulljuhe ise maandatakse nii toiteallika kui ka tarbija juures. Niisugune ühendus on kujutatud joonisel 14-33.



Joon. 14-33. Trafo vahetult maandatud nullpunktiga neljajuhtmeline süsteem.

Ühe faasi, näiteks *c* maandamisel, tekib siin ühefaasiline lühis ja sulavkaitse või automaat lahutab liinijuhtme toiteallikast. Faaside *a* ja *b* pinge maa suhtes jääb võrdseks faasipingega, s. o. 220 V või 127 V. Kui maapinnal seisev inimene puutub vastu faasi *a* või *b* isoleerimata juhet, jääb ta vaid faasipinge alla. Kui trafo nullpunkt pole maandatud, siis sulavkaitse või automaat ei katkesta maandatud faasi *c*, inimene aga jääb faaside *a* või *b* puutumisel 380- või 220-voldise pinge alla.

Maandamata nullpunkti puhul ehitatakse kaitsemaandus nii, nagu on näidatud joonisel 14-34, maandusseadme takistus ei tohi ületada 4 oomi. Kui võrku toitvate generaatorite või transformaatorite võimsus pole suurem kui 100 kVA, võib seadme maandustakistus olla kuni 10 Ω.



Joon. 14-34. Trafo isoleeritud nullpunktiga kolmejuhtmeline süsteem.

Maandamine teostatakse järgmiselt. Maanduriks *1* (joon. 14-33 ja 14-34) nimetatakse metallkeha, mis on maaga vahetus kokkupuutes. Esmajärjekorras kasutatakse maanduritena hoonete metallkonstruktsioone, kindlalt maaga ühendatud seadmeid, maasse paigutatud torujuhtmeid (välja arvatud gaasi- ja põlevate vedelike juhtmed). Kui selliseid konstruktsioone käepärast pole, tuleb kasutada tehismaandureid.

Tehismaandurid valmistatakse vähemalt 3,5 mm paksuse seinaga terastorudest läbimõõduga 35...40 mm või siis nurkterasest talla paksusega vähemalt 4 mm. Maandurite arv määratakse vastava arvutuse alusel, kuid see ei tohi olla väiksem kui kaks. Maandurite pikkus on 2...3 m. Nad lüüakse maasse nii, et nende ülemised otsad oleksid 0,4...1,5 m allpool maa pinda ja nad ühendatakse omavahel nende külge keevitatud teraslatiga, mille paksus pole alla 4 mm, vähemalt 0,3 m sügavusel pinnases.

Kõik elektriseadmete maandatavad osad ühendatakse maanduriga maandusjuhtme *2* abil. Niisuguste juhtmetena kasutatakse esmajärjekorras hoonete metallkonstruktsioone, metalltorusid, pliist ja alumiiniumist jõukaablite kesti jms. Tehislikud maandusjuhtmed valmistatakse vähemalt 24 mm^2 ristlõikega ja 3 mm paksusest teraslatist või vähemalt 5 mm läbimõõduga terastraadist. Nende juhtmete ühendamine seadmetega toimub kas poltide abil või keevitamise teel. Maandusjuhtmed värvitakse lillaks.

15. ELEKTROAUTOMAATIKA ALUSED

15-1. Üldmõisted

Tänapäeval on põhiliseks tehnilist progressi tagavaks abinõuks tööstuse mehhaniseerimine ja automatiseerimine.

Mehhaniseerimisel kasvab tööviljakus ja väljastatava toodangu hulk, alaneb toodangu omahind ja paranevad selle omadused. Inimene vabaneb raskest ja väsitavast, vahel isegi ohtlikust tööst.

Automatiseerituse aste näitab aga tööstuse arengutaset. Juhtimist ja kontrolli teostavad sel juhul nn. automaatseadmed.

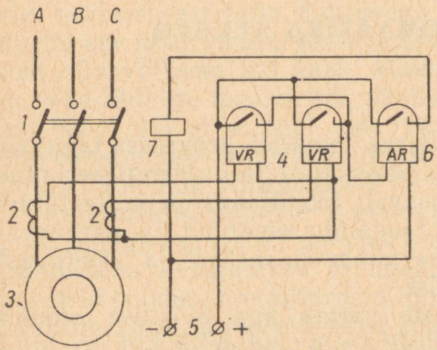
Automaatikaks nimetatakse teaduse ja tehnika haru, mis õpetab tundma vahendeid ja meetodeid inimese vabastamiseks masinate ja mehhanismide vahetust juhtimisest.

Automaatseadmete hulka võivad kuuluda mehhaanilised, elektrilised, raadiotehnilised, hüdraulilised, pneumaatilised, soojuslikud jt. aparaadid ja mehhanismid. Selle aparatuuri omadused määravad seadme töö iseloomu. Juhul kui on tegemist relee- või kontaktoraparatuuriga, saame relee-kontaktorjuhtimise, mis võimaldab seadme automaatset kaugkäivitamist, -pidurdamist, -kaitset ja -seiskamist. Kui on vajalik protsessi pidev juhtimine ja automaatne reguleerimine, siis kasutatakse elektrimasinaid, elektrimasin- ja magnetvõimendeid, ioon-elektronaparatuuri, releesid, kontaktoreid ja arvutusseadmeid.

Järgnevalt vaatleme mõningaid lihtsustatud näiteid lülitusskeemidest, mida kasutatakse seadmete käivitamiseks ja kaitseks ning automaatreguleerimiseks.

15-2. Automaatkaitse releede abil

Tarbija või generaatori kaitse võib olla ehitatud nii, et vastav seade lülitatakse automaatselt välja, kui vool, pinge, võimsus, kiirus, temperatuur vms. saavutab teatava piirväärtuse. Varem, magnetkäiviti (joon. 14-28) vaatlemisel, tutvusime kaitsega ülekoormuse eest termorelee abil. Joonisel 15-1 toodud näites on tarbija kaitstud kahe voolurelee *VR* ja ühe aegrelee *AR* abil.



Joon. 15-1. Automaatkaitse releede abil.

Toitevõrgust *ABC* kulgeb vool läbi õlilüliti *1* kontaktide ja voolutrafo *2* asünkroonmootori staatorisse *3*. Kui mootori ühe faasi vool ületab lubatava väärtuse, kasvab vool voolutrafo sekundaarmähises ja vastavas relees *4* kuni rakendumisvooluni. Relee kontaktid sulguvad ja vool kulgeb energiaallikast *5* läbi aegrelee *6* mähise. Kui voolu kulgemise aeg ületab releele seatud viivituse, siis relee kontaktid sulguvad. Toiteallika *5* vool lahutab õlilüliti väljalülitavat pooli *7* läbides peavooluringi kontaktid *1*.

15-3. Rööpergutusega alalisvoolumootori käivitamise automatiseerimine

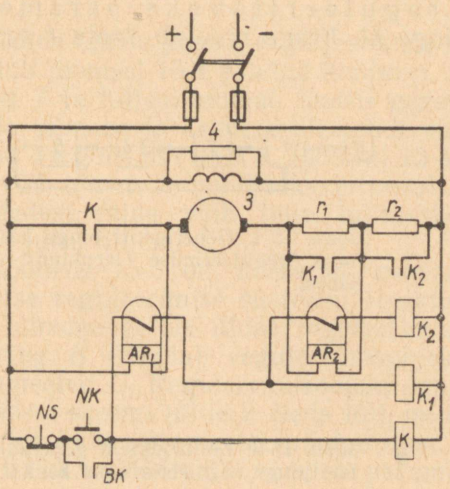
Nagu teada, lülitatakse alalisvoolumootori käivitamisel ankrumähisega jadamisi käivitustakisti, mis mootori kiiruse kasvades järk-järgult sillatakse. Joonisel 15-2 on selleks takistid r_1 ja r_2. Nende takistite sildamine peab toimuma automaatselt. Selleks on skeemi viidud kaks kiirenduskontaktorit K_1 ja K_2, mille elektromagneteid juhivad

kaks kiirendusreleed AR_1 ja AR_2, mis kujutavad endast aegreleesid. Ankruahelas on näidatud kontaktori K töökontaktid, kusjuures kontaktori mähis on lülitatud jadamisi sisse- ja väljalülitamise surunupplülititega NK ja NS. Rööbiti surunupplülitiga NK on lülitatud kontaktori K blokeerkontaktid BK.

Vinnaklüliti sulgemisel kulgeb vool läbi ergutusmähise *3* ning ka läbi relee AR_1 mähise, ankrumähise ja takistite r_1 ning r_2. Viimast haru läbiv vool on väga väike ja mootor jääb liikumatuks. Relee AR_1 rakendub selle voolu toimel ja tema kontaktid eemalduvad teineteisest. Relee AR_2 oma kontakte lahutada ei saa, sest takistilt r_1 saadav pinge on väga väikese voolu korral tühine.

Kui vajutada surunupplülitile NK, kulgeb vool plussklemmilt töökontaktori K mähisesse. Seejuures sulguvad üheaegselt töökontakt K ja blokeerkontakt BK. Seega võib surunupplüliti NK vabastada.

Läbi ankrumähise ning takistite r_1 ja r_2 kulgeb käivitusvool I_k ja ankur hakkab pöörlema. Pingelang takistil r_1 saab nii suureks, et relee AR_2 mähisesse hargnev vool sunnib releed rakenduma ja kontakte lahutama. Relee AR_1 mähis osutub kontaktori K kontaktidega sillatuks ja mingi varem kindlaks määratud aja jooksul väheneb vool mähises sedavõrd, et relee kontaktid sulguvad. Siis läbib kon-



Joon. 15-2. Alalisvoolumootori automaatkäivitus.

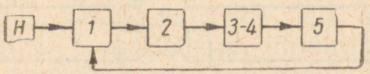
taktori K_1 mähist vool ja kontaktor rakendub, lühistades takisti r_1.

Seega on osa ankruahela takistusest välja lülitatud ja vool kasvab jälle suuruseni I_k. Kuna pingelang Ir_1 on saanud võrdseks nulliga, ei suuda relee AR_2 mähis kontakte lahutatutena hoida ja mõne aja pärast kontaktid sulguvad. Vool hakkab läbima teise kontaktori K_2 mähist. Kontaktori kontaktid K_2 sulguvad, sillates takisti r_2. Sellega käivitamine lõpeb. Mootori peatamiseks piisab surunupplülitile *NS* vajutamisest. Ergutusmähist sildavat takistit *4* nimetatakse l a h e n d u s t a k i s t i k s ja selle takistus on (4 . . . 5) r_e. Ta kaitseb mähist läbilöögi eest ergutusahela juhusliku katkestuse korral.

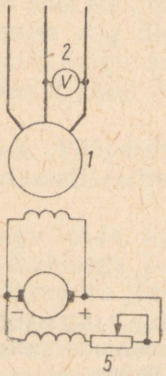
15-4. Automaatreguleerimissüsteemi põhimõtteline skeem

Automaatreguleerimissüsteemi ehitust vaatleme ühe lihtsaima näite põhjal, milleks on lülitus kolmefaasilise sünkroongeneraatori pinge konstantsena hoidmiseks koormuse muutumisel. Joonisel 15-3 on kujutatud generaator *1*, mille pinget *U* tuleb hoida konstantsena.

Masinat või aparaati, mille tööd reguleeritakse, nimetatakse r e g u l e e r i m i s o b j e k t i k s. Antud juhul on selleks generaator *1*. Füüsikalist suurust, mida reguleeritakse, nimetatakse r e g u l e e r i t a v a k s p a r a m e e t r i k s. Selleks on pinge *U*. Pinge muutub voolu *I* mõjul.



Joon. 15-4. Generaatori pinge käsitsi reguleerimise struktuuriskeem.



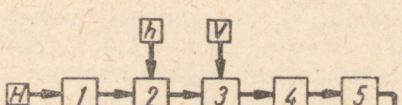
Joon. 15-3. Lülitusskeem generaatori pinge reguleerimiseks käsitsi.

Välist mõju, mille toimel reguleeritav parameeter muutub, nimetatakse häirivaks mõjuks e. häiringuks.

Kui pinget reguleerib tööline, siis ta saab informatsiooni pinge muutumise kohta signaalide andurilt, milleks on antud juhul voltmeeter *2*. Võrreldes voltmeetri näitu etteantud pinge suurusega, muudab tööline ergutusreostaadi *5* takistuse suurust ja mõjutab seega generaatorit, taastades endise pinge väärtuse.

Selleks et kindlaks määrata reguleerimissüsteemi üksikute lülide otstarvet ja seoseid nende vahel, kasutatakse tinglikke skeeme, mida nimetatakse struktuuriskeemideks.

Generaatori pinge reguleerimise süsteemi struktuuriskeem on näidatud joonisel 15-4. Häiring *H* (vool) muudab reguleerimisobjekti *1* (generaatori) reguleeritavat parameetrit *U*. Mõjutuste järjekord on näidatud nooltega. Generaator annab signaali pinge muutumise kohta läbi anduri *2* (voltmeetri) töölisele *3-4*. Tööline mõjutab reguleerimisobjekti *1*, muutes takistust *5*.



Joon. 15-5. Generaatori pinge automaatse reguleerimise struktuuriskeem.

Tuleb tähele panna, et järjestikune mõjutuste ahel moodustab joonisel 15-4 suletud kontuuri, s. t. väljub generaatorist *1* ja hiljem suubub uuesti generaatorisse *1*. Sellist ahela viimase ja esimese elemendi vahelist sidet nimetatakse tagasisideks. Joonisel 15-4 kujutatud tagasisidet võib nimetada põhiliseks, erinevalt täiendavatest tagasisidedest, mida võib luua lülitusskeemides ja millest tuleb juttu hiljem.

Joonisel 15-5 on näidatud generaatori pinge automaatse reguleerimise süsteemi struktuuriskeem sel juhul, kui inimene ei ole üldse reguleerimisprotsessiga seotud. Häiring *H* muudab reguleerimisobjekti *1* reguleeritavat parameetrit *U*. Reguleerimisobjekt annab signaali *U* muutumisest skeemi lülile *2*. Seda lüli, millele antakse signaal reguleeritava parameetri muutumisest, nimetatakse mõõtelüliks. Mõõtelüli võrdleb parameetri väärtust ette-

antud väärtusega ja väärtuste vahe järgi töötab välja signaali ning annab selle skeemi järgmistele lülidele. Mõõtelülis peab olema ette nähtud võimalus *häälestamiseks* (*h*), sest reguleeritava parameetri etteantud väärtused võivad olla mitmesugused.

Paljudel juhtudel on soovitav mõõtelüli poolt skeemi järgmistele lülidele antavat signaali muundada: näiteks muuta alalisvoolusignaaliks. Seepärast nimetatakse skeemi lüli *3*, mis muundab ühte liiki signaali teist liiki signaaliks, *muunduslüliks*.

Väga sageli on signaal, mille saab lüli *3*, nii nõrk, et sellest ei piisa järgnevate skeemi lülide tööle rakendamiseks. Sel juhul nähakse ette täiendav energia (*v*) viimine süsteemi lüli *3* kaudu. Signaali muundavat ja võimendavat lüli nimetatakse *võimenduslüliks*.

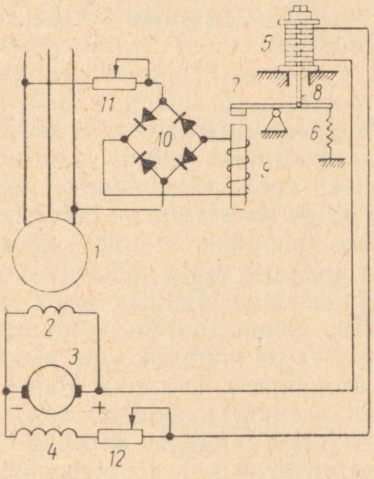
Signaal tuleb edasi anda järgmisele skeemi lülile *4*, mis hakkab täitma signaaliga antud käsku, näiteks hakkab pöörama lülitusskeemis oleva reguleerimisreostaadi käepidet. Selleks lüliks võib olla mistahes liiki mootor. Skeemi lüli, mis tegutseb signaali toimel, nimetatakse *täiturlüliks*. Viimast lüli *5*, mis mõjutab reguleerimisobjekti *1*, nimetatakse *reguleerlüliks*. Selleks on reguleerimisreostaat generaatori ergutusahelas.

Joonisel 15-5 näidatud skeem kujutab endast vaid näidet.

15-5. Lülitusskeem generaatori pinge automaatseks reguleerimiseks

Joonisel 15-6 on kujutatud sünkroongeneraator *1*, mille ergutusmähist toidetakse ergutusgeneraatorist ehk ergutist *3*. Ergutusgeneraatori ergutusmähis *4* on ühendatud ankruklemmidega jadamisi süsisammasreostaadiga *5*, mis koosneb õhukestest süsiketastest. Venitatud vedru *6* jõud pöörab kangi *7* liikumatu toetuspunkti ümber ja surub süsikettaid läbiva varda *8* abil kettad kokku, vähendades süsisamba *5* takistust. Elektromagnet *9* tõstab kangi *7* otsa ligi tõmmates varrast *8* ja, vähendades survet sambale *5*, suurendab selle takistust. Elektromagneti *9* mähist toidetakse seleenalaldist *10* generaatori *1* alaldatud vooluga. Etteantud generaatori pinge alalhoidmiseks kasutatava automaatregulaatori häälestamine toimub takistuse *11* muutmise teel.

Kui generaatori pinge kasvab koormuse vähenemise tõttu, suureneb vool elektromagneti *9* mähises, surve sambale *5* väheneb, samba takistus kasvab ja erguti *3* ergutusvool väheneb. Selle tulemusena väheneb vool generaatori ergutusmähises *2* ja generaatori pinge langeb, lähenedes esialgsele väärtusele. Generaatori pinge vähenemisel on olukord vastupidine — regulaator püüab seda tõsta.



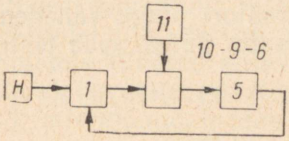
Joon. 15-6. Lülitusskeem generaatori pinge automaatseks reguleerimiseks.

Joonisele 15-6 vastav regulaatori struktuuriskeem on näidatud joonisel 15-7. Mõlemas skeemis on reguleerimisobjektiks generaator *1*, reguleeritavaks parameetriks — generaatori pinge *U*, mõõtelüliks — alaldi *10*, elektromagnet *9* ja vedru *6*, reguleerlüliks aga süsisammas *5*. Häälestamine toimub takistuse *11* muutmise teel. Erguti *3*, *4* ja reostaat *12* kuuluvad reguleerimisobjekti juurde.

Joonisel 15-6 tooduga analoogilisi süsteeme nimetatakse otsetoimelisteks süsteemideks, sest mõõtelüli *10-9-6* mõjutab vahetult (otse) reguleerlüli *5*. Neid kasutatakse siis, kui mõõtelüli signaali võimsusest piisab reguleeriva lüli tööle rakendamiseks.

Kui generaatori pinge muutub häiringu toimel, tekib erinevus generaatori pinge ja tema nimiväärtuse vahel. Seda erinevust nimetatakse süsteemi lahkkõlastuseks ehk veaks. Regulaator peab viima vea nulliks, s. t. pinge peab jääma konstantseks. Seepärast nimeta-

takse joonisel 15-6 kujutatud süsteemiga analoogiliselt toimivaid süsteeme konstantse parameetriga reguleerimissüsteemideks.



Joon. 15-7. Joonisel 15-6 toodud reguleerimissüsteemi struktuuriskeem.

Otsetoimeline automaatreguleerimissüsteem ei ole aga võimeline täpselt taastama koormuse mõjul muutunud pinge algväärtust. Kui näiteks voolu vähendamisel generaatori pinge kasvab, tuleb pinge konstantsena hoidmiseks ergutusvoolu vähendada. See tähendab, et uue väiksema koormuse korral automaat reguleerib välja väiksema ergutusvoolu, kui oli enne reguleerimist. Selleks peab süsisamba *5* (joon. 15-6) takistus olema suurem, summaarne surve sambale aga väiksem. See on võimalik vaid elektromagneti *9* mähise poolt arendatava suurema tõmbejõu korral. Elektromagneti poolt arendatav jõud on aga võrdeline tema mähisele rakendatud pingega. Järelikult on generaatori pinge reguleerimisprotsessi lõppedes pisut suurem kui enne reguleerimist.

Seega tõstab automaat koormuse suurenemisel langenud pinge väärtuseni, mis on pisut väiksem kui enne reguleerimist.

Süsteeme, mis sellel põhimõttel reguleerimist teostavad, nimetatakse staatilisteks. Neis ei säilita reguleeritav parameeter häiringust tingituna täpselt konstantset väärtust, vaid omandab väärtusi varem määratud piirides.

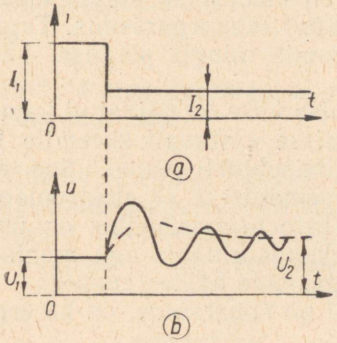
Kui näiteks voolu muutumisel I_{min}-st kuni I_{max}-ni pinge muutub piirides U_{max} kuni U_{min}, siis suhet

$$\delta = \frac{U_{max} - U_{min}}{U_n}$$

nimetatakse statismiks. Mida väiksem on statism, seda täpsemini hoiab regulaator etteantud pinget.

15-6. Tagasiside automaatreguleerimissüsteemides

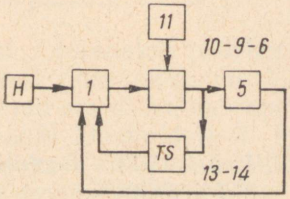
Automaatreguleerimisel esineb statismi kõrval veel teine negatiivne tegur. Joonisel 15-8, *a* on kujutatud diagramm generaatori voolu järsu vähendamise kohta väärtuselt I_1 väärtuseni I_2. Seejuures saab pinge U_1 regulaatori statismi tulemusena lõppkokkuvõttes võrdseks U_2-ga, kusjuures $U_2 > U_1$. Kuid ta ei saavuta väärtust U_2 kohe, vaid pärast mõningaid võnkumisi, mis võivad regulaatori ebaõnnestunud konstruktsiooni korral olla lubamatult suure amplituudi ja kestusega. Need võnkumised on tingitud kõigi reguleerimissüsteemi kuuluvate seadmete osade mehhaanilisest ja elektromagnetilisest inertsist.



Joon. 15-8. Pinge kõikumised automaatsel reguleerimisel.

Seepärast nähakse automaatregulaatorites ette abinõud, mis seadme statismi suurendamata need võnkumised võimalikult kiiresti summutaksid. Üks sellistest abinõudest on reguleerivate seadmete tagasisidestamine.

Joonisel 15-9 on kujutatud struktuuriskeem jooniselt 15-7 ühe täiendusega. Peale põhilise tagasiside reguleer-



Joon. 15-9. Täiendavate tagasisidedega reguleerimissüsteemi struktuuriskeem.

lüli *5* ja reguleerimisobjekti *1* vahel on sisse viidud veel täiendav tagasiside *TS* mõõtelüli *10-9-6* ja reguleerimisobjekti *1* vahel. Automaatreguleerimises mõeldakse tagasiside all tavaliselt ainult ülalnimetatud täiendavat tagasisidet.

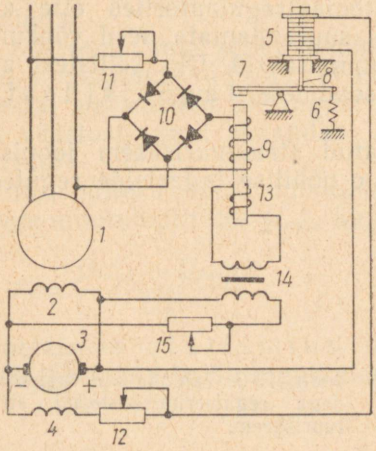
T a g a s i s i d e k s nimetatakse suvalise süsteemi lüli väljundsignaali või selle muutumise kiirusega võrdelist toimet, mis antakse edasi suvalisele eelnenud lülile nii, et tekiks täiendav suletud kontuur.

Mõjudes reguleerimisobjektile mööda lühemat teed, suurendab tagasiside süsteemi reguleerimiskiirust, s. t. kiiretoimelisust, vähendades pinge esialgset hüpet (üle-reguleerimist) ja summutades kiiresti võnkumisi.

Muuhulgas, tagasisided esinevad mitte ainult inimese loodud mehhanismides, nad on olemas ka kõigis looduse elusorganismides, kaasa arvatud inimorganismis. Tagasisidede rikkumine inimorganismis mingil põhjusel häirib organismi elutalitlust.

Üks tagasiside realiseerimise viise on näidatud joonisel 15-10. Tagasiside on viidud sisse vastavalt skeemile 15-9 mõõtelüli *10-9-6* ja reguleerimisobjekti vahel. See ahel koosneb täiendavast tagasisidemähisest *13* elektromagnetil ja tagasisidetrafost *14*. Trafo primaarmähis on ühendatud erguti klemmidega, sekundaarmähis aga mähisega *13*. Takistus *15* on vajalik tagasiside häälestamiseks.

Kui generaatori *1* pinge *U* on konstantne, on ka erguti



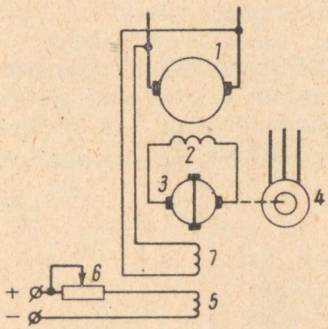
Joon. 15-10. Tagasisidega pingeregulaator.

pinge konstantne ning trafo *14* primaarmähises kulgeb alalisvool. Trafo sekundaarmähises ja mähises *13* voolu ei teki. Kui generaatori pinge hakkab kasvama, siis, nagu varem nägime, hakkab erguti pinge vähenema ja vool trafo primaarmähises muutub. Selle tulemusena tekib vool trafo sekundaarmähises ja elektromagneti mähises *13*.

Mähised *9* ja *13* on keritud nii, et nende tõmbejõud liituvad. Selle tulemusena väheneb surve sambale *5* kiiremini kui tagasiside puudumisel. Ühtlasi vähenevad kiiremini ka erguti pinge ja vool generaatori ergutusmähises *2* ning algul tekkiv pingehüpe on väiksem. Pinge võnkumisi peaaegu ei esine ja tema muutumise graafik (joon. 15-8, *b*) kujutab endast aperioodilist kõverat, mis on näidatud punktiiriga. Seega reageerib regulaator töörežiimi muutustele kiiremini.

15-7. Pinge automaatne reguleerimine elektrimasinvõimendi abil

Masinvõimendid leiavad ulatuslikku kasutamist suletud automaatreguleerimissüsteemides. Joonisel 15-11 on kujutatud masinvõimendi kasutamine generaatori pinge automaatseks reguleerimiseks. Alalisvoolugeneraatori



Joon. 15-11. Generaatori pinge reguleerimine masinvõimendi abil.

ankur *1* pannakse pöörlema primaarjõumasina abil, mida joonisel pole näidatud. Generaatori ergutusmähis *2* on lülitatud eraldi asünkroonmootori *4* poolt käitatava masinvõimendi klemmidele *3*. Masinvõimendi ergutusmähist *5* toidetakse alalisvooluallikast läbi reguleerimistakisti *6*. Seda mähist nimetatakse antud juhul e t t e a n d e m ä -

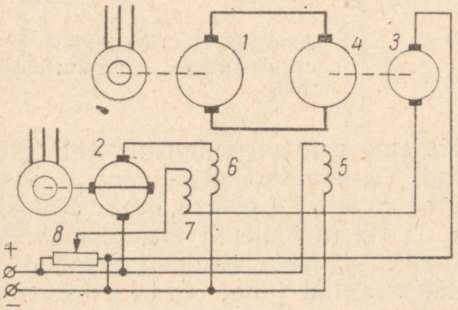
hiseks, sest, reguleerides voolu takistuse *6* muutmise abil, saab muuta masinvõimendi ankruvoolu, voolu generaatori ergutusmähises *2* ja seega ka generaatori pinget.

Teine masinvõimendi mähis *7*, mida nimetatakse *tüürimismähiseks*, ühendatakse generaatori ankru klemmidega. Mähiste *5* ja *7* magneetimisergutused on vastassuunalised ja seega resulteeriv magneetimisergutus $F_r = F_5 - F_7$. Kui generaatori pinge langeb, väheneb vool tüürimismähises *7*, resulteeriv magneetimisergutus aga kasvab. Vool ergutusmähises *2* tugevneb ja generaatori pinge kasvab suuruseni, mis on lähedane esialgsele. Kui generaatori pinge kasvab, siis regulaator vähendab seda samal viisil ja lähendab esialgsele väärtusele.

Antud juhul realiseerib mähis *7* *tagasiside pinge järgi* väljundsuuruse — pinge U — ja sisendsuuruse — ergutusvoolu I_e — vahel. Seda tagasisidet nimetatakse *negatiivseks*, sest väljundsuuruse vähenemine kutsub esile sisendsuuruse kasvu ja vastupidi. Näeme, et ka joonisel 15-10 kujutatud lülitusskeemis on tagasiside negatiivne. Erakordselt ulatuslik negatiivsete tagasisidede kasutamine mitmesugustes reguleerimisskeemides seletub selliste süsteemide isereguleerimisvõimega.

15-8. Lülitusskeem alalisvoolumootori pöörlemiskiiruse stabiliseerimiseks

Joonisel 15-12 on kujutatud leonardajam. Generaatori ankur *1* ja masinvõimendi ankur *2* pannakse pöörlema asünkroonmootorite abil. Tahhogeneraator *3* on mehhaaniliselt ühendatud töömasinat käitava alalisvoolumootori



Joon. 15-12. Lülitusskeem alalisvoolumootori kiiruse stabiliseerimiseks.

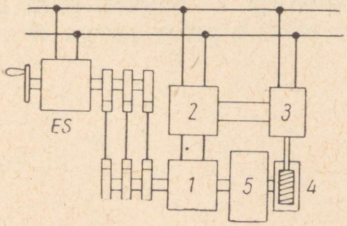
ankruga *4*. Mootori ergutusmähis *5* saab toite alalispingevõrgust; generaatori ergutusmähis *6* on lülitatud samasse võrku jadamisi ankrumähisega *2*.

Masinvõimendi tüürimismähis *7* täidab selles skeemis nii etteandemähise kui ka kiiruse järgi tagasisidet realiseeriva mähise ülesannet, sest tema vool on määratud pingega, mis saadakse pingejagurilt *8*, ja tahhogeneraatori *3* elektromotoorjõuga. Seega $E_7 = U_8 - E_3$.

Lülitusskeem on välja häälestatud nõnda, et mootori ankru *4* normaalse kiirusega pöörlemisel pinge $U_8 = E_3$, pinge masinvõimendi ergutusmähisel aga võrdub nulliga. Kui kiirus väheneb, siis $E_3 < U_8$, ergutunud masinvõimendi annab generaatori ergutusmähisesse *6* täiendavat voolu ja mootori kiirus kasvab. Mootori pöörlemiskiiruse kasvamisel toimuvad vastupidised protsessid. Mootori *4* kiirust saab soovikohaselt reguleerida potentsiomeetri *8* liugkontakti nihutamisega.

15-9. Sünkroonne järgivajam

Automaatseadmete hulka kuuluvad nn. järgivsüsteemid. Kui on vaja järgida mingit füüsikalist suurust, mis muutub niisuguse seaduspärasusega, mida on varem võimatu ette näha, siis luuakse süsteem, mis seda suurust pidevalt ja täpselt «järgib» ning tegutseb või käitub vastavalt füüsikalise suuruse muutumisele. Seda süsteemi nimetatakse järgivsüsteemiks.

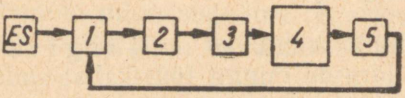


Joon. 15-13. Järgivsüsteemi põhimõtteskeem.

Varem õpitust (§ 12-12) on teada, et selsüüne kasutatakse järgivsüsteemides. Selsüünvastuvõtja järgib pidevalt selsüün-anduri pöördenurka, pöördudes ise sama nurga võrra. Ainult juhul, kui vastava nurga võrra pöör-

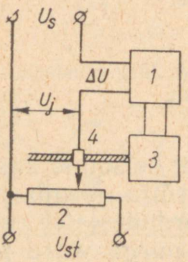
dumiseks on vaja suurt jõudu, joonisel 12-25 kujutatud lülitusskeem ei kõlba.

Lihtsustatud järgivsüsteemi põhimõtteskeem, kus kasutatakse selsüüne, on kujutatud joonisel 15-13. Selsüünandur, mille staator on ühendatud vahelduvvooluvõrguga, ei kuulu reguleerimissüsteemi, vaid hoopis nn. *etteandeseadmesse* (*ES*), mille antud ülesande järgi lülitusskeem hakkab tööle. Selle selsüüni rootor on elektriliselt ühendatud selsüünanduri *1* rootoriga. Selsüünandur kujutab endast reguleerimisobjektiga *5* mehhaaniliselt ühendatud mõõtelüli. Selsüünvastuvõtja staator on erinevalt joonisel 12-25 näidatust ühendatud mitte vahelduvvooluvõrguga, vaid võimendusseadmega *2* ja ta kujutab endast sellise trafo sekundaarmähist, mille primaarmähiseks on rootorimähis. Võimendusseade toidab kahefaasilise vahelduvvoolu-servomootori *3* tüürimismähist, mille teine mähis on ühendatud võrku. Reduktori *4* abil on servomootor mehhaaniliselt ühendatud reguleerimisobjektiga *5*. Süsteemi struktuuriskeem on näidatud joonisel 15-14.



Joon. 15-14. Joonisel 15-13 kujutatud süsteemi struktuuriskeem.

Kui etteandeseade *ES* pöörab selsüünanduri rootorit, kulgeb tänu lahkkõlastusnurgale Θ selsüünvastuvõtja *1* rootorimähises vool. Pärast võimendamist võimendis *2* saabub signaal täiturmootori *3* tüürimismähisesse. Mootor pöörabki reduktori *4* vahendusel reguleerimisobjekti *5* ja koos temaga ka selsüünvastuvõtja *1* rootorit, kuni lahkkõlastusnurk Θ kaob. Seega toimub pidev nurga Θ vähenemine.



Joon. 15-15. Signaali muundav järgivsüsteem.

Joonisel 15-15 on kujutatud elektromehhaaniline järgivsüsteem, mis muundab sisendpingena U_s saadud signaali võlli pöördenurgaks. Selles skeemis antakse võimendisse *1* sisendpinge U_s ja stabiliseeritud pingega (U_{st}) võrku lülitatud pingejagurilt *2* saadava pinge U_j vahe ΔU, s. t. $\Delta U = U_s - U_j$. See pinge antakse võimendi *1* sisendklemmidele ja pärast võimendamist rakendatakse ta pingejaguri liugkontakti *4* nihutava servomootori *3* klemmidele.

Kui $U_s = U_j$, siis $\Delta U = 0$ ja mootor on paigal. Sel ajal on pöördenurk võrdeline sisendpingega. Siin kasutatav pingejagur on lineaarne ja tema pinge on võrdeline liugkontakti *4* nihkega, s. t. mootori võlli pöördenurgaga. Kui U_s muutub, tekib pinge ΔU ja mootor viib liugkontakti uude asendisse, kus $\Delta U = 0$. Uus pöördenurk on võrdeline uue sisendpingega.

U_s pideval muutumisel järgib mootor pidevalt signaali muutumist, pöördudes signaaliga võrdelise suuruse võrra. Signaal U_s saadakse arvutusseadmest, mis jälgib näiteks kas lennuki, raketi vms. liikumist, järgivsüsteem aga sihib kaitsevahendid märgile.

16. ARVUTUSSEADMED

16-1. Arvutusseadmete otstarve

Viimast aastakümmet iseloomustab elektronarvutustehnika tormiline areng ja selle rakendamine kõigis rahvamajandusharudes. Elektronarvutusseadmed on võimaldanud edukalt lahendada selliseid keerulisi ülesandeid nagu maa tehiskaaslaste ja kosmoselaevade üleslennutamine, aatomireaktorite töölerakendamine, ilmaennustamine ja paljud teised varem lahendamatutena paistnud ülesanded. Käesoleval ajal leiavad need seadmed üha suuremat kasutamist rahvamajanduse planeerimisel ja juhtimisel; edukalt lahendatakse selliseid ülesandeid, nagu näiteks maksimaalne tehnilise ja majandusliku edu saavutamine minimaalse töö ja materiaalsete vahendite kuluga. NSV Liidu Teaduste Akadeemia majandusmatemaatiliste uurimiste laboratooriumid on lahendanud näiteks järgmisi ülesandeid: Kuzbassi kaevanduste arendamise optimaalse variandi määramine aastateks 1964 ... 1970 ja Siberi ning Kaug-Ida tsementitehaste paigutuse määramine 1970. aastaks. Keemia- ja metallurgiatööstuses ning teistes maa tööstusharudes tegeldakse arvutusseadmetel põhinevate tehnoloogilisi protsesse juhtivate automatiseeritud süsteemide loomisega. Arvutustehnika kasutamine võimaldab põllumajanduses pidevalt analüüsida pinnast, määrata väetiste vajalikud hulgad ja leida ratsionaalne põllumajanduslike kultuuride paigutus maa rajoonide järgi. Lootustandvaid tulemusi on saadud elektronarvutusseadmete rakendamisel meditsiinis. Need seadmed on leidnud laialdast kasutamist ka sõjatehnikas.

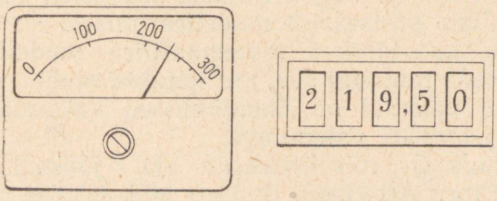
Edu elektronarvutusseadmete kasutamisel seletub nende üha kasvava kiiretoimelisusega. Paljude tehniliste ja

põllumajandusalaste ülesannete lahendamine nõuab keeruliste, paljude tundmatutega võrrandite lahendamist lühikese aja jooksul (ilmaennustused, tootmisprotsessi juhtimine, maa tehiskaaslaste, rakettide trajektooride arvutamine jms.). Nende võrrandite lahendamine on sageli võimalik vaid siis, kui nad lahutada tohutuks hulgaks lihtsaimateks operatsioonideks, mille teostamine nõuab aga nii palju aega, et tulemused võivad osutuda lõpuks aegunuiks. Ainult elektronarvutusseadmed võimaldavad sellistel juhtudel saada õigeaegset vastust. Kui umbes kümme aastat tagasi peeti 2000....4000 matemaatilist operatsiooni sekundis elektronarvutusseadme juures heaks näitajaks, siis käesoleval ajal teevad seeriaviisiliselt valmistatavad elektronarvutusseadmed kümneid tuhandeid ja enam operatsioone sekundis, mõningate kiirus ulatub aga üle miljoni operatsiooni sekundis.

Järgnevalt toome ära vaid mõningate elektronarvutusseadmete elementide otstarbe ja tööga seotud põhimõisted.

16-2. Elektronarvutusseadmete süsteemid

Elektronarvutusseadmed võib jagada kahte rühma: *pidevatoimelised* ehk *analoogarvutusseadmed* (mida ka modelleerivateks nimetatakse) ja *digitaal-* ehk *numberarvutusseadmed* (diskreetse toimega). Joonisel 16-1 on toodud ühe ja sama suuruse (pinge) kujutised, mis on saadud kahel viisil. Esimesel juhul mõõdetakse pinget, mis on siin 219,5 V, osutivoltmeetri abil. Mõõdetakse pidevalt ja kaks mõõdetava suuruse lähedast väärtust võivad teineteisest erineda mistahes väikese suuruse võrra. Teisel juhul tehakse numbrite abil esitatud arvudega kindla korra kohaselt aritmeetilisi teh-



Joon. 16-1. Füüsikalise suuruse mõõtmine pidevatoimelise ja diskreetse toimega mõõteriista abil.

teid ja tulemus antakse välja arvuna. Sel juhul sõltub kahe muutuva suuruse väärtuse vahe arvutusseadme arvkohtade arvust. Juhul kui näiteks arvu täisosale on eraldatud kolm, murdosale aga kaks järku, erinevad kümnendsüsteemi puhul kaks lähimat väärtust teineteisest ühe sajandiku võrra, s. o. 219,50; 219,51; 219,52. Analoogarvutusseadmetes on lahenduse täpsus piiratud temasse kuuluvate elementide (antud juhul voltmeetri) täpsusega, numberarvutusseadmetes aga sõltub täpsus vaid arvu kujutamiseks kasutatavate järkude arvust ja võib olla väga suur. Ülesande lahendamise kiirus on analoogarvusseadmetel suurem kui numberarvutusseadmetel; analoogseadmed on viimastest lihtsamad ega saa olla universaalsed. Nad on kohandatud üht tüüpi ülesannete lahendamiseks. Numberarvutusseadmed on suure täpsuse ja töökiiruse tõttu universaalsed ning neid on võimalik kasutada kõige erinevamates teaduseharudes (tehnika, meditsiin, majandus jne.).

16-3. Analoogarvutusseadmed

Enne kui ehitada mistahes suure maksumusega objekti (masinat, lennukit, tammi, laeva), on vaja tingimata olla veendunud selles, et reaalset objekti iseloomustavad näitajad on lähedased arvutuste tulemustele. Kui täpseid arvutusi pole võimalik teha, tuleb ehitada katseeksemplar ja uurida seda. See meetod on kallis, vahel aga täiesti teostamatu või seotud inimeste elu ohustamisega. Seepärast eelistatakse ehitada vastavale objektile analoogiline (sarnane) mudel ja katsetada seda. Lennuki, laeva, tammi vms. mudelit katsetatakse vastavas keskkonnas (aerodünaamilises torus, kanalis jne.). Selline füüsikaline modelleerimine on kallis ja sageli tülikas, seda eriti soojuslike ja dünaamiliste protsesside modelleerimisel.

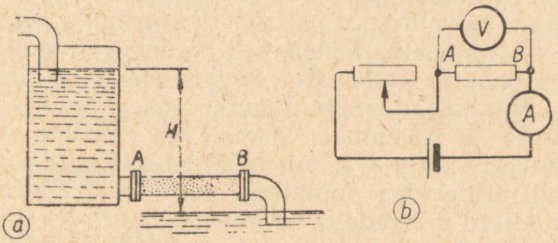
Neil juhtudel kasutatakse matemaatilise modelleerimise meetodit, seda muidugi siis, kui leitakse mudel, mille tööd kirjeldavad valemid on ühetüübilised kavandatava objekti tööd kirjeldavate valemitega.

Näiteks veehulk Q_v, mis filtreerub aja t jooksul läbi liivaga täidetud toru AB (joon. 16-2, *a*) hüdraulilise takistusega r_h, on veenivoode vahe H korral järgmine:

$$Q_v = \frac{H}{r_h} t.$$

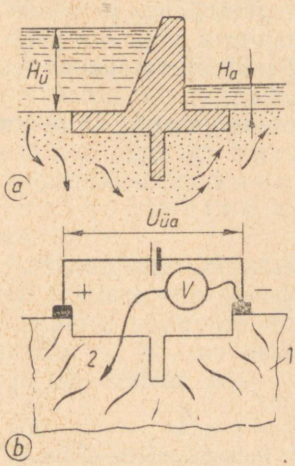
Analoogilise valemi abil määratakse ka elektrihulk, mis läbib vooluringi lõiku AB (joon. 16-2, *b*) aja t jooksul:

$$Q_e = \frac{U_{AB}}{r_e} t.$$



Joon. 16-2. Hüdraulilise seadme elektriline mudel.

Seega kirjelduvad neis seadmetes toimuvad protsessid ühe valemiga, kuid katsetuste tegemiseks on mugavam elektriline lülitusskeem. Seepärast võime seda lugeda joonisel 16-2, *a* näidatud hüdraulilise seadme mudeliks, kuigi ta on ehitatud teistsugustel füüsikalistel alustel. Praktikas kirjelduvad paljud ülesanded keeruliste võrranditega, mille lahendamine nõuab tohutult tööd ja aega. Nende ülesannete puhul kasutataksegi elektrotehnikal baseeruvat



Joon. 16-3. Tammi alt pinnasest läbi filtreeruva vee rõhkude määramine elektrilise mudeli abil.

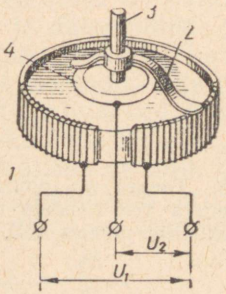
matemaatilist modelleerimist kui ühte kõige sobivamat meetodit.

Joonisel 16-3, *a* on kujutatud tamm, mis tuleb ehitada vett läbi laskvale pinnasele. Vesi filtreerub läbi pinnase ja võib põhjustada tammi purunemist. Tuleks teha keerulisi ja palju aega nõudvaid arvutusi vee filtreerumise rõhkude ja kiiruste määramiseks, füüsikalise mudeli ehitamine on aga sageli tülikas ja kallis. Kui lõigata elektrit juhtivast paberist *1* välja kavandatava tammi aluse kujuline leht (joon. 16-3, *b*) ja rakendada sellele vee rõhkude vahet $H_{ü} - H_{a}$ imiteeriv pinge $U_{üa}$, siis mõõtes sondiga *2* potentsiaale mudeli erinevates punktides, võib leida suurused, mis on võrdelised rõhkudega erinevates pinnase punktides tammi all. Sel juhul kantakse võrdsete rõhkude (potentsiaalide) jooned mudelile võrrandeid lahendamata. Mudeli edasisel täiustamisel asendatakse elektrit juhtiv paber miniatuursetest takistitest koosneva võrguga, mis lubab imiteerida mittehomogeense pinnase erinevate kohtade filtreerimistakistusi.

16-4. Arvutused potentsiomeetritel töötavates modelleerimisseadmetes

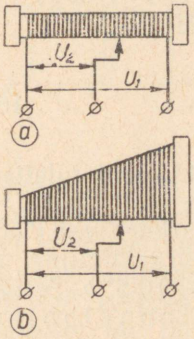
Automaatseadmetes ja järgivsüsteemides anduritelt saadavaid signaale muundatakse mitmeti (§ 12-9, 12-10, 12-11, 15-9): neid liidetakse, lahutatakse, korrutatakse, jagatakse, diferentseeritakse, integreeritakse ja nende alusel lahendatakse võrrandeid, kusjuures kõik see peab toimuma kiiresti ja pidevalt. Selliseid operatsioone teostavad pidevatoimelised arvutusseadmed.

Joonisel 16-4 on kujutatud potentsiomeetri ehitus, mida



Joon. 16-4. Potentsiomeetri ehitus.

kasutatakse mehhaanilise suuruse (pöördenurga) muundamiseks elektriliseks suuruseks, korrutamiseks ja jagamiseks, järgivsüsteemides aga pingesignaali muundamiseks pöördenurgaks. Isoleermaterjalist alusele *1* on keritud suure eritakistusega traat. Liugkontakt *2* libiseb telje *2* pööramisel mööda juhtme isolatsioonita pinda ja mööda kontaktrõngast *4*. Seega jagatakse juhtme otstele rakendatav pinge kontakti *2* abil pingeteks U_2 ja $U_1 - U_2$. Potentsiomeetri alus on joonisel 16-5, *a* kujutatud sirgestatuna.



Joon. 16-5. Potentsiomeetri aluste kujud.

Potentsiomeetrit, mille alus on muutumatu laiusega, nimetatakse lineaarseks, sest

$$U_2 = U_1 \frac{\alpha}{\alpha_m} = U_1 x, \qquad (16\text{-}1)$$

kus α ja α_m on liugkontakti pöördenurk ja selle maksimaalväärtus, x aga nurk α suhtelistes ühikutes. Kui $x =$ $=$ const, siis kasutatakse potentsiomeetrit ühest väiksema konstantse teguriga korrutusblokina. Seda potentsiomeetrit kasutatakse ka kahe muutuva suuruse U_1 ja x korrutusblokina ning seda siis, kui α ja U_1 muutuvad.

Automaatsetes arvutusseadmetes peab potentsiomeeter sageli realiseerima pöördenurga ja väljundpinge vahelise ebalineaarse sõltuvuse. Sel juhul peab alusel olema teine kuju. Kui r_m ja r on vastavalt potentsiomeetri kogutakistus ja osa sellest, siis

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{r}{r_m} = f(x).$$

x järgi diferentseerimisel saame esimese tuletise:

$$\frac{1}{r_m}\frac{\Delta r}{\Delta x} = f'(x); \tag{16-2}$$

$$\Delta r = \varrho\frac{\Delta l}{q} = \varrho\frac{2y\Delta w}{q} = \varrho\frac{2yw_m\Delta x}{q},$$

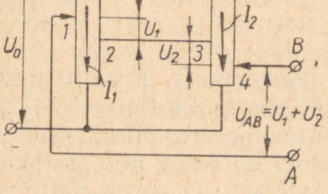
kus Δr, ϱ, Δl, q, v, Δw ja w_m on vastavalt takistuse muutus, eritakistus, juhtme pikkuse muutus, juhtme ristlõige, aluse laius, juhtme keerdude arvu muutus ja kogu juhtme keerdude arv ning Δx vastav liugkontakti nihe.

Siis aluse laius

$$y = \frac{r_m q}{2\varrho w_m} f'(x) = kf'(x), \tag{16-3}$$

s. t. aluse kuju kirjeldab etteantud funktsiooni tuletisega võrdeline funktsioon.

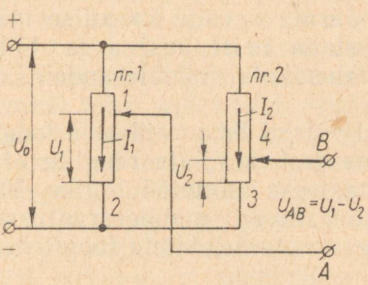
Kui $f(x) = x$, peab alus olema täisnurkne, sest $f'(x) = 1$; $f(x) = x^2$ korral on alus kolmnurgakujuline, sest $f'(x) = 2x$ jne. Näited on toodud joonisel 16-5, *b*. Selliseid potentsiomeetreid nimetatakse funktsionaalpotentsiomeetriteks.



Joon. 16-6. Pingete liitmine potentsiomeetrite abil.

Joonisel 16-6 on kujutatud mehhaaniliste sisendsignaalide, potentsiomeetrite liugkontaktide nihete muundamine väljundsignaalideks — pingeteks ja nende pingete samaaegne liitmine skeemi väljundil AB. Potentsiomeetrid *№ 1* ja *№ 2* on ühendatud stabiliseeritud pingega (U_0) energiaallikaga, nende keskpunktid on aga lühistatud. Potentsiomeetrites kulgevad voolud I_1 ja I_2. Vooludega on faasis pingelangud $U_1 = I_1 r_1$ ja $U_2 = I_2 r_2$, kus r_1 ja r_2 on potentsiomeetrite liugkontaktide ja keskpunktide vaheliste osade takistused. Kui läbida väljundi punktide A ja B vaheline

kontuur suunas *A-1-2-3-4-B*, on selge, et $U_{AB} = U_1 + U_2$, ja seadme mingi järgmise kaskaadi takistit r_k läbib vool klemmilt *A* klemmi *B* suunas. Kui liugkontaktid seisavad keskpunktide kohal, siis $U_{AB} = 0$.



Joon. 16-7. Pingete lahutamine potentsiomeetrite abil.

Joonisel 16-7 on näidatud potentsiomeetrite ühendusskeem pingete vahe $U_{AB} = U_1 - U_2$ saamiseks, sest kontuuri läbimisel suunas *A-1-2-3-4-B* potentsiomeetrite pingelangud lahutuvad teineteisest.

Kõigil eespool nimetatud pidevatoimelistel arvutusseadmetel on järgmised olulised puudused: koormuse mõju väljundpinge suurusele, arvutuste väike täpsus ja teostatavate matemaatiliste operatsioonide piiratud arv. Kaasaegsetes analoogarvutusseadmetes on need puudused kõrvaldatud nn. operatsioonvõimendite kasutamisega, mis ehitatakse takistussidestuses alalisvooluvõimendite baasil (§ 13-11). Viimaste kirjeldamine jääb käesoleva raamatu raamidest välja.

16-5. Numberarvutusseadmete otstarve ja üldisi andmeid nende kohta

Mõningatel juhtudel pole mitmesuguste teaduse ja tehnika valdkonda kuuluvate protsesside uurimine mudelite abil otstarbekas. Pealegi on analoogarvutites neisse kuuluvate elementide täpsusest sõltuv lahenduse viga tervelt mitu protsenti lõpptulemusest. Rea küsimuste lahendamisel peab aga lubatav viga olema miljoneid ja miljoneid kordi väiksem (mürskude, rakettide, tehiskaaslaste ja planeetide trajektooride arvutamine). Numberarvutusseadmetes võib lahenduse täpsus olla kuitahes suur, sest

see on määratud ainult arvude järkude arvuga, millele seade on arvestatud. Numberarvutusseadmed on universaalsed ja neid võib kasutada mistahes teadusharus (tehnikas, meditsiinis, majanduses jne.). Need seadmed võivad peale puhaste arvutusoperatsioonide teostamise lahendada ka loogilisi ülesandeid: määrata arvude korrutise märki, eraldada arvu osi ja koostada neist uusi arve, tõlkida teksti ühest keelest teise, lahendada maleülesandeid, valida kirjandust jms.

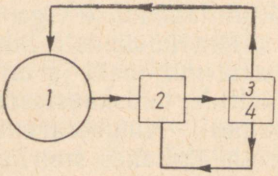
Numberarvutusseadmed võivad teha vaid neid loogilisi operatsioone, mida inimene teeb kindlate reeglite alusel ja mida nimetatakse formaalseks mõttetöö liigiks. Tänapäeva elektrontehnikal baseeruvad numberarvutusseadmed ilmusid mehhaaniliste arvutusseadmete loogilise jätkuna.

16-6. Numberarvutusseadme töötamispõhimõte

Kõikide üht tüüpi ülesannete lahendamiseks (kahe mitmekohalise arvu liitmiseks, ruutjuure võtmiseks jne.) võib koostada täpse eeskirja kindlas järjekorras teostatavate lihtsaimate operatsioonide süsteemi loomiseks, mis viib meid lahendusele. Sellist eeskirja nimetatakse *algoritmiks*.

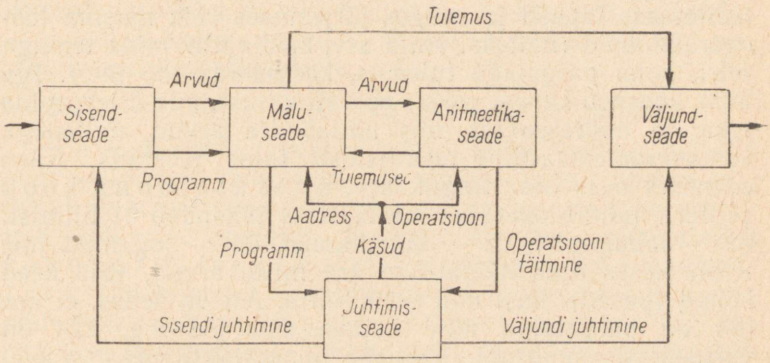
Termin ise tuleneb keskaja usbeki matemaatiku Al-Horezmi nimest, kes andis IX sajandil reeglid selliste eeskirjade koostamiseks. Eeskirjade mõte seisneb selles, et inimene võib neid täita, ilma et ta asjast aru saaks. Inimene peab masinlikult, kuid täpselt teostama vähest arvu lihtsamaid operatsioone. Kui see on nii, siis võib ju tänapäeva elektrontehnika taseme juures inimest asendada seade, mis suudab lahendada ülesandeid inimesele kättesaamatu kiirusega. See seade peab olema sel juhul varustatud algoritmiga, mida siis nimetatakse *programmiks*.

Joonisel 16-8 on kujutatud inimarvutaja töö struktuuri-



Joon. 16-8. Inimarvutaja töö struktuuriskeem.

skeem. Tööprotsessis kasutab arvutaja *1* iga operatsiooni sooritamiseks programmi *3*, mis on kirjutatud numbrite, tähtede, algebraliste operatsioonide märkide jms. abil. Nende andmete alusel teeb ta arvutusi paberil, arvelaual või aritmomeetril, s. t. rakendab tööle tema käsutuses oleva aritmeetikaseadme *2*. Pärast arvutamist märgib ta tulemuse vastavasse veergu (pessa) paberile. Viimane kujutab endast mäluseadet, mis suudab saadud tulemusi pika aja vältel hoida. Seda, mida pole vaja kauem säilitada, hoiab inimene järgmise operatsiooni tarbeks oma mälus. Täitnud esimese programmi punkti, võtab arvutaja mäluseadmest *4* programmi poolt nõutavad tulemused ja täidab programmi teise punkti jne. Niimoodi punkt-punktilt täidetakse kogu arvutusprogramm. Kõigest sellest järeldub, et numbrilise arvutusseadme struktuuriskeem peab olema sarnane joonisel 16-8 näidatule.



Joon. 16-9. Numberarvutusseadme struktuuriskeem.

Tänapäeva numberarvutusseadme struktuuriskeem on kujutatud joonisel 16-9. Selles skeemis peab juhtimisseade ilmselt täitma inimese-arvutaja funktsioone. Mäluseade koosneb tavaliselt kahest erinevast blokist: välismäluseadmest, mis nagu asendab arvutaja üleskirjutusi paberile, käsiraamatuid, tabeleid jms., ning operatiivmäluseadmest, mis säilitab vaid neid andmeid, mida arvutustel kiiresti ja pidevalt kasutatakse ning mida pole vaja pikemat aega säilitada. Aritmee-

tikaseade asendab kõiki arvutusvahendeid, mida arvutaja kasutas: paberit, arvelauda, aritmomeetrit, mehhaanilist klahvarvutusmasinat jt. Numberarvutusseade on ilmselt vaid siis kiiretoimeline (tuhandeid ja kümneid tuhandeid operatsioone sekundis), kui sellise kiirusega töötavad kõik seadme blokid. Kahjuks ei vasta sellele tingimusele veel sisendseadmed ja väljundseadmed, mis on vastavalt programmi masinasse viimiseks ja tulemuste väljastamiseks. Üksikute blokkide ehitust kirjeldame hiljem.

16-7. Numberarvutusseadme üksikute blokkide koostöö

Numberarvutusseadme (joon. 16-9) töö algab sellest, et sisendseade toob operatiivmäluseadmesse programmi, mis koosneb käskudest (korraldustest), millede abil loetletakse täpselt ja ranges järjestuses kõik masina tööoperatsioonid (näiteks: võtta arv, kust võtta, mida temaga teha, kuhu paigutada tulemus, katkestada töö jne.). Iga käsk koosneb kahest osast: operatiivosast, mis ütleb, mida teha, ja aadressosast, mis näitab ära arvud, milledega vastav matemaatiline operatsioon tuleb teostada. Käsu esimeses osas olev tinglik arv, operatsiooni kood (šiffer), näitab operatsiooni. Näiteks tähendab 01 liitmist, 02 — lahutamist, 03 — korrutamist, 04 — jagamist jne. Käsu teises osas näidatakse ära mitte arvud, vaid need kohad (pesad), kust nad tuleb võtta. Asi on selles, et iga arv on paigutatud ühte mäluseadme pessa, mis on varustatud numbriga. Viimast nimetatakse pesa aadressiks. Seega tähendab käsk 01 0025 0030 0175 järgmist: liita pesast 0025 võetud arv arvuga pesast 0030 ja tulemus paigutada pessa 0175. Pärast programmi viimist operatiivmäluseadmesse toimub kogu numberarvutusseadme töö automaatselt.

Numberarvutusseadme juhtimine toimub kas pinge- või vooluimpulsside abil, mida võimendatakse ja formeeritakse nii, et nad muutuvad ristkülikulisteks. Nende impulsside kindlad tinglikud kombinatsioonid võivad kujutada arve. Impulsid formeeritakse juhtimisseadmes ja nende abil toimub arvude ja käskude valimine mäluseadmest. Aadressidele vastavad arvud antakse mäluseadmest aritmeetikaseadmesse, kus nendega teostatakse käsu koodiga

näidatud arvutusoperatsioon. Arvutuste tulemus antakse tagasi mäluseadmesse käsus näidatud aadressile (joon. 16-9). Pärast ühe operatsiooni lõpetamist saab juhtimisseade aritmeetikaseadmest teate operatsiooni lõpetamise kohta ja läheb üle programmi järgmise punkti juurde.

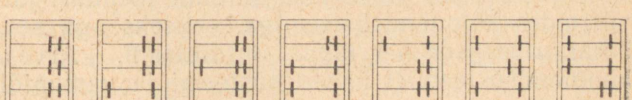
16-8. Kahendsüsteem

Arvutamisel kasutame tavaliselt positsioonilist k ü m n e n d s ü s t e e m i. Selles süsteemis kujutavad numbriteks nimetatavad märgid 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 ja 9 endast nulli ja esimest üheksat täisarvu. Kümmet märgitakse kahe numbriga 10 ja ta on arvsüsteemi aluseks. Iga kujutatud rea number võib sõltuvalt tema positsioonist e. asukohast arvus väljendada erinevaid väärtusi. Näiteks on arvus 345,2 komast paremal kaks kümnendikku — $2 \cdot 10^{-1}$, komast vasakul aga viis ühelist — $5 \cdot 10^{0}$, neli kümnelist — $4 \cdot 10^{1}$ ja kolm sajalist — $3 \cdot 10^{2}$. Järelikult on arv tervikuna esitatav järgmiselt:

$$345{,}2 = 3 \cdot 10^{2} + 4 \cdot 10^{1} + 5 \cdot 10^{0} + 2 \cdot 10^{-1}$$ ühelist.

Kui meil oleks tegemist mingisuguse loenduriga, siis peab selles igal järku näitaval seadisel olema üheksa erinevat stabiilset olekut. Numberarvutusseadmele on osutunud sobivaks süsteem alusega 2, mida nimetatakse k a h e n d s ü s t e e m i k s ja kus on vaid kaks numbrit: 1 ja 0. Kui esimeses (parempoolses) järgus peab ühe asemele tekkima kaks (2), siis kantakse kaks ühena (1) vanemasse (kõrgemasse) järku, nooremasse (madalamasse) aga paigutatakse 0.

Selliselt arvutame siis, kui kasutame arvelauda, mille igal vardal on vaid kaks kettakest (joon. 16-10).



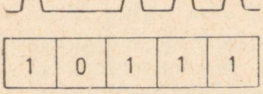
Kahendsüsteem	0	1	10	11	100	101	110
Kümnendsüsteem	0	1	2	3	4	5	6

Joon. 16-10. Kahendsüsteemis arvutamine arvelauaL

Järgnevalt on toodud mõningad arvud kirjutatuna kahendsüsteemis:

1 — üks	1011 — üksteist
10 — kaks	1100 — kaksteist
11 — kolm	1101 — kolmteist
100 — neli	1110 — neliteist
101 — viis	1111 — viisteist
110 — kuus	10000 — kuusteist
111 — seitse	0,1 — pool
1000 — kaheksa	0,01 — veerand
1001 — üheksa	0,001 — kaheksandik
1010 — kümme	0,11 — kolm neljandikku

Seega kujutab kahendsüsteemi arvu 1011,1 komast paremal olev koht poolt — $1 \cdot 2^{-1}$ ja vasakul olevad kohad ühte ühelist — $1 \cdot 2^0$, ühte kahelist — $1 \cdot 2^1$, nulli neljalist — $0 \cdot 2^2$ ja üht kaheksalist — $1 \cdot 2^3$, s. t. $(1011{,}1)_2 = 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^0 + 1 \cdot 2^{-1} = 8 + 0 + 2 + 1 + 0{,}5 = (11{,}5)_{10}$. Indeksid 2 ja 10 tähistavad süsteemi alust.



Joon. 16-11. Kahendsüsteemis arvu edasiandmine impulsside jadana.

Näeme, et sel juhul võib numbri olemasolu (1) või puudumist (0) igas järgus kujutada releetüüpi loendurite abil, mida juhitakse järgmiste impulssidega: sisse lülitatud — välja lülitatud, on pingesignaal — pole signaali, magnetlindi lõik on magneeditud — ei ole magneeditud jne.

Näiteks võib kahendarvu 10111 anda edasi pingesignaalide (-impulsside) abil, mis on näidatud joonisel 16-11. Sellist põhimõtet kasutataksegi numberarvutusseadmetes. Kahendsüsteemi puuduseks on suur loenduri järkude arv, võrreldes kümnendsüsteemiga, eeliseks aga see, et numberarvutusseade tervikuna on lihtsam. Arve teisendab kümnendsüsteemist kahendsüsteemi ja vastupidi arvutusseade ise.

16-9. Aritmeetilised tehted kahendsüsteemi arvudega

Kahendsüsteemi suur väärtus seisneb arvudega tehtavate aritmeetiliste tehete lihtsuses. Tehteid teostatakse nagu kümnendsüsteemiski. Liidame kaks arvu, mis on vasakul kujutatud kümnend- ja paremal kahendsüsteemis (*näide 1*).

Näide 1

$$\begin{array}{r} 25 \\ +\ 19 \\ \hline 44 \end{array}$$

Näide 2

$$\begin{array}{r} 11 \\ 11001 \\ +\ 10011 \\ \hline 101100 \end{array}$$

Näide 3

$$\begin{array}{r} 25 \\ -\ 19 \\ \hline 06 \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 11001 \\ -\ 10011 \\ \hline 00110 \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 25 \\ +\ 81 \\ \hline (1)06 \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 11001 \\ +\ 01100 \\ \hline 100101 \end{array}$$

1

110

Kümnendsüsteemi puhul kantakse liitmisel $5 + 9$ üks ühik (s. o. üks kümme) vanemasse (kümneliste) järku ja liidetakse kümneid näitavate arvude summale $2 + 1$. Täpselt samuti on ka kahendsüsteemi korral: kaks esimese (parempoolse) järgu ühikut annavad kokku kahe, mis läheb ühena üle kaheliste järku, summa esimesse järku saadakse aga null. Kaks teise (kaheliste) järgu ühikut annavad kokku nelja, mis kantakse ühena neljaliste järku. Summa on kaheliste järgus null, neljaliste järgus aga 1 jne.

Lahutamisel (*näide 2*) tuleb kümnendsüsteemi puhul kümneliste järgust laenata üks kümneline ja vahe on võrdne kuuega. Kahendsüsteemi puhul tuleb vajaduse korral laenata vanemast järgust üks kaheline, neljaline jne. *Näite 2* esimeses järgus on vahe võrdne nulliga. Teises järgus lahutatakse laenatud kahest (kaks kahelist) üks ja vaheks jääb üks. Kolmandasse järku jääb üks, neljandasse ja viiendasse aga nullid.

Numberarvutusseadmetes asendatakse lahutamine tavaliselt pöördkoodi teisendatud arvu liitmisega. Pöördkoodis on arvu ühed asendatud nullidega ja nullid ühtedega. Selline liitmine on kujutatud *näites 3*. Kümnendsüsteemi puhul tehakse seda nii: arv 25, millest lahutatakse, liidetakse arvuga, mis täiendab lahutatavat arvu

arvuni, mis kirjeldub ühe ja nullide abil ($100 - 19 = 81$), ja summas jäetakse ära kõrgeima järgu ühik. Vastuseks saame kuue nagu lahutamiselgi.

Kahendsüsteemi korral liidetakse arvule 11001 arv 10011 pöördkoodis, s. t. arv 01100. Järgnevalt võetakse summa vanima järgu ühik, liidetakse see noorimale järgule. Saadakse sama vastus mis lahutamiselgi. Kõike seda teeb numberarvutusseadme aritmeetikaseade.

Korrutamistabel on kahendsüsteemis väga lihtne:

$0 \cdot 0 = 0; \quad 1 \cdot 0 = 0 \cdot 1 = 0; \quad 1 \cdot 1 = 1.$

Korrutame 4 ja 5 ehk kahendsüsteemis 100 ja 101 (*näide 4*):

Näide 4

$$\begin{array}{r} 100 \\ 101 \\ \hline 100 \\ + \quad 100 \\ \hline 10100 \end{array}$$

Seega ühega korrutamisel kirjutatakse korrutatav arv lihtsalt ümber ja tehakse nihe ühe koha võrra vasakule, nulliga korrutamisel tehakse aga ainult nihe ühe koha võrra vasakule. Kogu korrutamine taandub korrutatava arvu nihutamistele ühe järgu võrra ja liitmistele. Seda aritmeetikaseade teebki.

Jagamine taandub korduvale jagaja lahutamisele jagatavast ja saadava jäägi täiendamisele paremalt (*näide 5*):

Näide 5

$$\begin{array}{r|l} 111000 & 1000 \\ \cline{2-2} 1000 & 111 \\ \cline{1-1} 1100 & \\ 1000 & \\ \cline{1-1} 1000 & \\ 1000 & \\ \cline{1-1} 0000 & \end{array}$$

s. t. $56 : 8 = 7$.

Et korrutamine asendatakse mitmekordse liitmisega ning jagamine mitmekordse lahutamisega, lahutamist aga võib asendada liitmisega, siis taanduvad kõik aritmeetilised tehted liitmisele.

16-10. Mõningate numberarvutusseadmete elementide töötamispõhimõte

Kõik numberarvutusseadmed koosnevad mälu-, juhtimis-, aritmeetika- jne. seadmetest. Need omakorda koosnevad üksikutest tüüpelementidest, mida nimetatakse ka l ü l i d e k s. Iga lüli täidab kindlaid operatsioone. Kui ta on lülitatud teatud viisil üldisesse skeemi, ta kas laseb saadetud impulsi kohe läbi või teeb seda hilinemisega. Ta võib teda nihutada järgu võrra jne.

Iga lüli olek on määratud talle antava pinge väärtusega, pingeimpulsi olemasolu või puudumisega, või kahe erineva polaarsusega impulssidega. Numberarvutusseadmetes kasutatakse ühesuunalise juhtivusega seadiseid: vaakuum- ning pooljuhtdioode ja -trioode (vt. ptk. 13).

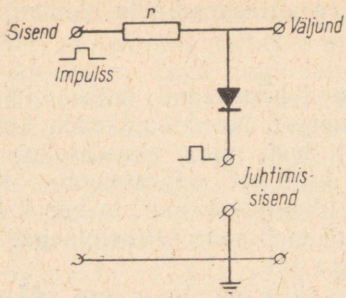


Joon. 16-12. Ventiili tingmärk.

Neid seadiseid kujutame edaspidi nii, nagu näidatud joonisel 16-12. Seadis laseb voolu läbi siis, kui anoodi potentsiaal on kõrgem kui katoodil (seadise takistus on väike), ja ta on lukustatud, kui pinge polaarsus on vastupidine (seadise takistus on väga suur).

a) Ventiil

V e n t i i l (siin arvutusseadme element, millel on ventiili omadused) on kujutatud joonisel 16-13. See element on mõeldud pingeimpulsi kinnipidamiseks või läbilaskmiseks. Kui ülemisele sisendklemmile anda positiivse polaarsusega ristkülikuline pingeimpulss, siis vool läbib ventiili anoodilt katoodi suunas, kulgedes läbi juhtimissisendi vooluringi, mida joonisel pole näidatud, maanduseni. Takistus r on suur, ventiili takistus aga tühine, ja võib lugeda, et kogu pinge langeb takistile r. Järelikult anoodi potentsiaal ja ka skeemi väljundi potentsiaal peaaegu ei erine maa potentsiaalist. Seepärast loetakse, et väljun-

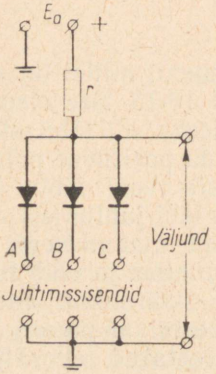


Joon. 16-13. Ventiili töötamispõhimõte.

disse impulssi edasi ei lähe (väljundis on null). Kui üheaegselt sisendisse antava impulsiga anda ka juhtimissisendisse positiivne impulss, mis on kas sama suur või suurem kui sisendisse antav impulss, ventiil sulgub. Vool takistis *r* saab võrdseks nulliga, väljundi potentsiaal osutub aga võrdseks sisendi potentsiaaliga, s. t. positiivne impulss (üks) on antud edasi väljundisse. Analoogilisel põhimõttel töötavad kõik järgnevalt toodud suunatoimega elektron- ja pooljuhtseadistel töötavad arvutusseadmete elemendid.

b) Ühtivusskeem

Ühtivusskeem (*«NING»*-lüli) on kujutatud joonisel 16-14. Kui ventiilide anoodidele ilmub positiivne impulss, siis neid läbib vool. Peaaegu kogu pinge langeb takistile *r* ja impulssi väljundisse ei anta (null). Kui anda

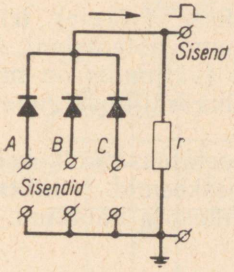


Joon. 16-14. Ühtivusskeem.

positiivne impulss ühele sisenditest *A*, *B* ja *C*, siis olukord ei muutu, sest vool läbib kahte sulgemata ventiili. Positiivne impulss (üks) antakse väljundisse vaid juhul, kui kõik kolm ventiili on tüürivatele sisenditele *A*, *B*, *C* antud positiivsete impulssidega suletud. Sel põhjusel nimetatakse skeemi ühtivusskeemiks.

c) Koonduvusskeem

Koonduvusskeem («*VÕI*»-lüli) on kujutatud joonisel 16-15. Positiivse impulsi andmisel kas või ühele sisenditest *A*, *B*, *C* läbib takistit *r* vool. Et ventiili sisetakistus on tühine, on kogu pingelang koondunud takistile *r*, järelikult on selle ülemine klemm ja vastav väljund-



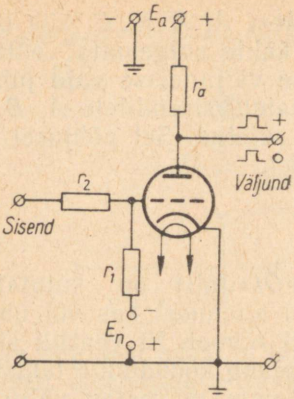
Joon. 16-15. Koonduvusskeem.

klemm kõrge potentsiaaliga (väljundis üks). Koonduvusskeemiks nimetatakse skeemi sellepärast, et ta nagu koondab [1] erinevatest suundadest saabuvaid impulsse (ühtesid). Kui anda ühele sisenditest, näiteks *A*-le, positiivne impulss, siis samal ajal element suleb kõrge potentsiaaliga oma ülejäänud sisendid *B* ja *C*.

d) Invertorskeem

Invertorskeem («*EI*»-lüli) on kujutatud joonisel 16-16. Signaali puudumisel (null) sisendis on triood suletud negatiivse nihkepinge E_n abil. Väljundi ülemise klemmi potentsiaal on võrdne anoodpinge (E_a) allika positiivse klemmi potentsiaaliga, s. t. väljundis on üks.

[1] Koondamine on siin võrreldav sarnaste liikmete koondamisega algebralises avaldises. — *Tõlk.*



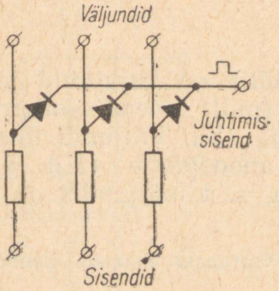
Joon. 16-16. Invertorskeem.

Positiivse impulsi ilmumisel sisendisse (võrele) triood juhib voolu ja takisti r_a alumise klemmi potentsiaal, s. o. potentsiaal väljundis, langeb järsult (väljundis on null). Seega muundatakse sisendsignaal üks väljundsignaaliks null.

Nendest põhilistest lülitustest koostatakse kõik keerukamad numberarvutusseadme lülitusskeemid. Lihtsuse mõttes pole edaspidi skeemides maandusosa näidatud.

e) Ventiilide ahel

Ühe juhtimissisendiga ventiilide ahel on kujutatud joonisel 16-17. Impulsid antakse sisenditest väljunditesse vaid siis, kui juhtimissisendisse on antud ventiile sulgev impulss. Kui seda impulssi pole, kulgeb

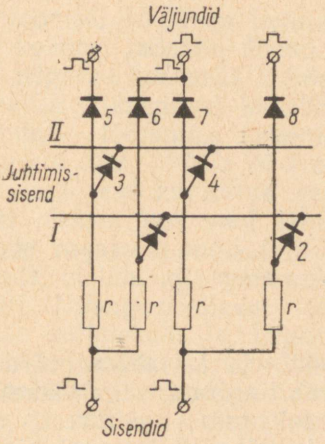


Joon. 16-17. Ühe juhtimissisendiga ventiilide ahel.

vool sisendis olevate positiivsete impulsside korral läbi ventiilide ja tänu suurtele pingelangudele takistitel on anoodide ja väljundite potentsiaalid lähedased nullile.

f) Nihkeskeem

Ühe järgu võrra nihutav nihkeskeem on toodud joonisel 16-18. Nagu eespool näidatud, märgiti kahendsüsteemis ühega korrutamisel üles korrutatav arv ja siis nihutati seda, nulliga korrutamisel sama arvu aga ainult nihutati. Nihkeskeemi ülesandeks ongi vajalikke arve nihutada.

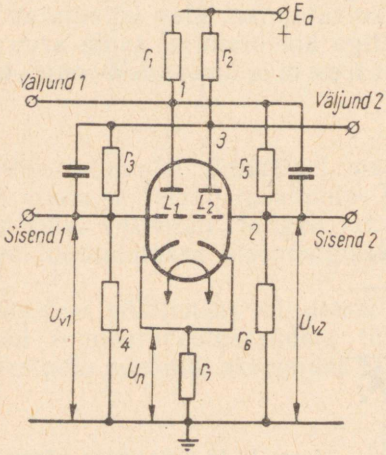


Joon. 16-18. Ühe järgu võrra nihutav nihkeskeem.

Kõrge potentsiaal on vaid arvude jaoks olevatel sisenditel, lattidel *I* ja *II* sellist potentsiaali pole. Voolud kulgevad läbi dioodide *1*, *2*, *3*, *4* ja väljundite potentsiaalid on väga väikesed (signaalid puuduvad). Positiivse impulsi andmisel latile *I* suletakse dioodid *1* ja *2*; impulsid kulgevad läbi dioodide *6* ja *8* keskmisele ja parempoolsele väljundile. Diood *7* on vasaku sisendi kõrge potentsiaaliga suletud. Kui anda impulss latile *II*, siis sulguvad dioodid *3* ja *4*. Läbi dioodide *5* ja *7* antakse impulsid vasakule ja keskmisele väljundile (nihkuvad vasakule), diood *6* on aga kõrge potentsiaaliga suletud.

g) Elektrontriger

Elektrontriger ehk elektronrelee on üheks tähtsamaks numberarvutusseadme elemendiks. Ta koostatakse kahest trioodist või ühest kaksiktrioodist, nii nagu on näidatud joonisel 16-19 (vt. ka ptk. 13). Elektronrelee iseärasus seisneb selles, et tema olek on püsiv vaid juhul, kui lambi ühte poolt, näiteks paremat poolt, läbib vool, vasakut aga vool ei läbi või vastupidi.



Joon. 16-19. Trigeri lülitusskeem.

Oletame võimatut, et lampe L_1 ja L_2 läbivad võrdsed voolud. Kui lambi L_1 vool kasvab tingituna väga väikesest juhuslikust anoodvooluringi takistuse muutusest, siis punkti *1* potentsiaal väheneb ja väheneb ka vool pingejaguris r_5r_6. Punkti *2* potentsiaal ja järelikult ka pinge lambi L_2 võrel vähenevad, samuti väheneb vool selle lambi anoodvooluringis. Seejuures kasvab punkti *3* potentsiaal ja ka pinge lambi L_1 võrel. Selle tagajärjel vool lambi L_1 anoodvooluringis kasvab laviinitaoliselt, lambis L_2 aga väheneb sama kiiresti. Nii läheb triger mikrosekundite vältel olekusse, kus lamp L_1 juhib (triood on avatud), lamp L_2 on aga suletud. Kui nüüd anda positiivne impulss sisendisse *2* või negatiivne impulss sisendisse *1*, siis lamp L_1 sulgub silmapilkselt, lamp L_2 aga avaneb.

Trigereid kasutatakse mäluseadmetes vaid ühe arvu järgu salvestamiseks. Nad on valmistatud kaasajal pool-

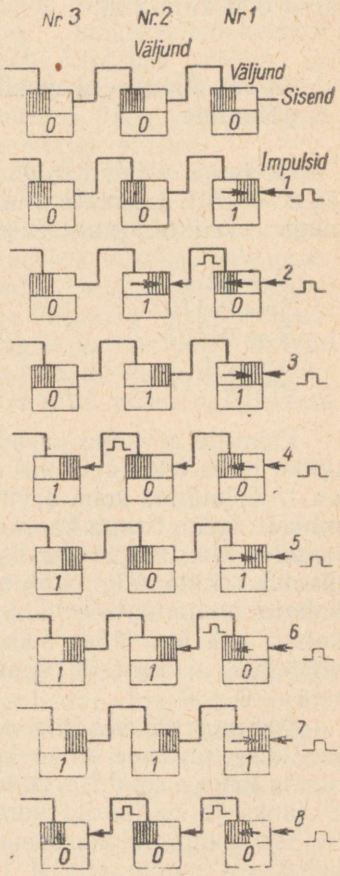
juhttrioodidel. Takistitega r_3, r_5 rööbiti lülitatud mahtuvused kiirendavad trigeri ümberviskumist: nende takistus on sel hetkel väga väike ja nad sildavad suured takistused r_3 ja r_5.

16-11. Kahendloenduri töötamispõhimõte

Nagu eespool öeldud, kasutatakse trigerit kahendsüsteemis arvu ühe järgu salvestamiseks ja ta fikseerib kas numbri olemasolu järgus (üks) või selle puudumise (null). Seega on trigereid sama palju kui arvu järkusid. Trigerite ahelat ühe arvu salvestamiseks nimetatakse registriks.

Joonisel 16-20 on kujutatud kolmest jadamisi ühendatud trigerist koosneva kolmekohalise (-järgulise) kahendloenduri töötamise skeem. Trigerid *№ 1*, *№ 2* ja *№ 3* on ülemises reas kujutatud sellises olekus, kus vool läbib nende vasakuid pooli (viirutatud), ei läbi aga paremaid pooli. Niisugust olekut loetakse nullolekuks ja trigeritesse salvestatud arv on 000. Trigeri *№ 1* sisendisse tuleb seeria võrdse vahega impulsse.

Esimene neist sunnib trigeri viskuma vastupidisesse olekusse (1), mis on näidatud noolega → vasakult paremale teises reas joonisel 16-20. Loendurisse on salvestatud arv 001. Teine impulss sunnib trigerit *№ 1* uuesti ümber viskuma, seekord «paremalt vasakule», nii et juh-



Joon. 16-20. Kahendloenduri töötamispõhimõte.

tivaks muutub vasak pool (0). Selle ümberviskumise ajal annab triger oma väljundist impulsi trigerile 2, mis viskub «vasakult paremale». Seega on salvestatud arv 010. Kolmanda impulsi jõudmisel trigeri *№ 1* sisendisse toimub veel ühe ühe salvestamine — saame 011; neljanda impulsi puhul lisandub veel üks üks, aga et ümberviskumine toimub «paremalt vasakule», siis toimub impulsi ülekanne trigerisse *№ 2*. Viimane ümberviskumine toimub samuti «paremalt vasakule», järelikult antakse trigerist *№ 2* impulss trigerile *№ 3*. Loendurisse on siis salvestatud 100 jne. Kaheksas impulss viib loenduri uuesti nulli. Seega salvestab kolmekohaline kahendloendur kümnendsüsteemi arve 0-st kuni 7-ni.

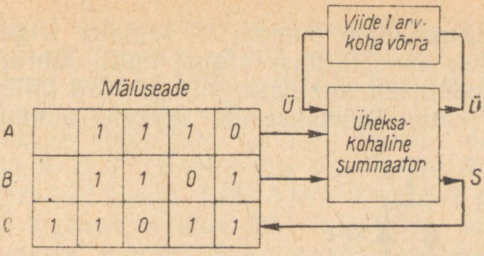
16-12. Aritmeetikaseadme summaatori töötamispõhimõte

Oletame, et meil tuleb liita kaks kahendarvu $A = 1110$ ja $B = 1101$. Liitmine toimub järjestikku koht-koha haaval nagu tavaliste arvutuste puhul:

$$\begin{array}{l} U = 11 \\ A = 01110 \\ B = 01101 \\ \hline S = 11011 \end{array}$$

Esimese arvkoha arvude liitmisel $(0 + 1)$ saame summaks 1; ka teise arvkoha arvude liitmise $(1 + 0)$ tulemus on 1. Kolmanda koha arvude liitmisel $(1 + 1)$ saame tulemuseks kaks. Seega kanname kahe kui ühe neljandale arvkohale ehk, nagu tavaliselt väljendatakse, jätame ühe meelde. Selle ühe paigutame ülekande U ritta arvu A kohale. Neljandate arvkohtade liitmisel saame kolm; pool kahest ehk üks läheb summasse S, ülekande 1 läheb aga viiendate arvkohtade summasse, kus $S = U + A + B = 1 + 0 + 0 = 1$.

Summeerimisseadmel ehk s u m m a a t o r i l peab järjestikuse summeerimise korral, mille kohta tõime näite, olema kaks sisendit arvude A ja B jaoks, sisend ülekande U jaoks ja väljundid summa S ning ülekande U jaoks. Sellise seadme blokkskeem, mis koosneb mälublokist, ühekohalisest summaatorist ja seadmest, mis tagab hilistu-



Joon. 16-21. Summaatori töö blokkskeem.

mise ühe arvkoha võrra (ülekande jaoks), on näidatud joonisel 16-21.

Summaatori lülitusskeem (joon. 16-22) koostatakse paragrahvis 16-10 vaadeldud loogikaelementidest: *«NING»*-, *«VÕI»*- ja *«EI»*-lülidest. Lihtsuse mõttes on joonisel 16-22 näitamata jäetud kõik impulsside formeerimise, maandus- ja võimendusseadised. Järgnevalt sellest, mida tuleb skeemi analüüsimisel silmas pidada.

Et kõik *«NING»*-lülid, välja arvatud *NING 1*, on ühendatud energiaallika E_a positiivse klemmiga, kulgeb vool läbi nende takistite r ja signaaliallikate. Allikate negatiivsed klemmid on maandatud. Antud lülituses pole anoodide potentsiaal kõrge, sest tunduv osa pingest langeb takistitele r. Kõrge potentsiaaliga impulsid ilmuvad anoodidele vaid neil hetkedel, kui kõigile katoodidele ilmuvad positiivsed pingeimpulsid, mis suudavad ventiile sulgeda. Ainult sel juhul annavad *«NING»*-lülid edasi positiivseid impulsse.

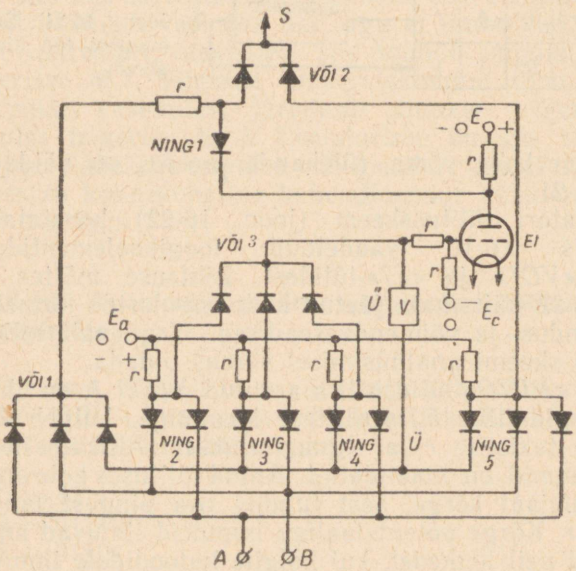
Positiivne impulss läbib *«VÕI»*-lüli ka siis, kui ta on antud ainult ühe ventiili anoodile.

«EI»-lüli on suletud negatiivse potentsiaaliga lambi võrel. Seejuures on lambi anoodi potentsiaal kõrge, sest vool ei läbi anoodtakistit r. Selle potentsiaaliga on ventiil *NING 1* tavaliselt lukustatud ja ainult sel juhul saab positiivne impulss kulgeda läbi takisti r väljundile S.

Positiivse pingeimpulsi ilmumisel lambi võrele hakkab lamp juhtima, tema anoodi potentsiaal langeb ja ventiil *NING 1* avaneb. Sel juhul on ventiili *NING 1* anoodi potentsiaal impulsi saamisel lülist *VÕI 1* madalam, sest vool läbib *«EI»*-lüli lampi. Ka väljundi S potentsiaal on sel juhul madal.

Nüüd võime vaadelda kahe varem esitatud arvu liit-

mise protsessi. Mäluseadme summa S registri trigerid (joon. 16-21) viiakse enne liitmise algust nulli. Juhtimisseade saadab perioodiliselt impulsse, mis juhivad lülituse tööd. Iga perioodi vältel liidetakse ühe arvkoha numbrid.



Joon. 16-22. Summaatori lülitusskeem.

Esimese impulsi ajal valitakse mäluseadmest (joon. 16-21) kõige noorema arvkoha numbrid $A = 0$ ja $B = 1$. Teiste sõnadega, summaatori (joon. 16-22) sisendisse B tuleb positiivse potentsiaaliga impulss, sisendis A aga impulss puudub. Sel juhul läbib impulss lüli *VÕI 1*, lüli *NING 1* takistit r, lüli *VÕI 2* ja jõuab väljundisse S ning mäluseadme summa registri S esimese arvkoha triger viskub ümber asendisse *1*.

Teise impulsiga valitakse mäluseadmest numbrid $A = 1$ ja $B = 0$. Impulss jõuab sisendist (joon. 16-22) lülisse *VÕI 1*, läbib lülid *NING 1*, *VÕI 2* ja jõuab väljundisse S. Mäluseadme teise arvkoha triger viskub asendisse *1* (joon. 16-21).

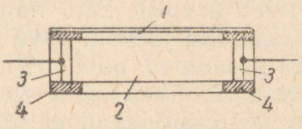
Kolmas impulss valib mäluseadmest numbrid $A = 1$ ja

$B = 1$ ning summaatori sisenditele *A* ja *B* ilmuvad positiivsed impulsid. Nüüd sulgub lüli *NING 2*, andes positiivse impulsi lülisse *VÕI 3*. Impulss kulgeb läbi viitelüli *V* ja jõuab ka *«EI»*-lüli lambi võrele. Lamp avaneb ja hakkab voolu juhtima. Lüli *NING 1* diood avaneb, impulsid *A* ja *B* läbivad lüli *VÕI 1*, lüli *NING 1* ja lõpuks ka *«EI»*-lüli lampi. Lüli *NING 1* anoodi potentsiaal on madal ja signaal ei jõua läbi lüli *VÕI 2* väljundisse *S*. Mäluseadme registri *S* kolmanda arvkoha triger jääb asendisse 0.

Pingeimpulssi hoitakse viiteliinis kuni neljanda arvkoha numbrite summeerimise hetkeni. See on sama, kui inimene liitmisel n.-ö. «jätab ühe meelde». Viiteliini (*V*) ehitusest tuleb juttu hiljem.

Neljandal liitmise taktil kaks impulssi *A* ja *B* ning impulss *Ü*, mis väljub viiteliinist, sulevad lülid *NING 2*, *NING 3*, *NING 4*, mis annavad läbi lüli *VÕI 3* teise impulsi viitelülisse ja *«EI»*-lülisse. Sel juhul, nagu juba selgitasime, lülid *VÕI 1* ja *NING 1* väljundisse *S* impulssi ei anna. Et lüli *NING 5* on sisendite *A* ja *B* kõrge potentsiaaliga ja viitelüli esimese impulsiga *Ü* suletud, tõuseb tema anoodide potentsiaal kõrgeks ning pingeimpulss läbib lüli *VÕI 2*, läheb väljundisse ja sealt edasi mäluseadmesse. Toimub neljanda arvkoha trigeri ümberviskumine seisundisse 1.

Viiendal taktil impulsid *A* ja *B* puuduvad, kuid eelmiste arvkohtade summeerimisel tekkinud ülekandeimpulss antakse viiteliinist läbi lülide *VÕI 1*, *NING 1* ja *VÕI 2* väljundisse *S* ning edasi summaatori viiendale arvkohale. Vastav triger salvestab 1. Seega on toimunud arvude liitmine $1110 + 1101 = 11011$ ehk kümnendsüsteemis $14 + 13 = 27$.



Joon. 16-23. Akustilise viiteliini ehitus.

Joonisel 16-23 on näidatud üks viiteliini võimalikest konstruktsioonidest. See töötab akustilisel põhimõttel. Elavhõbedaga *2* täidetud terastorusse *1* on kummirõngaste *4* abil paigutatud kaks kvartsplaati *3*. Kvartsil on omadus

muuta elektriväljas oma mõõtmeid (vastavalt välja muutumisele). Kui ühe plaadi sisendile anda pingeimpulss, siis see põhjustab kvartsi ja torus oleva elavhõbeda võnkumisi, mis antakse teatud kindla kiirusega edasi teisele kvartsplaadile väljundis. Kvarts on võimeline neid mehhaanilisi võnkumisi väljundis elektrilisteks võnkumisteks muundama. Mehhaaniliste võnkumiste levimise kiirus elavhõbedas on palju väiksem elektriimpulsside levimiskiirusest ja seepärast antakse elektriimpulss väljundist edasi hilinemisega. Viide on tavaliselt mikrosekundites. Toru pikkust muutes on võimalik viite suurust muuta.

16-13. Mäluseadmed

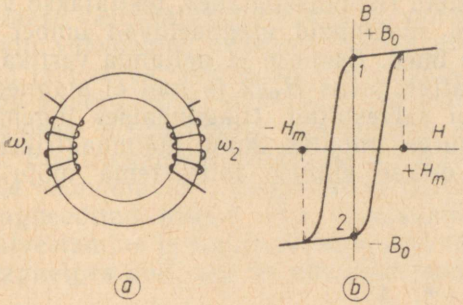
Inimesel tuleb mälu kasutada kõige tavalisemate arvutuste juures. Mõningaid andmeid peab ta meeles pidama lühikese aja vältel, näiteks tuleb liitmisel meeles pidada, et ülekande üks tuleb liita järgmise arvkoha numbritega, lahutamisel aga seda, et vanemalt arvkohalt on laenatud üks. Inimene peab alati teadma korrutamistabelit ja seda kiiresti meenutada suutma, kuid ta ei pea teadma nurkade siinuste ja koosinuste väärtusi, arvude logaritme jms. Need andmed on tal teistes mäluseadmetes — käsiraamatutes, tabelites jne.

Numberarvutusseadme mäluseadmetega (mäluga) me juba puutusime kokku — trigeritest register, elavhõbedaga viiteliin. Trigeritest mäluseade suure hulga paljukohaliste arvude hoidmiseks oleks aga väga kogukas.

Kõik numberarvutusseadme mäluseadmed jaotatakse kahte põhilisse rühma: *operatiivmäluseadmed* ja *välismäluseadmed*. Operatiivmäluseadmed on vahetult seotud artimeetikaseadmega ja nad määravad arvutusseadme töökiiruse. Neil on suhteliselt väike maht (sajad, tuhanded, kümned tuhanded arvud), kuid nad on võimelised väga kiiresti, mikrosekundite jooksul arve salvestama ja väljastama. Välismäluseadmed pole aritmeetikaseadmega otseselt seotud. Nad on ühendatud operatiivmäluga ja on selle reserviks. Nad suudavad säilitada sadu tuhandeid, miljoneid ja isegi miljardeid numbreid, kuid nende salvestamine ja väljastamine toimub rühmade kaupa. Arvude valimise aeg on pikk — kümneid millisekundeid.

Operatiivmäluseade võib olla valmistatud ferriidist

toroidsüdamikest. Joonisel 16-24, *a* on kujutatud ferriitrõngas läbimõõduga 1,4 kuni 10 mm, millel on kaks mähist, joonisel 16-24, *b* aga selle rõnga magneetimiskõver. Tavaliselt loetakse positiivset vootiheduse väärtust $+B_0$ ühe koodiks ja negatiivset väärtust $-B_0$ nulli koodiks.



Joon. 16-24. Mäluseadme ferriitelemendi töötamispõhimõte.

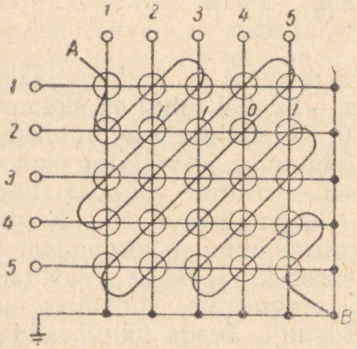
Puudugu mähistes w_1 ja w_2 vool ja vastaku jääkvoo tihedus punktile *2*, s. t. olgu $-B_0$. Sel juhul on südamikku salvestatud kahendnumber 0. Kui mähisele w_1 antakse niisuguse suurusega positiivne impulss, et väljatugevus saab hetkeks suuremaks kui $+H_m$, osutub jääkvoo tihedus pärast impulssi võrdseks $+B_0$-ga. Seega on salvestatud kahendnumber 1. Samamärgilise impulsi kordumisel jääb jääkvoo tihedus endiselt võrdseks $+B_0$-ga. Vastupidise märgiga impulsi andmisel magneetub südamik uuesti ümber ja siis on salvestatud null. Seega käitub südamik nagu triger ja südamike komplekti kasutades võib salvestada ja lugeda kahendsüsteemi numberid kiiremini kui 10 μs-ga.

Ümbermagneetimisel tekivad sekundaarmähises w_2 emj. impulsid. Kui primaarmähist läbiv impulss on eelmise impulsiga samamärgiline, siis elektromotoorjõudu praktiliselt ei teki.

Sadadest tuhandetest sellistest ferriitrõngastest koostatakse joonisel 16-25 tinglikult kujutatud m ä l u m a a t r i k s. Mähiseid asendavad sel juhul juhtmed, mis läbivad rõngaid nii, nagu on näidatud joonisel 16-26. Horisontaalsed ja vertikaalsed juhtmed on mõeldud numbrite koodide salvestamiseks, diagonaalsuunas kulgevad juhtmed aga lugemiseks. Iga horisontaalrida kasutatakse ühe kahendarvu salvestamiseks, vertikaalridade arv aga vastab arv-

kohtade arvule kahendarvus. Kõigi toroidide algolek vastab nullile.

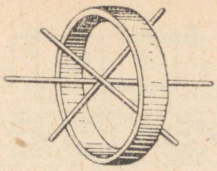
Oletame, et meil on vaja (joon. 16-25) teise ritta kirjutada arv 1101. Teise horisontaal- ja teise, kolmandasse ning viiendasse vertikaalritta antakse siis vooluimpulsid, mis tekitavad väljatugevuse $+H_m/2$. Toroidides, mis asuvad nimetatud juhtmete ristumiskohtades, tekitatakse väljatugevus H_m. Need südamikud magneetuvad ümber ja neisse salvestatakse ühed. Esimese ja neljanda vertikaalrea toroidides on väljatugevus $H_m/2$ ja nad ei magneetu ümber. Arv 1101 on salvestatud. Diagonaalses lugemisjuhtmes tekib seejuures impulss, kuid mälumaatriksiga seotud välisahelate erilise ehituse tõttu tema mõju ei arvestata.



Joon. 16-25. Mäluseadme ferriitmaatriks.

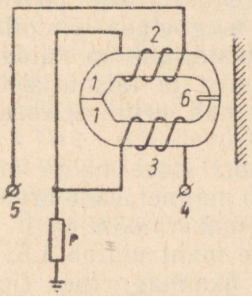
Teistesse maatriksi horisontaalridadesse salvestatud arvud jäävad muutumatuteks, sest arvu 1101 salvestamisel juhtmetes kulgenud voolud ei tekitanud südamikes väljatugevusi üle $+H_m/2$. Arvu lugemisel antakse vastavasse horisontaaljuhtmesse ja diagonaaljuhtmetesse vastupidise pingega impulsid. Sel ajal toroididesse salvestatud ühed nagu kustutatakse ära. Loetud arv aga peab maatriksis säilima. Selleks on ette nähtud seade, mis pärast lugemist taastab maatriksis ühed. Mälumaatriksisse saab salvestada 100 000 ja enam kahendmärki ja ta säilitab neid kuitahes kaua.

Numberarvutusseadmetes on laialt levinud *magnetilise salvestusega mäluseadmed*. Neid kasu-



Joon. 16-26. Ferriitmaatriksi üks südamik.

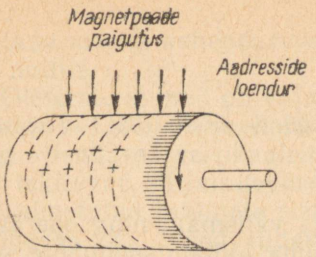
tatakse välismäluseadmetena ja välismälu ning operatiivmälu vahepealse astmena. Nende töötamispõhimõte seisneb järgnevas: suure jääkvoo tihedusega magnetmaterjaliga kaetud liikuv pind (lint või trummel) möödub spetsiaalsest magnetpeast, mis kujutab endast elektromagnetit. Elektromagneti mähisesse antakse vastavalt arvu koodile vooluimpulsid, magnetmaterjalist pinnale jäävad aga magneeditud lõigud, mis kujutavadki salvestatud arve. Salvestamine ja lugemine toimuvad tavaliselt ühe ja sama magnetpea abil, mis on näidatud joonisel 16-27.



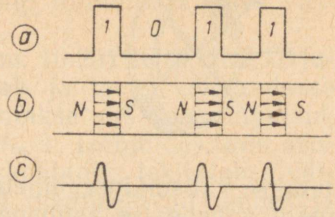
Joon. 16-27. Magnetilise salvestusega mäluseadme lugev ja salvestav magnetpea.

Vaikese jääkvoo tihedusega ferromagnetilisest lehtmaterjalist magnetjuhtmele *1* on keritud kaks mähist *2* ja *3*. Ühe salvestamine toimub impulsi andmisel klemmile *4*, nulli salvestamine aga impulsi andmisel klemmile *5*. Lugemine toimub klemmilt *4*. Magnetjuhtme pooluste vahelise õhupilu *6* kujundab õhuke messingleht paksusega ligikaudu 0,02 mm. Magnetpeade arv peab vastama salvestatava arvu kohtade arvule, nagu on näidatud joonisel 16-28 (salvestamine magnettrumlile).

Alumiiniumist trummel on kaetud õhukese magnetmaterjali kihiga, magnetpead aga on paigutatud vahetult silindri pinna kohale piki selle moodustajat (nooltega märgitud kohtadesse). Magnetpeade arv trumli moodus-



Joon. 16-28. Salvestamine magnettrumlile.



Joon. 16-29. Dipoolide tekkimine arvu magnetilisel salvestamisel.

taja ühe sentimeetri kohta on 5 ... 8. Piki moodustajat salvestatakse ka arv. Näiteks kahendarvu 1011 salvestamisel antakse magnetpeadesse joonisel 16-29, *a* kujutatud impulsid. Trumli pinnale tekivad magneeditud piirkonnad — d i p o o l i d (joon. 16-29, *b*). Lugemisel, kui pöörleva trumli magneeditud osa möödub magnetpea õhupilust, saadakse lugemismähises emj. impulsid, mis on näidatud joonisel 16-29, *c*. Pärast võimendamist ja täisnurkseteks impulssideks muundamist jõuavad nad aritmeetikaseadmesse.

Salvestamisel tekivad piki silindri ümbermõõtu nagu numbritest rajad, millede arv võrdub magnetpeade arvuga. Dipoolide salvestamise tihedus piki ümbermõõtu on 1 ... 3 dipooli 1 mm kohta. Magnettrumlite maht ulatub 1,5 ... 2 miljoni kahendmärgini. Üks rada ja üks magnetpea (joon. 16-28) on mõeldud salvestatud arvude pesade aadresside loendamiseks. Magnetpea on ühendatud spetsiaalse pesade loenduriga. Trummel pöörleb pidevalt ja arve saab valida ainult järjekorras. Elektrimootori poolt käitatava trumli pöörlemiskiiruse $n = 6000 \ldots 12\,000$ p/min juures kulub vajaliku pesa leidmiseks mõni sajandik sekundit.

Täpselt samuti toimub salvestamine liikuvale magnetlindile, mis kujutab endast elastset alust talle kantud ferromagnetilise pulbriga segatud laki kihiga. Magnetpead paigutatakse lindi kohale laiuti, salvestusrajad kulgevad aga piki linti. Lugemise kiirust piirab lindi lubatav ümberkerimise (ümberpaigutamise) kiirus. Magnetlinte kasutatakse kui täiendavaid aeglaselt töötavaid mäluseadmeid, millede maht on praktiliselt piiramatu.

16-14. Sisend- ja väljundseadmed

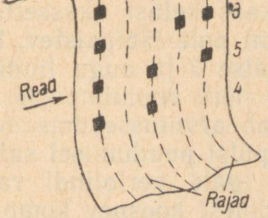
Masina tööprogrammi koostab programmeerija algul paberil numbrilisel kujul. Sellisena ei saa aga numberarvutusseade seda vastu võtta ja täitma hakata. Programmis numbrite kujul esitatud informatsioon tuleb teisendada arvutile töötlemiseks sobivale kujule. Seda teevad spetsiaalsed masinad, mis ei kuulu arvutusseadme komplekti.

Selleks asendatakse programmi numbrid spetsiaalsetesse kartongist kaartidesse või paberlintidesse löödud aukudega. Kaartidel ja lintidel on standardmõõtmed; linte säilitatakse rullidena.

Et numberarvutusseade töötab kahendsüsteemis, siis näib, et löödud auku võiks lugeda üheks, tema puudumist aga nulliks. Programm kirjutatakse aga kümnendsüsteemis ja arvutusseadmesse viidavate algandmete hulk võib ulatuda mitme tuhandeni, järelikult oleks vaja kümnendarvud viia kahendsüsteemi ja seejärel perforeerida suur hulk paljukohalisi kahendarve, mis pole aga sugugi otstarbekas.

Sel põhjusel teisendabki spetsiaalne masin, *perforaator*, kümnendsüsteemis arvud *kahend-kümnendsüsteemi* ja perforeerib augud vastavalt sellele süsteemile.

Teisendamine seisneb selles, et igat kümnendsüsteemi

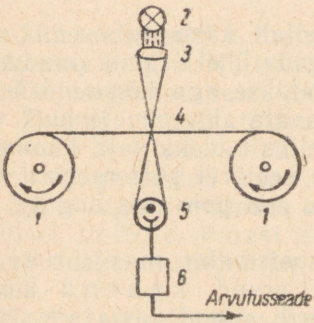


Joon. 16-30. Kümnendarvu perforeerimine kahend-kümnendsüsteemis.

numbrit võib esitada nelja kahendsüsteemi numbriga (*tetraadiga*):

0 = 0000; 1 = 0001; 2 = 0010; 3 = 0011; 4 = 0100;
5 = 0101; 6 = 0110; 7 = 0111; 8 = 1000; 9 = 1001.

Sel juhul võib, kui lüüa ühe märkimiseks kaardisse või linti auk ja jätta nulli märkimiseks see löömata, mugavalt üles märkida mistahes arvu. Joonisel 16-30 on näidatud kahend-kümnendsüsteemis lindile «kirjutatud» kümnendarv 1354. Neljale rajale, paremalt vasakule lugedes, lööb perforaator neli rida, mis vastavad arvude 1, 3, 5 ja 4 tetraadidele. Vasakule viiendale rajale lüüakse alati augud, et tühja raja tõttu ei tekiks nulli tähist. Seega teeb perforaator esimese osa tööst informatsiooni masinasse viimiseks — teisendab arvud kahend-kümnendkoodi ja perforeerib nad.



Joon. 16-31. Numberarvutusseadme sisendseadme ehitus.

Järgnevalt jõuab perfolint, mis kujutab endast omamoodi mäluseadet, numberarvutusseadmesse, kus aukudele vastavatele numbritele seatakse vastavusse elektrilised impulsid. Sisendseade on lihtsustatult kujutatud joonisel 16-31. Lindiveomehhanismil on kaks ketast (kassetti) *1* ja linti keritakse ühelt teisele. Lint pole läbipaistev, kuid kui valgus lambist *2*, läbinud läätse *3* ja augu lindis *4*, satub fotoelemendile *5*, siis tekib nõrk vooluimpulss. See impulss läbib võimendi *6* ja jõuab arvutusseadme mälublokki, kus salvestatakse üks. Impulsi puudumisel salvestatakse null. Loomulikult vastab igale perfolindi rajale oma valgustus- ja võimendusseadmest koosnev komplekt.

Kuid, kui teostada salvestamist vastavalt lindil olevatele tetraadidele (joon. 16-30), saame arvu 0001 0011 0101 0100, see aga pole arv 1354 kahendsüsteemis. Sellepärast teostab numberarvutusseade spetsiaalse programmi alusel teise osa tööst — viib arvud kahend-kümnendsüsteemist

kahendsüsteemi ning alles siis salvestab nad mäluseadmesse.

Nii nagu tuleb kümnendsüsteemis arvu 1354 saamiseks leida summa $1 \cdot 10^3 + 3 \cdot 10^2 + 5 \cdot 10^1 + 4 \cdot 10^0$, nii korrutab ka numberarvutusseade, võttes vastu ühe tetraadi teise järel, nad arvkoha kordajaga, summeerib tulemused ja saab arvu 1354 juba kahendsüsteemis:

$$0001 \cdot 1010^3 + 0011 \cdot 1010^2 + 0101 \cdot 1010^1 + 0100 \cdot 1010^0 =$$

1111101000	1000
100101100	300
110010	50
100	4
$(10101001010)_2$	$(1354)_{10}$

See arv salvestataksegi mäluseadmesse.

Edasi töötab numberarvutusseade automaatselt programmi alusel vastavalt juhtimisseadmest saadetavatele impulssidele.

Tulemuste väljastamine toimub analoogiliselt lähteandmete sisseviimisele. Mäluseadmest antakse väljundperforaatorile tulemustele vastavad impulsid, mis salvestatakse kahend-kümnendkoodis arvudena perfokaartidele või perfolintidele. Salvestada võib ka magnetlindile. Väljundi salvestusseade kuulub samuti arvutusseadme välismäluseadmete hulka. Peale lintidele salvestamise kasutatakse ka elektromehhaanilisi trükiseadmeid ja spetsiaalseid fototrükiseadmeid, mis trükivad välja kuni 200 arvu sekundis.

Kõigi sisend- ja väljundsüsteemide põhiliseks puuduseks on nende väike töökiirus, mis ei vasta numberarvutusseadme töökiirusele.

17. ELEKTROTEHNOLOOGIA

17-1. Üldisi andmeid

Elektrotehnoloogiaks nimetatakse tehnikaharu, mis tegeleb elektrienergia vahetu kasutamisega materjalide töötlemisel. Uute materjalide kasutuselevõtmisel tekkis raskusi nende töötlemisega olemasolevate meetodite abil. Elektrotehnoloogia on paljudel juhtudel teistest kaasaegsetest materjalide füüsikalise ja keemilise töötlemise meetoditest efektiivsem.

Elektrotehnoloogias on ammutuntud galvanotehnika, elektersulatuse ja -keevituse kõrval ilmunud uued elektrilised töötlemismeetodid. Materjali purustamine ja eemaldamine või ümberpaigutamine, toote kuju muutmine jms. toimub vahetult töötlemispiirkonda juhitud elektrienergia abil. Neid meetodeid võib jaotada elektrokeemilisteks, elektrotermilisteks ja elektromehhaanilisteks. Esimesel juhul kasutatakse peamiselt elektrivoolu keemilist toimet, teisel juhul soojuslikku toimet, kolmandal juhul aga elektrivälja ja elektrilahenduse mehhaanilist toimet.

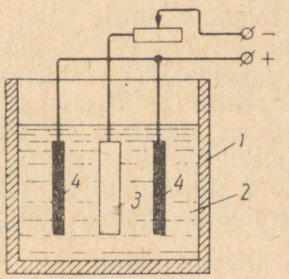
Paljud nende uute meetodite iseärasustest on tänapäeval eriti väärtuslikud: töödeldavate materjalide mehhaanilised omadused (näiteks kõvadus) ei mõjuta töötlemise kiirust ja kvaliteeti, töötlemiseks kasutatavad instrumendid võivad olla pehmemast materjalist kui töödeldav detail. Nende meetodite abil on teostatavad tehnoloogilised operatsioonid, mis on tavaliste mehhaaniliste meetodite abil realiseerimatud. Kõik see seab elektrotehnoloogia materjalide eesrindlikumate töötlemisviiside hulka.

Järgnevalt antakse lühidalt materjalide elektrokeemilise, elektrotermilise ja elektromehhaanilise töötlemise üksikute operatsioonide kirjeldus.

17-2. Elektrokeemilised meetodid

a) Galvanotehnika

Galvanotehnikaks nimetatakse meetodit metallide sadestamiseks metallilistele või mittemetallilistele pindadele elektrolüüsi teel. Elektrokeemilist protsessi metallide katmiseks õhukese metallikihiga (-kilega), mis on mõeldud kaitseks mehhaaniliste vigastuste või korrosiooni eest, nimetatakse galvanosteegiaks. Šabloonide, trükiklišeede, heliplaatide matriitside jms. valmistamist metallide elektrokeemilise sadestamise meetodil nimetatakse galvanoplastikaks. Sadestada saab nii metallist kui ka mittemetallist alustele, kusjuures viimasel juhul kaetakse alus eelnevalt elektrit juhtiva kihiga (grafiit, foolium). Galvaaniliste katete paksus ei ületa tavaliselt mõnda kümnendikmillimeetrit. Kõiki neid meetodeid tunti ja kasutati väga ammu.



Joon. 17-1. Galvanosteegilise vanni skeem.

Joonisel 17-1 on kujutatud galvanosteegilise vanni skeem. Vann *1* on täidetud spetsiaalse happe või aluse lahusega *2*, mille temperatuuri hoitakse konstantsena.

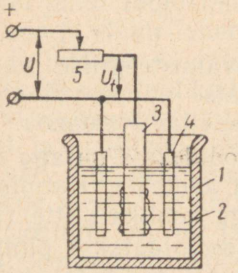
Kaetav toode *3* on katoodiks, anoodideks *4* on aga sellest metallist plaadid, millega toodet kaetakse. Katmisele mineva toote pind valmistatakse väga hoolikalt ette (lihvitakse, puhastatakse keemiliselt ja eemaldatakse pinnalt rasvad). Erinevate metallidega katmisel kasutatakse erinevaid lahuste koostisi, temperatuurirežiime ja voolutihedusi. Elektroodidevaheline pinge on 4 ... 12 V, voolud vannides ulatuvad aga 1 000 ... 15 000 amprini.

b) Metallide elektrokeemiline oksüdeerimine

Oksüdeerimiseks nimetatakse metalli pinnal õhukeste kilede tekitamist, mis kaitseksid metalli korrosiooni eest. Protsess kulgeb vastavates lahustes, oksüdeeritav ese on anoodiks. Elektrokeemilisele oksüdeerimisele kuuluvad alumiiniumlint, alumiiniumtraat jt. tooted. Alumiiniumi pinnal moodustub seejuures tihe oksiidikiht paksusega 0,01 ... 0,1 μm, mille peal tekib poorne oksiidikile paksusega kuni 200 μm. Sel kilel on head korrosioonivastased ja isolatsiooniomadused, mis on väga tähtis kondensaatorite, alaldite jms. tootmisel. Vannide tööks kasutatakse vooluallikaid pingega 12 ... 30 V.

c) Metallide puhastamine elektrokeemilise anoodsöövituse teel ja rasvainete eemaldamine

Joonisel 17-2 on kujutatud vann *1*, mis on täidetud hapete või soolade elektrolüüdiga, mille temperatuur on töö ajal 15 ... 35 °C. Puhastatav toode *3*, mille pind on kaetud oksiidikilega, roostega, tagiga, rasvaste ainetega (määrded, pastad, õlid) vms., sukeldatakse lahusesse. Toode ühendatakse energiaallika positiivse klemmiga ja ta on anoodiks. Ta võib olla mistahes metallist või sulamist ja mistahes kujuga. Katoodideks on pliist, grafiidist või happekindlast terasest plaadid *4*, mille pind valitakse vastavalt toote *3* kujule. Elektroodidevaheline kaugus (anood-katood) on 20 ... 250 mm.



Joon. 17-2. Metallide puhastamine elektrokeemilise anoodsöövituse teel.

Vool alalisvooluallikast pingega $U = 4 \ldots 12$ V kulgeb esmalt läbi reguleerimistakisti *5*. Elektroodidevaheline tööpinge reguleeritakse piirides $U_t = 3 \ldots 8$ V nii, et saa-

dakse elektroodide pindadel voolutihedus $\delta = 0{,}05 \ldots 0{,}02$ A/cm^2. Anoodi-toote pinnakiht lahustub ja koos metalliga eemaldatakse seda kattev saastakiht. Tootlikkus on pinnakihi eemaldamisel 0,1 ... 5 µm/min, töötlemise täpsus — 3.... 4. klass, pinnapuhtus aga 3.... 6. klass. Energia erikulu on 10 ... 40 kWh/kg. On toote pinnalt vaja eemaldada ainult rasvainet, kasutatakse happelist elektrolüüti.

d) Elektrokeemiline silumine ja poleerimine

Keemiliseks poleerimiseks paigutatakse puhtast värvilisest või mustmetallist toode joonisel 17-2 kujutatud vannile sarnasesse vanni. Katood valmistatakse pliist, legeeritud terasest, grafiidist või vasest. Katoodide paigutamisel hoolitsetakse eriti selle eest, et kogu anoodi-toote pinnal saadaks ühesugune voolutihedus. Värvilistest metallidest toodetel on see 0,1 ... 0,5 A/cm^2, mustmetallidel aga 0,4 ... 0,6 A/cm^2. Elektrolüüdina kasutatakse fosfor-, väävel- või kroomhappe lahust temperatuuriga 15 ... 25 °C värviliste metallide puhul ja temperatuuriga 70 ... 90 °C mustmetallide puhul. Alalisvooluallika pinge värviliste metallide korral $U = 6 \ldots 12$ V, mustmetallide puhul aga $U = 15 \ldots 18$ V. Elektroodidevahelised pinged võetakse vastavalt $U_t = 5 \ldots 7$ V ja $U_t = 12 \ldots 14$ V.

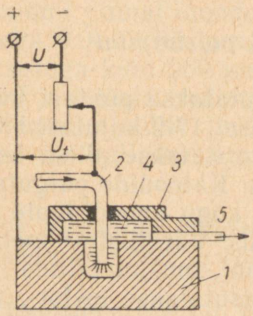
Metalli lahustumisel nimetatud tingimustes täituvad kõik toote konarliku pinna õnarused halvasti voolu juhtiva kilega, mis aga ei kata esileulatuvaid ebatasasusi. Viimased lahustuvad, pind silutakse ja ta saab väga hea läike. Nii saavutatav pinnapuhtus on 2 ... 3 klassi võrra esialgsest kõrgem.

e) Elektrokeemiline õõnsuste ja avade puurimine

Elektrokeemiline avade puurimine toimub eespool kirjeldatud protsesside abil mõnevõrra muudetud tehnoloogiaga. Eelkõige peab voolutihedus olema tublisti suurem — 100 ... 140 A/cm^2. Elektroodidevaheline kaugus, mis eelmiste protsesside puhul oli 20 ... 250 mm, on siin vaid 0,1 ... 2 millimeetrit. Puurimine toimub kiiresti voolavas elektrolüüdi, tavaliselt naatriumkloriidi joas temperatuuril $t = 20 \ldots 30$ °C. Nimetatud tingimused suurendavad järsult metalli lahustumist. Seda meetodit kasutatakse mustmetallide ja sulamite, samuti ka kõvasulamite puhul.

Joonisel 17-3 toodud skeem kujutab augu puurimist plaati *1*, mis on anoodiks.

Puuritakse messingist, vasest või terasest toru *2* abil, mida kasutatakse samal ajal ka elektrolüüdi juhtimiseks töödeldavale kohale. Puuritava ava kuju kopeerib täpselt toru ristlõiget ja võib olla mistahes kujuga. Tootes oleva



Joon. 17-3. Elektrokeemiline puurimine.

augu sügavus suureneb pidevalt koos toru-katoodi langetamisega. Töödeldavale kohale paigutatakse spetsiaalne vann *3*, milles protsess toimub. Elektrolüüdi ärajuhtimine toimub toru *5* kaudu.

Kasutatavad pinged $U = 15 \ldots 30$ V ja $U_t = 10 \ldots 25$ V, energiakulu on 8 ... 15 kWh/kg. Pinnapuhtus vastab 5. ... 8. klassile.

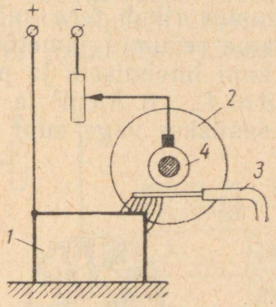
f) Anoodmehhaaniline lõikamine

Anoodmehhaaniline töötlemine kujutab endast elektrokeemiliste ja elektroerosioonmeetodite vahepealset menetlust. Töötlemispiirkonda suunatava väikese erivõimsuse korral on ta lähedasem elektrokeemilistele meetoditele, suure erivõimsuse korral aga elektroerosioonmeetoditele.

Anoodmehhaaniline lõikamine võib toimuda nii ketta (lõigatava materjali maksimaalne ristlõige 300 × 300 mm) kui ka teraslindi abil (mistahes suurusega ristlõige). Sellist lõikamist kasutatakse mustmetallide ja sulamite — süsiniksulamite, legeeritud metallide, kõva- ja spetsiaalsulamite puhul.

Joonisel 17-4 on kujutatud tooriku, s. o. anoodi *1* lõikamine pöörleva terasketta *2* abil, mille paksus on sõltuvalt

töötlemistingimustest 0,1 ... 6 mm ja ringkiirus 8 ... 30 m/s. Liugkontakti *4* abil on ketta võlliga ühendatud alalisvooluallika negatiivne klemm. Tööpinge $U_t = 18 \ldots 30$ V. Lõikamiskohale juhitakse vooliku *3* abil elektrolüüt — vesiklaas (naatriumsilikaatide vesilahus). Voolutihedus $\delta = 7{,}5 \ldots 30$ A/cm^2.



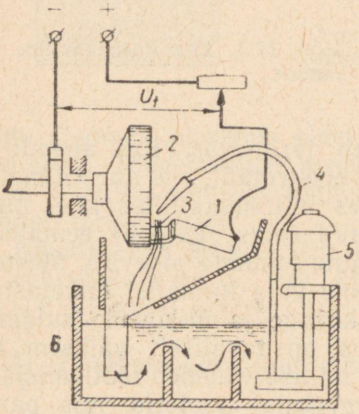
Joon. 17-4. Anoodmehhaaniline lõikamine.

Protsessi olemus seisneb järgnevas. Kui anoodi ja katoodi kokkupuutekohas on elektrolüüt, siis anoodi metall lahustub selles, moodustades mittemetallilise kile, mille kergelt vastu toorikut surutud ketas (katood) eemaldab. Seega võib metalli lahustumine toimuda pidevalt. Meetodi väärtus seisneb selles, et pole vaja hinnalist lõikeinstrumenti, mis on eriti tähtis kõvade ja ülikõvade sulamite lõikamisel. Lõikesoone laius on tavaliselt väiksem kui teiste meetodite puhul, tänu millele väheneb töötlemisjäätmete kogus. Väheneb energiakulu mootoris, mis paneb pöörlema ketast, sest viimase surve tootele on nõrk. Anoodmehhaanilise menetluse puuduseks on see, et pärast sellisel viisil töötlemist tuleb toodet puhastada (pesta) vesiklaasist.

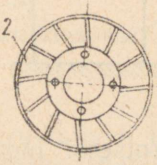
Samuti toimub ka tooriku jämetöötlemine («koorimine»). Anoodiks on sel juhul malm- või terassilinder (paks ketas). Voolutihedus võetakse maksimaalne ja tänu sellele saavutavad ülekaalu elektrotermilised protsessid. Töödeldava pinna lagundamine on kiire, töödeldud pind kare, konarlik.

g) Anoodmehhaaniline lõikeriistade teritamine

Anoodmehhaanilist meetodit kasutatakse kõvadest metallkeraamilistest sulamitest lõikeriistade teritamiseks, lõikeriistades kasutatavate kõvasulamist plaatidele vajaliku kuju andmiseks jne. Sel juhul pole vaja abrasiivmaterjale, sest teritamine toimub terasketta abil. Peale selle kuumeneb lõikeriist sel juhul teritamisel kasutatava väikese erisurve tõttu vähem ja kuumus rikub tera vähem. Voolutiheduse muutmise abil saame režiimid jämetöötlemisest, kus $\delta = 15 \ldots 25$ A/cm^2, kuni lihvimiseni ja plankimiseni, mille puhul vastavalt $\delta = 4 \ldots 6$ A/cm^2 ja $\delta = 1 \ldots 2$ A/cm^2. Viimasel juhul saadakse väga suur pinnapuhtus — 7. või 8. klass.



Joon. 17-5. Lõikeriista anoodmehhaaniline teritamine.

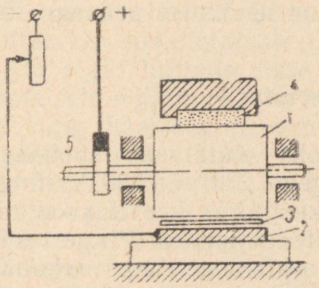


Joon. 17-6. Anoodmehhaaniliseks teritamiseks kasutatava ketta otspind.

Joonisel 17-5 on kujutatud teritamisseadme skeem. Elektroode läbib alalisvool tööpingel $U_t = 10 \ldots 22$ V, anoodiks on teritatav lõikeriist *1*, katoodiks ketas *2*, mis pöörleb ringkiirusega 12 ... 20 m/s. Ketta otspind on näidatud joonisel 17-6. Elektrolüüt (vesiklaas) suunatakse teritatavale kohale *3* pumba *5* ja vooliku *4* abil. Kasutatud elektrolüüt voolab paaki *6*, kus ta filtreeritakse ja suunatakse uuesti pumpa. Energia erikulu on 3 ... 15 kWh/kg.

h) Anoodmehhaaniline puhastöötlemine

Nagu eespool öeldud, saame puhastöötlemise «pehmete» tööreŽiimide kasutamisel, s. o. väikese voolutiheduse ja tootele mõjuva erisurve korral. Vahel, väga puhta töötlemise korral välditakse anoodi ja katoodi vahetut kokkupuutumist. Eriti kõrge pinnapuhtuse klass (peegelsile pind) saavutatakse metallkeraamiliste sulamite elektroabrasiivlihvimisel. Viimaste poleerimine tavaliste meetoditega on praktiliselt võimatu.



Joon. 17-7. Anoodmehhaaniline puhastöötlemine.

Joonisel 17-7 toodud skeem kujutab silindri pinna lõpplihvimist. Tööpingel $U_t = 4 \ldots 5$ V juhitakse alalisvool läbi harja ja kontaktrõnga *5* tootesse *1*, mis pöörleb ringkiirusega 0,5 ... 1,0 m/s, ning edasi läbi elektrolüüdi *3* terasest või malmist katoodi *2*. Katood anoodiga kokku ei puutu, nende vahel voolav elektrolüüt *3* kujutab endast soolade (NH_4NO_3, KNO_3, NaF jt.) vesilahust. Voolutihedus hoitakse 0,5 ... 1,2 A/cm² piirides. Vastu pöörleva silindri pinda liibub abrasiivtahk *4*, kusjuures erisurve on 0,05 ... 0,5 MN/m² (ca 0,5 ... 5 kG/cm²).

Sellist lihvimist kasutatakse mitmesuguste mustmetalli sulamite ja kõvasulamite töötlemisel, kusjuures saavutatakse esimene täpsusklass ja 10. ... 12. pinnapuhtuse klass.

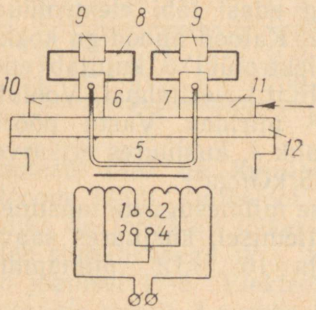
17-3. Elektrotermilised meetodid

a) Metallide elekterkeevitus

K e e v i t a m i s e k s nimetatakse metalldetailide lahutamatuks tervikuks liitmise viisi keevitatavate kohtade kuumendamise teel. Neid kohti kuumendatakse kuni plastilise või vedela oleku saavutamiseni. Tänapäeval kasutatavad keevitusmeetodid võimaldavad tugevalt ühendada metalldetaile paksusega 0,1 kuni 250 mm. Keeviskonstruktsioonid on needitutest 10 ... 15% ja valatutest 30 ... 40% kergemad. Keevitamine on neetimise peaaegu täiesti välja tõrjunud.

b) Põkk-, punkt- ja joonkeevitus

Nende keevitusviiside jaoks ehitatakse spetsiaalsed transformaatorid primaarpingega 220 või 380 V ning sekundaarpingega 1 ... 12 V, kusjuures keevitusvoolud on kümnetes ja sadades tuhandetes amprites. Pinge reguleerimiseks on primaarmähis sektsioneeritud, sekundaarmähis aga koosneb ühest-kahest suure ristlõikega vask- või alumiiniumkeerust, mida jahutatakse veega. Suhteline töötamiskestus on umbes 20 ... 30%.



Joon. 17-8. Põkk-keevitamine.

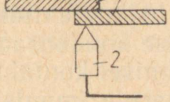
Joonisel 17-8 on toodud p õ k k - k e e v i t a m i s e k s mõeldud keevitusmasina skeem. Põkk-keevitust kasutatakse varraste, torude ja raudbetooni armatuuri liitmisel, tööriistatööstuses jne.

Trafo primaarmähise sektsioonide ümberühendamine

toimub lüliti *1, 2, 3, 4* abil. Sekundaarmähis *5* on ühendatud klemmidega *6* ja *7*. Ümberlüliti kontaktide *1* ja *2* ühendamisel on ülekandetegur maksimaalne, sekundaarmähise *5* pinge aga minimaalne. Kui on ühendatud kontaktid *3* ja *4*, siis on sekundaarmähise *5* pinge maksimaalne. Keevitatav toode *8* kinnitatakse vajaliku suurusega klemmide *9* vahele (klambritesse). Suport *10* on liikumatu, suport *11* aga võib erimehhanismi abil liikuda piki tööpingi juhtpindu *12*.

Keevitatavad detailid *8* surutakse teineteise vastu ja trafo lülitatakse võrku. Detailid kuumenevad ja vajaliku temperatuuri saavutamisel lülitatakse vool välja, detailid aga surutakse kokku. Seda nn. takistuskeevitust kasutatakse süsinikteraste ja värviliste metallide puhul.

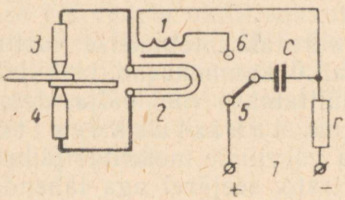
Kui algul lülitada sisse trafo, seejärel aga lähendada teineteisele detailid *8*, siis tekivad nende otste vahel sädemed ning kaarleek ja kontaktpinnad hakkavad sulama. Järgneb detailide kokkusurumine ja voolu väljalülitamine ning detailid keevituvadki kokku. Seda pideva sulatamisega keevitamist kasutatakse torude, kettide, rööbaste ja mitmesuguste tööriistade juures. Ühendada võib legeeritud teraseid ja ka erinevaid metalle: alumiinium-vask, teras-vask, teras-messing.



Joon. 17-9. Punktkeevitamine.

Joonisel 17-9 on toodud punktkeevitamise skeem. Keevitustrafo sekundaarmähisega ühendatud kontaktide *1* ja *2* vahele on vaheliti (teineteise peale) paigutatud keevitatavad detailid *3*. Punktkeevitust kasutatakse leht-, riba- ja profiilmetalli ühendamiseks üksikutes punktides (täismetallist vagunid, autode veokastid jms.). Saadakse vastupidav, kuid mitte hermeetiline ühendus. Keevitamiseks kasutatakse spetsiaalseid masinaid. Ülemist elektroodi *1* (joon. 17-9) saab nii tõsta kui ka langetada. Voolu sisselülitamisel kontakti koht kuumeneb tugevasti.

Survekontaktide keskkohal metall pehmeneb, muutub plastiliseks ja pärast voolu väljalülitamist ning detailide surve alt vabastamist on tekkinudki keeviskoht — läätsekujuline punkt. Ühepunktilised masinad keevitavad kuni 2000 punkti, mitmepunktilised aga kuni 10000 punkti tunnis. Masina suhteline töötamiskestus on 20 . . . 30%.

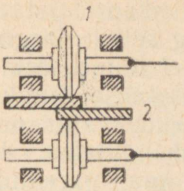


Joon. 17-10. Punktkeevitamiseks kasutatava kondensaator-keevitusmasina põhimõtteskeem.

Selliste toodete punktkeevitamiseks, mis on erinevatest metallidest: süsinikuvaesest ja roostevabaterasest, messingist ja pronksist, alumiiniumsulamitest, nikroomist, permalloist, fekraalist, manganiinist, konstantaanist jne., kasutatakse k o n d e n s a a t o r - k e e v i t u s m a s i n a i d. Neid kasutatakse aparaadiehituses, raadiotehnikas, vaakuumseadmete tööstuses, väga õhukeste toodete valmistamisel jne. Masina põhimõtteskeem on näidatud joonisel 17-10.

Trafo primaarmähis *1* töötab pingel 220 V ja sagedusel 50 Hz ning tal on 200 . . . 600 keerdu. Sekundaarmähis *2* koosneb 1 . . . 2 keerust ja on ühendatud töökontaktidega *3, 4*. Kui ümberlüliti on kontaktil *5*, laetakse kondensaatorit *C* alalispinge allikast *7*. Ümberlüliti viimisel kontaktile *6* antakse kondensaatorisse salvestatud energia impulsina trafo primaarmähisesse ning lõpptulemusena jõuab see keevitatavale kohale. Masin reguleerib automaatselt kondensaatori laadimisaega ja võimsust, mis on vajalik ühe punkti saamiseks. Keevitatavate metallide paksus on 0,02 kuni 0,5 mm, kuid õhukest metall-lehte on võimalik keevitada ka kuni 30 mm paksuse detaili külge. Masin tarbib võimsust umbes 100 W ja keevitab vahetuses kuni 3000 punkti. Keevitusrežiimi saab muuta kondensaatorite mahtuvuse, trafo primaarmähise sektsioonide arvu ja elektroodidele rakendatava surve muutmise teel.

J o o n - ehk r u l l k e e v i t u s e korral kujutavad elektroodid *1* (joon. 17-11) endast kettaid, mis on pneumaati-



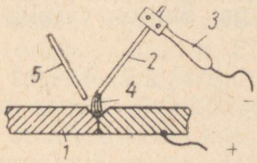
Joon. 17-11. Joonkeevitamine.

lise seadme abil surutud vastu nende vahelt läbi liikuvat materjali *2*. Töö ajal jahutatakse rulle pidevalt veega. Keevitamise kiirus on 0,5 ... 0,6 m/min ja suhteline töötamiskestus 50%. Masinaid kasutatakse paakide, torude ja teiste hermeetilisust nõudvate toodete keevitamiseks, kusjuures materjalideks on süsinikuvaene lehtteras paksusega kuni 2 mm ja roostevabast kroomnikkelterasest, messingist ning alumiiniumsulamitest lehtmaterjal paksusega kuni 1,5 mm.

K o n t a k t k e e v i t u s m a s i n a t e abil keevitatakse detaile paksusega 0,1 kuni 90 mm.

c) Elektrikaarkeevitus

E l e k t r i k a a r k e e v i t u s (joon. 17-12) on kõikidest keevitusviisidest levinuim. Esimesena tegi ettepaneku seda kasutada N. N. Benardos 1882. aastal. Elektrikaarkeevitamine toimub alalisvoolu abil. Toiteallika positiivne klemm ühendatakse keevitatava detailiga *1*, negatiivne aga s ü s i e l e k t r o o d i g a *2*, mis on kinnitatud elekt-

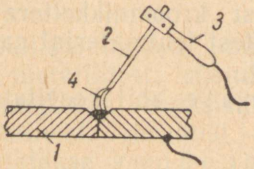


Joon. 17-12. Elektrikaarkeevitamine süsielektroodiga.

roodihoidjasse. Süsielektroode läbimõõduga 8 ... 30 mm ja pikkusega 200 ... 300 mm kasutatakse värviliste metallide sulamite keevitamiseks, kõvasulamite pealesulatamiseks, õhukeste materjalide keevitamiseks ja õhukeseseinaliste terasdetailide üleskeeratud servadega õmbluste kee-

vitamiseks lisametalli kasutamata. Elektrikaar tekitatakse elektroodi *2* ja toote *1* lühistamisel ning sellele järgneval eemaldamisel teineteisest. Elektrikaare *4* toimel detailide servad sulavad. Vajaduse korral sulatatakse õmblusele veel lisametalli *5*. Temperatuur on elektrikaares umbes 6 000 °C. Alalisvooluga keevitamisel ühendatakse detail alati plussklemmiga, sest siis «põleb» kaar paremini ja kaare positiivsel poolusel eraldub rohkem energiat. Keevitusgeneraatori kirjeldus on toodud paragrahvis 8-21.

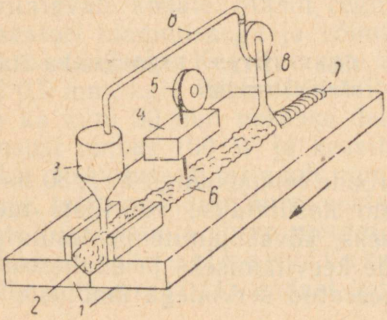
Keevitaja silmade ja näo kaitseks elektrikaare valguskiirguse ja metallipritsmete eest kasutatakse tumedate ultraviolett- ja infrapunaseid kiiri neelavate klaasidega kaitsekilpe ja -kiivreid.



Joon. 17-13. Elektrikaarkeevitamine metallelektroodiga.

Teise meetodi — metallelektroodiga keevitamise — esitas 1888. aastal N. G. Slavjanov. Selle meetodi puhul (joon. 17-13) sulavad üheaegselt põhimetall *1* ja elektrood *2*, mis on ühtlasi lisametalliks. Üle 90% elektrikaare abil tehtavatest keevitustöödest tehakse sel meetodil.

Metallelektroodid valmistatakse vardakujulised, läbimõõduga 1 ... 12 mm ja pikkusega kuni 500 mm. Keevitusautomaatide elektrood valmistatakse traadina, mis keritakse vihtidesse. Käsitsi keevitamisel kasutatavad elektroodid kaetakse spetsiaalse katteseguga. See on vajalik õhu

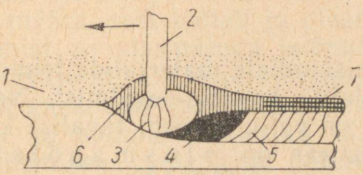


Joon. 17-14. Räbusti kihi all keevitava keevitusmasina töötamispõhimõte.

ioniseerimiseks elektrikaares, s. t. kaare stabiilse «põlemise» tagamiseks. Peale selle kaitseb kattesegu metalli oksüdeerumise ja õhu lämmastikuga küllastumise eest ning annab mitmesuguseid lisandeid, mis suurendavad keevisõmbluse tugevust.

Vahelduvvooluga keevitamisel kasutatakse eritransformaatoreid, mille kirjeldus on antud paragrahvis 9-14.

Automatiseerimisel elektrikaarkeevituse kvaliteet paraneb ja tootlikkus kasvab tunduvalt. Joonisel 17-14 on kujutatud r ä b u s t i k i h i a l l k e e v i t a m i s e k s mõeldud automaadi põhimõtteskeem. Kogu seadis on paigutatud nn. traktorile, mis liigub keevitatava detaili suhtes. Traktori liikumisel noolega näidatud suunas antakse ettevalmistatud detailide *1* ühenduskohale automaatselt punkrist *3* granuleeritud räbustit *2*. Poolilt *5* antakse etteandemehhanismi *4* abil keevituskohale paljast traati. Elektrikaar «põleb» keevituskohal *6* räbusti all ja tekib metalliga täidetud keevisõmblus. Räbusti ülejääk imetakse läbi toru *8* punkrisse tagasi.

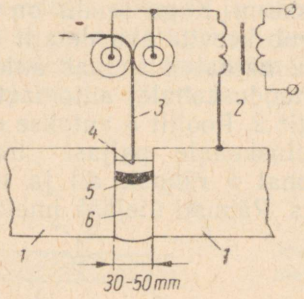


Joon. 17-15. Keevitamine räbusti kihi all.

Keevitusprotsess räbusti all on kujutatud joonisel 17-15. Tulevase keevisõmbluse kohale on puistatud räbusti *1*, mis kaitseb keevituskohta hapniku ja õhu lämmastiku eest ning annab legeerivaid lisandeid. Elektroodi *2* liikumiskiirus on 6 ... 32 m/h. Elektrikaare *3* poolt sulatatud metall *4* tahkub järk-järgult (*5*). Keevisõmblus on kogu aeg kaetud vedela šlakikihiga *6*, mis keevitamise lõppedes katab õmbluse tahke koorikuna *7*.

Suure paksusega detailide keevitamisel kasutatakse laialdaselt e l e k t e r - r ä b u k e e v i t u s t, mis töötati välja J. O. Patoni nimelises instituudis. Selle skeem on toodud joonisel 17-16. Keevitatavad detailid *1* paksusega kuni 400 mm (valtspinkide, suurte laevakerede ja kõrgrõhumahutite detailid) seatakse nii, et nende keevisõmbluse laius tuleks 30 ... 50 mm. Sellesse vahesse puista-

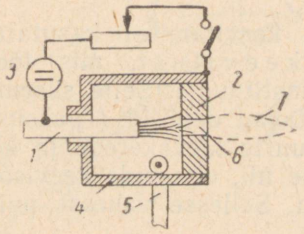
takse 50 ... 70 mm paksune räbustikiht. Trafost *2* saadava voolu juhtimisel läbi detailide ja automaatselt etteantava elektrooditraadi räbusti sulab ja moodustab vanni *4* temperatuuriga ligi 2 000 °C. Detailide *1* kokkukeevitatavad pinnad ja elektrooditraat sulavad, tekitades räbustikihi all metallvanni, mis põhjast järk-järgult jahtub, moodustades keevisõmbluse. Keevitamist teostab automaat, mis on paigutatud mööda detaili liikuvale traktorile.



Joon. 17-16. Elekter-räbukeevitamise põhimõtteskeem.

Raskestisulavate kulumiskindlate materjalide tehnoloogia nõudis uut tüüpi põletite kasutuselevõtmist. Nende põletite leegi temperatuur on palju kõrgem tavalise kaarleegi temperatuurist. Sellisteks on p l a s m a p õ l e t i d, mis annavad temperatuuri umbes 15 000 °C.

Elektrikaares on suurem osa elektroodidevahelisest ruumist täidetud plasmaga, milles positiivseid ja negatiivseid laenguid on umbes võrdselt. Plasmasamba temperatuur ulatub süsielektroodide vahel olevas nõrga vooluga kaares 6 000 ... 7 000 °K-ni. Kui suurendada elektrikaare võimsust, siis temperatuur ei kasva, sest kaare ristlõige kasvab, voolutihedus aga jääb peaaegu endiseks. Kuid



Joon. 17-17. Plasmapõleti põhimõtteline ehitus.

kui plasmat kokku suruda, sundida teda näiteks läbima väikest ava, siis ta temperatuur tõuseb ja seda on ära kasutatud plasmapõletites.

Joonisel 17-17 on kujutatud plasmapõleti põhimõtteskeem. Volframelektrood *1* ja rõnga kujuline vaskelektrood *2* on läbi vinnaklüliti ja reostaadi ühendatud alalisvooluallikaga *3*. Kambrisse *4* juhitakse tangentsiaalse toru *5* kaudu gaas (argoon), mis keerisena jahutab kambri seinu ning elektrikaare väliskihte, soodustades kaare kokkutõmbumist ja kuumenemist. Seejuures saavutab gaas enne düüsist *6* väljumist kokkusurutud plasma temperatuuri ja väljub põletist leegi *7* kujul. Tavaliselt jahutatakse põletite kambreid veega. Võimsaid alalisvoolu plasmapõleteid toidetakse tüüritavate ioonventiilide blokist, millel on järsult langev väliskarakteristik. On ka plasmapõleteid, mis töötavad kolmefaasilisel vahelduvvoolul sagedusega $f = 50$ Hz.

Plasmajoal on palju häid omadusi. Tema abil saab keevitada, lõigata, peale sulatada ja siluda ka kõige kõvemaid metalle ja mittemetalle; kaare pikkus siin tööreżiimi ei määra, sest töötab ju plasmajuga. Laialdasemat kasutamist on plasmajuga leidnud materjalide, eriti raskesti sulavate metallide ja mittemetallide lõikamisel, kus tavalist gaasileeki kasutada ei saa. Tänu kõrgele temperatuurile ja sulanud materjali lõikekohalt gaasijoaga väljapuhumisele, pole vaja lõikekohta hiljem üle töödelda. Tavalise elektrikaarega või hapnikuga lõikamise korral on see tingimata vajalik. Lõikamiskiirus on sel juhul palju kordi suurem kui kõigi teiste meetodite puhul. Lõikamisel vee all põleti tööreżiim ei muutu, sest gaasileek ei lase vett põletisse. Plasmapõleteid kasutatakse väga tihti tulekindlate katete kandmiseks mitmesugustele pindadele, kaasa arvatud ka plastmassid ja grafiit. Sõltuvalt operatsioonist on kaare vool 30 kuni 450 A piirides, kusjuures pinge on 20...80 V.

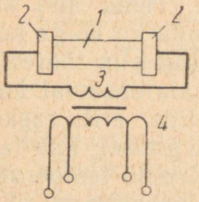
d) Elekterkuumutus

Tehnikaharu, kus käsitletakse elektrienergia soojusenergiaks muundamise viise, nimetatakse elektrotermiaks. Elektrotermiat kasutatakse laialdaselt. Kõrgekvaliteedilise terase, suure kuumus- ja korrosioonikindlusega sulamite, ferrosulamite, eriti puhaste metallide ja pooljuht-

materjalide saamine on võimalik vaid elektrotermilisel menetlusel. Sellisel menetlusel toodetakse kaltsiumkarbiidi, sünteetilist piiritust ja teisi keemiasaadusi. Sel teel saadakse väga tulekindlat keraamikat, kuivatatakse mittemetalle jne. Elektrotermiaseadmete kasutegur on, arvestades kõiki kadusid tootmisel ja elektrienergia ülekandel, umbes 8 ... 18%. Sellest tingituna kasutatakse neid seal, kus teised seadmed ei anna vajalikku efekti.

e) Otsene takistuskuumutus

Joonisel 17-18 on toodud metalldetaili *1* kuumutamise skeem. Detail on surutud veega jahutatavate kontaktklemmide *2* vahele, mis on ühendatud trafo sekundaarmähisega *3*. Kuumutusastme reguleerimiseks on primaarmähis *4* sektsioneeritud.



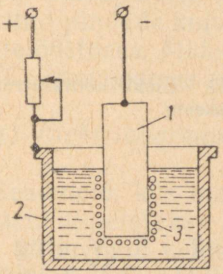
Joon. 17-18. Otsene takistuskuumutus.

Joonisel 17-19 on kujutatud seade detailide kuumutamiseks elektrolüüdis. Detail *1* ühendatakse alalisvooluallika negatiivse klemmiga ja ta on katoodiks, vanni kere *2* aga ühendatakse positiivse klemmiga. Vann on täidetud leeliste või leeliseliste soolade (Na_2CO_3, $MgCl_2$ jt.) vesilahusega. Voolutiheduse $\delta \approx 4 \ldots 16$ A/cm^2 ja tööpinge 200 ... 250 V korral elektrolüüti sukeldatud detaili pind kuumeneb kiiresti temperatuurini 800 ... 1 200 °C. Kuumenemine toimub detaili vedelikku sukeldatud pinna ümber tekkivas gaasilises keskkonnas *3* (joon. 17-19) toimuva reaktsiooni ning detaili ja elektrolüüdi vahel tekkiva sädelahenduse tulemusena.

Tegelikult kulgeb see protsess stabiilselt vaid siis, kui teatud sarnaste operatsioonide korral kasutada režiime, mis põhinevad täpsete katsetuste tulemustel. See ei tekita raskusi ühetüübiliste detailide masstootmisel ja võimaldab tootmist automatiseerida. Viimane asjaolu on eriti tähtis,

pidades silmas kõrgema pinge kasutamist ja sellest tingitud ohtu teenindavale personalile.

Kui voolutihedust on vähendatud ja tööpinge on väiksem potentsiaalide vahest, mis on vajalik sädelahenduse tekkimiseks, siis soovitavat protsessi ei teki ja energia kulub elektrolüüsiks. Liiga suurte voolutiheduste korral kulgeb protsess ebastabiilselt.



Joon. 17-19. Kuumutamine elektrolüüdis.

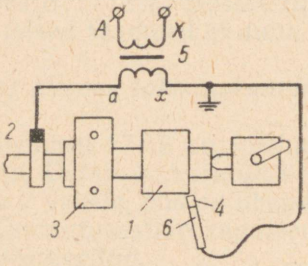
Selliselt töödeldakse mustmetalle, sulameid, grafiiti, karbiide. Elektrolüüdis kuumutamist kasutatakse väga laialt granuleeritud materjalide (pulbrid, graanulid) saamiseks. Kuumutamine toimub ilma kuumutatava pinna oksüdeerumiseta ning esialgse töötlemise täpsuse ja pinnapuhtuse säilitamisega. Seda protsessi kasutatakse traadi ja õhukeste toodete helelõõmutamisel, mehhaanilisel kuumtöötlemisel ja termilisel töötlemisel, samuti metallkeraamiliste materjalide kuumutamisel ja pressimisel ning metallide jootmisel.

Elektrikontakttöötlus torkab oma seadmete lihtsuse juures silma suure tootlikkuse ja efektiivsusega jämetöötlemisoperatsioonidel: valu koorimisel, pindade puhastamisel ja jämedal profileerimisel. Peale selle võib seda kasutada tasandaval teritamisel, freesimisel, lõikamisel, puhastamisel jne.

Joonisel 17-20 on näiteks toodud elektrikontakttreimise põhimõtteskeem. Treipingile on kinnitatud detail *1*, plaanseibi *3* kontaktseadisele *2* ja lõiketerale *4* on aga antud pinge pingemadaldustrafost *5*. Lõiketera keha *6* jahutatakse veega.

Töötlemisprotsess põhineb sellel, et lõikekohal eralduva soojuse mõjul pehmenenud või sulanud metall on

palju kergemini eemaldatav kui tavalisel treimisel. Põhilised protsessi parameetrid: voolutihedus, pinge, lõikekiirus, surve ja jahutav keskkond (õhk, vesi) valitakse katseliselt. Meetodi suureks eeliseks on see, et on võimalik kasutada vahelduvvoolu.

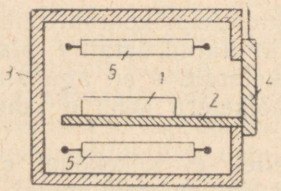


Joon. 17-20. Elektrikontakttreimise põhimõtteskeem.

Sekundaarpinge tühijooksul $U_2 = 2 \ldots 6$ V ning tööpinge detaili ja lõiketera vahel $U_t = 0{,}1 \ldots 3$ V. Lühisvool kõigub piirides 300 kuni 2 000 A, töövool aga 100 kuni 1 200 A piirides. Voolutihedus on 5 . . . 200 A/mm^2.

f) Kaudne takistuskuumutus

Kaudse takistuskuumutuse puhul juhitakse vool kuumutuselementidesse (näit. takistusspiraalid) ja seadet nimetatakse takistusahjuks. Joonisel 17-21 on toodud sellise ahju üks võimalik ehitusviis. Kuumutatav ese *1* on paigutatud ahju soojusisolatsioonikambri *3* põrandale *2*. Kamber on suletud uksega *4* ja tema kuumutamine toimub kuumutite *5* abil. Kambri vooderdis vähendab soojuse hajumist väliskeskkonda ja soodustab detaili *1* ühtlast kuumutamist. Ahjudes temperatuuriga kuni 1 000 . . . 1 200 °C kasutatakse nikroomist või raua, kroomi ja alumiiniumi sulamist kütteelemente *5*. Kui ahju temperatuur



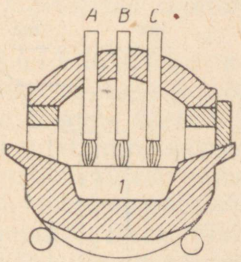
Joon. 17-21. Takistusahi.

on 1 200 kuni 1 350 °C, siis kasutatakse karborund-kütteelemente või sulatatud sooli. Veelgi kõrgema temperatuuri korral (vaakuumis või mingis kaitsekeskkonnas) kasutatakse grafiiti, volframit, molübdeeni.

Kaudne kuumutamine võib toimuda ka infrapunase kiirguse abil. Sel juhul eraldub kuumutatud elektrijuhist suurem osa energiat infrapunase kiirgusena. Sellistes seadmetes kasutatakse suunatud infrapunase kiirgusega lampe. Infrapunast kiirgust kasutatakse kuumutamiseks, värvitud pindade kuivatamiseks ja ka küpsetamiseks toiduainetetööstuses. Maksimaalne temperatuur ei ületa 200 ... 300 °C, ökonoomsus on väike.

g) Elektrikaarkuumutus

Seadmeid, kus metalli sulatamiseks kasutatakse elektrikaart, nimetatakse elektrikaarahjudeks. Rohkem on levinud kolmefaasilisel voolul töötavad otseküttekaarahjud, kus elektrikaar tekib vahetult elektroodi ja sulatatava metalli vahel (joon. 17-22). Kolm grafiitelektroodi *A, B, C* on ühendatud toitetrafo sekundaarmähistega. Elektrikaared «põlevad» elektroodide ja sulatatava



Joon. 17-22. Elektrikaarahi.

metalli *1* vahel. Temperatuuri reguleeritakse elektroodide üheaegse automaatse tõstmise või langetamisega, samuti ka trafo primaarmähise sektsioonide ümberühendamise teel. Voolu piiramiseks on trafoga jadamisi lülitatud reaktor. Suure tootlikkusega ahjud (50 ... 60 tonni terast tunnis) tarbivad võimsust kuni 40 000 kW, keskmise võimsusega ahjud (3 ... 5 tonni terast tunnis) aga kuni 1 000 ... 4 000 kW.

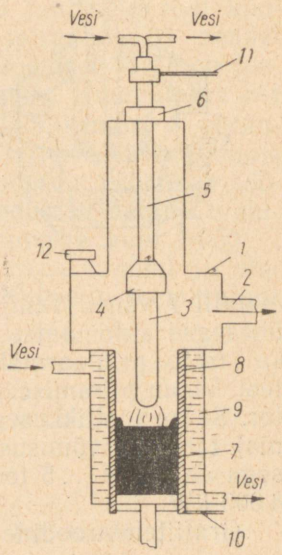
Grafiitelektroodide asemel võib kasutada ka plasma-

põleteid (vt. joon. 17-17). Ahi on sel juhul hermeetiline ja teda võib kasutada mistahes materjalide sulatamiseks alates rafineeritud vasest kuni selliste raskestisulavate metallideni, nagu titaan, tsirkoonium, molübdeen. Ta on kasutatav ka karbiidide sulatamiseks. Sellistes ahjudes sulatab plasmaleek kiiresti temaga kokkupuutuva materjali ülemise kihi. Materjali tahke osa kaitseb ahju vooderdist sulamise eest. See võimaldab saada väga puhast sulatatud materjali. Töökeskkonnaks on ahjus argoon.

h) Elektrikaar-vaakuumahjud

Tänapäeva tehnika on mõeldamatu ilma ülitugevate, kuumuskindlate, keemiliselt inertsete materjalide ja sulamiteta. Niisuguste sulamite põhilisteks komponentideks on nikkel, titaan, molübdeen, tsirkoonium jt. Tavalised sulatusmeetodid osutuvad siin kõlbmatuteks kas metallide kõrge sulamistäpi tõttu (molübdeen, volfram) või seepärast, et isegi tiiglis sulatamine ei anna vajalikku puhtusega metalli, tingituna tiigli materjali ja sulatatava metalli vastastikusest mõjust. Kõik see viiski elektrikaar-vaakuumahjude loomiseni, mille ehitus on näidatud joonisel 17-23.

Ahju roostevabaterasest kere *1* on toru *2* abil ühendatud vaakuumpumbaga, mis hoiab ahjus vaakuumi $10^{-2} \ldots 10^{-3}$ mm Hg. Ümbersulatamisele minev metall ripub elektroodihoidjasse *4* kinnitatud elektroodi *3* kujul veega jahutatava varda *5* otsas, mis läbib vaakuumtihendit *6*. Sulametall *7* jahtub vasest kristallisaatoris *8*, mida jahutatakse veega *9*. Mööda juhtmeid *10* ja *11* juhitakse vool kristallisaatorisse ja sulatatavasse elektroodi. Protsessi kulgemise jälgimiseks on olemas optiline seadis *12*.



Joon. 17-23. Elektrikaar-vaakuumahi.

Ahje toidetakse tavaliselt alalisvooluga. Generaatoril on sel juhul kaks ergutusmähist: võõrergutusmähis ja rööpergutusmähis, kusjuures $F_v = 0{,}30\,F_r$, nii et saadakse järsult langev väliskarakteristik (vt. § 8-21). Tühijooksupinge on 40 V, elektrikaare pinge 36 ... 37 V, kusjuures vool on 20 000 ... 40 000 A. Pinge konstantsena hoidmiseks ning seega kvaliteetse struktuuriga metalli saamiseks kasutatakse automaatregulaatoreid.

Ahjude toitmiseks vahelduvvooluga kasutatakse trafosid nimipingega $U_n = 45 \ldots 53$ V ja tühijooksupingega 80 V. Nende primaarpinge $U_1 = 220$, 380 V, $\eta = 0{,}87 \ldots 0{,}89$ ja $\cos\varphi = 0{,}62 \ldots 0{,}64$.

Vaakuumi halvenemise puhul rõhuni 0,1 ... 1 mm Hg tekib ahjus elektriline ruumilaeng, elektrikaar viskub kristallisaatorile ja põletab selle läbi. Ahjus tekib veeauru ja paukgaasi segu ja toimub plahvatus. Sellise ohu tõttu kasutatakse ahju kaugjuhtimist. Ahi ümbritsetakse raudbetoonseintega, kristallisaator aga paigutatakse tsehhi põrandasse. Ahju juhtimisega seotud raskused ja puudused saadud metalli kvaliteedis viisid uue sulatamise tehnoloogia otsingutele. Uuem meetod on sulatamine elektronkiire abil.

i) Seadmed sulatamiseks elektronkiire abil

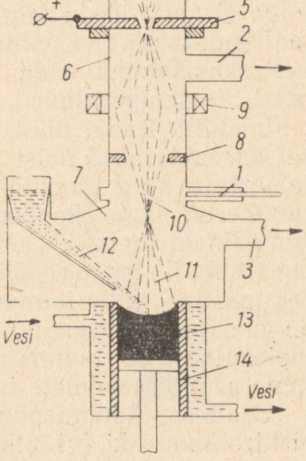
Sulatamine elektronkiire abil tagab töö täieliku ohutuse ja võimaldab saada nii puhtaid metalle, mida ei anna ükski teine sulatamisviis. Nioobiumi ja tantaali sulatamine vähendab nende hapniku-, lämmastiku- ja vesinikusisaldust sadu kordi. Saab võimalikuks valtsida neist, toatemperatuuril habrastest materjalidest õhukest lehtmetalli. Raua, nikli, vase ja nende sulamite sulatamisel kõrvaldatakse neist peaaegu täielikult plii, tina, tsink ja vismut ning gaasilised lisandid. Elektronkiirega sulatamine on väga ökonoomne ja võimaldab ümber sulatada kompaktset metalli, samuti ka metallilaaste ja -lõikmeid. On võimalik saada põhimõtteliselt uusi sulameid, sest segunemine võib toimuda gaasilises olekus. Peale selle on vaakuumis aurustuva metalli abil võimalik saada monomolekulaarseid metallkilesid mikroelektroonika ja uusimate arvutusseadmete tarvis.

Seadme töötamispõhimõte seisneb järgmises. Nagu elektronlambiski (vt. ptk. 13) emiteerib kuumutatav katood

elektrone. Viimased satuvad elektrivälja, mis on seotud elektroodidega, millele on rakendatud alalispinge 3...35 kV. Selles väljas elektrone kiirendatakse ja nad saavad teatud kineetilise energia. Kui elektronide teele jääb metallikänk või väike metalliosake, siis annavad nad kokkupõrkel sellele oma kineetilise energia ja sulatavad või aurustavad metalli. Seadist, kus elektrone emiteeritakse ja kiirendatakse, nimetatakse elektronkahuriks (vt. § 13-15). Metall valgub kristallisaatorisse ja tahkub. Sarnane nähtus esineb ka tavalises elektronlambis, kus elektron, jõudes anoodile, kuumutab seda. Seal aga tekitab anoodi sulamine lambi rikke.

Joonisel 17-24 on toodud elektronkiirega sulatava seadme põhimõtteline ehitus. Seadme roostevabaterasest kere koosneb kahest kambrist: ülemisest kambrist *6*, mis on ülalpool jaotussiibrit *1*, ja alumisest kambrist *7*. Kambritel on eraldi torud vaakuumi tekitamiseks (*2* ja *3*), mille kaudu hoitakse vaakuumi 10^{-5}...10^{-4} mm Hg. Katoodi *4* ja anoodi *5* vahele rakendatakse kiirendav pinge suurusjärgus 30...35 kV. Selle saame trafost, mis on lülitatud jadamisi sildskeemi ühendatud seleen- või räniventiilidega. Raskesti sulav katood *4*, mis on valmistatud volframist või tantaalist, on kaudse küttega — teda pommitatakse elektronidega (joonisel pole seda näidatud). Ülemises kambris *6* on elektronkahur.

Kui kiirendav pinge on 30...35 kV, siis ulatub kahuri võimsus 200...250 kW-ni. Juhul kui sulatuskambris *7* on tingimata vaja saada suuremat võimsust, seatakse üles 2, 3, 4 ja enam elektronkahurit, mida jahutatakse veega. Nimetatud kiirendava pinge korral satub väga vähe elektrone kiirenduselektroodile *5*, suurem osa elektrone moodustab võimsa elektronkiire, mis tungib läbi vahediafrag-



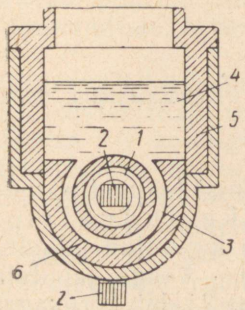
Joon. 17-24. Seade sulatamiseks elektronkiire abil.

ma *8* sulatuskambrisse. Sellel diafragmal on seadis, mis elektronidele mõju avaldamata takistab gaaside tungimist sulatuskambrist *7* elektronkahuri kambrisse *6*. Lühikesel poolil (solenoid) *9* on väline magnetjuhe ja ta on mõeldud elektronkiire *10* juhtimiseks läbi diafragma *8* ning tema fokuseerimiseks sulatustsoonis *11*. Vajaduse korral saab elektronkiirt sulatataval objektil väga teravaks fokuseerida.

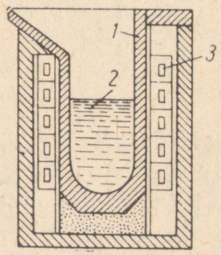
Sulatatav materjal *12* suunatakse tükeldatuna (peenestatuna) või seadme teistsuguse konstruktsiooni korral ka metallikänkudena sulatustsooni *11*, kus ta elektronkiire mõjul sulab, valgub veega jahutatavasse kristallisaatorisse *14* ja tardub seal metallikänguks *13*. Sulatamise lõpetamisel jahutatakse metallikänku vaakuumis, seejärel tõmmatakse ta spetsiaalse mehhanismiga sulatuskambrist *7* väljastuskambrisse. Enne seda aga eraldatakse elektronkahuri kamber siibriga *1* sulatuskambrist.

j) Metallide induktsioonkuumutus

Induktsioonkuumutamiseks kasutatakse vahelduvvoolu ja kõik vastavad seadmed töötavad (terassüdamikuga või ka ilma selleta) trafoga analoogilisel põhimõttel. Joonisel 17-25 on kujutatud terassüdamikuga induktsioonahi. Terasest magnetjuhtmele *2* paigutatud primaarmähisesse *1* antakse vahelduvvool sagedusega 50 Hz. Sekundaarmähiseks on sula metalli kanalis *3*. Kaev *4*, mille kaudu metalli juurde antakse, on kaetud tulekindla



Joon. 17-25. Terassüdamikuga induktsioonahi.

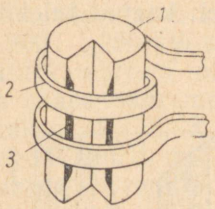


Joon. 17-26. Terassüdamikuta induktsioonahi.

vooderdisega *5*. Kanal *3* on tulekindlast kivist põhjaga *6*. Elektrodünaamiliste jõudude mõjul kanalis tekkiv sula metalli tsirkuleerimine kandub edasi kaevu. Sula metalli lastakse perioodiliselt välja, kusjuures teatud osa peab alati jääma kanalisse *3*. Ahi peab töötama pidevalt. Ahju väljalülitamisel tuleb kanal metallist täiesti tühjaks lasta. Seadme kasutegur on kuni 0,85 ja $\cos\varphi = 0{,}6 \ldots 0{,}7$. Seda tüüpi ahjud on värviliste metallide ja nende sulamite sulatamiseks ühed parematest.

Joonisel 17-26 on kujutatud terassüdamikuta induktsioonahju ehitus. Tiiglit *1*, kus metall *2* sulab, ümbritseb veega jahutatav vasktorust keerdudega primaarmähis *3*. Primaarmähise magnetvoog tekitab tiiglis *2* pöörisvoolud, mille mõjul metall sulab. Et terassüdamikku pole, siis on vajalik magnetiline sidestus võimalik vaid kõrgema sagedusega (500 ... 2 500 Hz) või kõrgsagedusliku ($10^5 \ldots 10^6$ Hz) vooluga toitmisel. Esimesel juhul kasutatakse toiteallikatena masingeneraatoreid, teisel juhul lampgeneraatoreid.

Selliste ahjude tiigli maht ulatub mõnest kuupsentimeetrist ühe kuupmeetrini; neid kasutatakse peamiselt teraste sulatamiseks. Nad võimaldavad sulatamist läbi viia vaakuumis ja saada kõrgekvaliteedilist materjali, kusjuures metalli ära ei põle ja kasutegur on 0,8 ... 0,9. Nende võimsustegur on aga väga väike ($\cos\varphi \approx 0{,}3$), mis sunnib kasutusele võtma abinõusid selle parendamiseks.



Joon. 17-27. Pindkarastamine induktori abil.

Laialdaselt on tööstuses kasutamist leidnud pindkarastamine kõrgsageduslike induktsioonvoolude abil. Joonisel 17-27 on kujutatud silindriline detail *1*, mille pinda karastatakse. Veega jahutatavat vasktorust valmistatud spiraalmähist *2* läbib kõrgsagedusgeneraatorist saadav tugev vool. Pinge on seejuures madal. Vool indutseerib metalli pinnakihis pöörisvoolud, mis

3...5 sekundiga kuumutavad kihi *3* karastamistemperatuurini. Suurte detailide karastamisel kasutatakse masingeneraatoreid võimsusega 100...500 kW ja sagedusega 500...15 000 Hz. Lampgeneraatoreid sagedusega üle 100 000 Hz kasutatakse alla 30 mm läbimõõduga detailide korral. Detaile läbimõõduga üle 200 mm karastatakse tööstusliku sagedusega (50 Hz) vooluga. Seadme cos φ suurendamiseks kasutatakse kondensaatoreid.

Karastamine võib toimuda ka kuumutamisega elektrolüüdis (joon. 17-19). Detail *1* sukeldatakse 5%-lisse Na_2CO_3 lahusesse, millest juhitakse läbi alalisvool pingega 220...380 V. Detaili ümber tekkiv vesinikukiht on väga suure takistusega ja kuumeneb väga kiiresti temperatuurini 1 800...2 000 °C. Mõne sekundiga kuumutab see detaili *1* pinna karastamistemperatuurini. Detail karastatakse samas elektrolüüdis, lülitades välja voolu, või siis tõstetakse ta karastusvanni.

k) Materjalide töötlemine koherentse valguskiirega

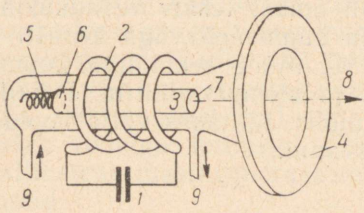
Kaasaegsete ülikõvade ja kuumuskindlate materjalide kasutamine pole mõeldav ilma täiesti uute töötlemismeetodite loomiseta. Need meetodid võimaldavad luua mikroelektroonikale ja uusimatele arvutusseadmetele selliseid elemente, nagu näiteks mitmekihilised kileskeemid, mille pindala on suurusjärgus 1 mm^2, mikrotakistid, mikrokondensaatorid, mikrotransistorid ja -dioodid jms. Nad võimaldavad puurida sekundi murdosa vältel volframisse või teemandisse avasid läbimõõduga mõni mikromeeter jne.

Järgnevalt tutvustame üldjoontes üht kaasaegset eriti kõvade materjalide (metallid, sulamid, teemandid jne.) töötlemise viisi kvantgeneraatori (laseri) kiire abil. Laseri põhimõtteskeem on kujutatud joonisel 17-28.

Energia suunatakse impulss-toiteallikast *1* impulsslampi *2*, mis on täidetud neooni ja krüptooni seguga. See segu annab rohelise valguse. Valgusimpulss ergastab kroomi aatomeid rubiinvardas *3*, mille pikkus on mõni sentimeeter ja läbimõõt ligi sentimeeter. Rubiinvarras on paigutatud hoidjasse *4*, toetub vedrule *5* ja teda jahutatakse gaasiga, mis ringleb läbi torude *9*. Rubiini otspind

6 on hõbetatud nagu peeglil, otspind *7* on aga kaetud pool-läbipaistva hõbedakihiga.

Kroomi aatomid, mille valgusimpulss viis kõrgemale energiatasemele (vt. § 1-8), võivad valgusimpulsi möödudes pöörduda vabalt tagasi esialgsele tasemele, kiirates välja teatud hulga valgusenergiat (kvante). Seejuures tekib rubiinis punane helendus. Laser on ehitatud nii, et kroomi aatomite üleminek esialgsele energiatasemele toimub n.-ö. sundkorras ja faasis (koherentselt). Järgnevalt selgitame seda.



Joon. 17-28. Kvantgeneraatori (laseri) põhimõtteskeem.

Kroomi aatomite elektronid võivad olla kõrgemal energiatasemel suhteliselt kaua — ligi üks tuhandik sekundit. Sellest ajast on küllalt, et võimas impulsslamp *2* viiks ergastatud olekusse rohkem kui pooled kroomi aatomid. Kui seejärel valgustada rubiini nõrga punase valguse kiirega, siis algab kroomi aatomite üleminek madalamale energiatasemele, kusjuures kiirgub valgusenergia kvante. Valguslained, levides piki rubiini telge, peegelduvad korduvalt hõbetatud otspindadelt, põhjustades üha uute kroomi aatomite ülemineku esialgsele energiatasemele. Rubiini otspindade vahel peegelduva valguskiire energia kasvab laviinina ja teatud hetkel tungib silmipimestav kiir *8* läbi poolhõbetatud otspinna (joon. 17—28).

Rubiinlaser kiirgab valgusimpulsse lainepikkusega ligi 0,7 μm. Impulsi kestus on umbes 0,001 s ja nende vahe on mõni mikrosekund. Impulsslambi *2* ühe valgusimpulsi ajal toimub mitusada punase valguse impulssi. Laseri kiire heledus on ühesuguste ruuminurkade korral miljoneid kordi suurem päikese heledusest ja teda saab väga teravaks fokuseerida. Kiirel on suur erivõimsus ja ta kuumutab ning sulatab oma teele jäävaid esemeid silmapilkselt. Ta puurib kümneid auke minutis seal, kus tavalised tööriistad on võimetud. Tema abil on võimalik sulatada me-

tallidele ja keraamikale peale raskestisulavaid metalle. Tööprotsess võib toimuda õhus, vastavates gaasides, vaakuumis. Nõukogude insenerid on loonud optiliste kvantgeneraatoritega programmjuhtimisega tööpinke.

Tööde eest kvantelektroonika alal anti nõukogude teadlastele N. G. Bassovile ja A. M. Prohhorovile 1959. aastal Lenini preemia, 1964. aastal aga koos ameeriklase C. H. Townes'iga Nobeli preemia.

1) Dielektriline kuumutus

Elektrienergiat võib soojusenergiaks muundada ka dielektrikus, paigutades viimase kõrgsageduslikku elektrivälja. Võimsuskadu dielektrikus

$$P = 2\pi f U_C^2 \operatorname{tg} \delta,$$

kus C on elektroodidest ja dielektrikust moodustatud kondensaatori mahtuvus,

$\operatorname{tg} \delta$ — kaonurga tangens, mis on kuumutamisel võrdne aktiiv- ja reaktiivvoolu suhtega, ja

U_C — pinge kondensaatori plaatide vahel.

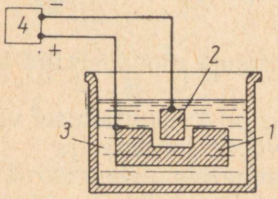
Vastavate seadmete toitmiseks kasutatakse võimsustrioodidega lampgeneraatoreid. Võimsuse suurendamiseks lülitatakse mitu ühesugust trioodi rööbiti. Sageduse ja väljatugevuse suurendamisel suureneb võimsus P ja tõuseb temperatuur. Tunduv pinge suurendamine on seotud tehniliste raskustega ja seetõttu suurendatakse tavaliselt sagedust (100 kHz kuni 100 MHz). Väljatugevus ulatub sadadest voltidest kuni 2,5 kilovoldini sentimeetri kohta. Dielektrilist kuumutust kasutatakse plastikaatkilede keevitamiseks, presspulbrite kuumutamiseks, puidu ja kondensaatorpaberi kuivatamiseks, toiduainete steriliseerimiseks jne.

17-4. Elektroerosioontöötlus

Elektroerosioontöötlus erineb oluliselt eespool kirjeldatud töötlemismeetoditest. Seda kasutatakse kõigi voolu juhtivate materjalide, eriti aga väga kõvade ja ülikõvade materjalide puhul. Meetodit kasutatakse väga erinevatel töödel alates pihustite avade puurimisest ja elektrovaakuumseadiste võrede valmistamisest sepastant-

side valmistamiseni. Rohkem leiab see meetod kasutamist mitmesuguste õõnsuste ja avade tegemisel.

Kõikidel elektroerosioonmeetodi kasutamise juhtudel tekib erosioon — töödeldava materjali pinna lagunemine — elektrilaengute toimel. Seejuures antakse elektrienergia töötlemistsooni vooluimpulssidena elektroodide kaudu, mis on teineteisest eraldatud dielektrikuga. Energia jaotus elektroodidevahelises ruumis sõltub elektroodidevahelisest kaugusest. Selleks et peaaegu kogu elektrilahenduse energia eralduks elektroodidel, peab kaugus nende vahel olema 3 ... 5 μm. Elektroodid ei lagune ühesuguselt. Kui nende potentsiaalide vahe on alla 20 V, laguneb kiiremini anood, on aga see üle 40 V, siis katood.

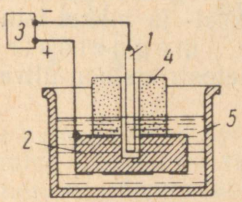


Joon. 17-29. Avade elektroerosioonpuurimise skeem.

Impulsslahenduse korral tekib töödeldavas pinnas auk, kust metall on välja paisatud. Augu läbimõõt sõltub metalli füüsikalistest omadustest (ionisatsioonipotentsiaal, aatomkaal), sügavus aga soojusfüüsikalistest omadustest. Mõõtu töötlemisel peavad energiaimpulsid olema lühikesed (300 ... 10 μs) ja sagedusega 400 ... 35 000 imp/s. Piirkond tootel, kuhu impulsid suunatakse, peab olema väike. Energia impulsse saadakse impulssgeneraatoritest, mille kirjeldamine ei kuulu selle kursuse piiridesse.

Joonisel 17-29 on toodud elektroerosioonmeetodil (elektrisädetöötlus) õõnsuste ja avade töötlemise skeem. Toote, s. o. anoodi *1*, ja tööriista, katoodi *2* vahel tekivad dielektrikus (mineraalõli) impulss-sädelahendused. Nende mõjul toimub elektroodide, peamiselt anoodi, lagunemine. Anood võib olla mistahes metallist või sulamist. Katood on tavaliselt vasest, messingist, metallgrafiidist või mingist alumiiniumi sulamist. Ava või õõnsuse mõõtmed ja kuju vastavad tööriista, s. o. katoodi mõõtmetele ja kujule, mida kasutatakse laialdaselt mõõtu töötlemiseks. Energiaimpulsse, mille suurus on sõltuvalt töödeldava detaili

suurusest 0,05 ... 300 J, saadakse spetsiaalsest generaatorist *4*. Seadme tööpinge on 70 ... 160 V ja töövool 1 ... 55 A. Töötlemisel saavutatakse 3. ... 5. klassi täpsus ja 3. ... 6. klassi pinnapuhtus.



Joon. 17-30. Väikeste avade elektroerosioonpuurimine.

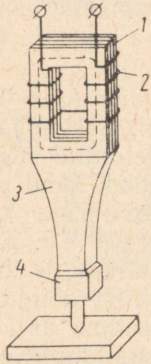
Joonisel 17-30 on kujutatud peente avade ($d = 0{,}1 \ldots 0{,}15$ mm) «puurimine» elektrisädemeetodil. Skeem ja töötamispõhimõte on sarnased eespool kirjeldatud meetodi omadega. Messingtraadist katood *1* ja anood, kuhu puuritakse ava *2*, on ühendatud impulssgeneraatoriga *3*, mis annab impulsse energiaga $0{,}3 \cdot 10^{-2} \ldots 0{,}4 \cdot 10^{-3}$ J. Et katoodi läbimõõt on väga väike, siis suunatakse ta töödeldavale kohale läbi vastava isoleermaterjalist konduktori. Vann on täidetud mineraalõliga *5*. Eriseadme abil pannakse katood «puurimise» suunas vibreerima amplituudiga 0,15 ... 0,3 mm. Seadme tööpinge $U_t = 70 \ldots 200$ V, töövool 0,05 ... 0,4 A. Töötlemisel saavutatakse 1. ... 2. klassi täpsus ja 6. ... 7. klassi pinnapuhtus.

17-5. Ultrahelitöötlus

Töötlemist keemilise, elektri- või mehhaanilise energia abil, mille puhul toimuvad pidevad mehhaanilised võnkumised sagedusega 16 000 Hz ja üle selle, nimetatakse ultrahelitöötluseks. Ultrahelivõnkumisi kasutatakse keemiliste või elektrokeemiliste protsesside intensiivistajana ja mehhaaniliste võnkumiste ülekandmiseks töötlemistsooni. Laiemalt kasutatakse seda töötlemismeetodit kõvade ja habraste materjalide mõõtu töötlemisel, pindade ja vedelike puhastamiseks, kergesti oksüdeeruva pinnaga metallide jootmiseks ja tinutamiseks.

Ultrahelivõnkumiste allikaks on tavaliselt mehhaanilised või elektrilised seadmed. Viimaseid vaatlemegi järg-

nevalt. Elektrilistes seadmetes kasutatakse *piesoelektrilisi* ja *magnetostriktsioonmuundureid*, mis muundavad elektrilised võnkumised mehhaanilisteks — ultrahelivõnkumisteks. Nagu eespool oli kirjeldatud, on kvartsplaadil omadus muuta elektriväljas oma mõõtmeid. Samasugune omadus on ka magnetvälja asetatud ferromagnetilistel materjalidel (nikkel- ja nikkel-tsinkferriidid). Seda nähtust nimetatakse *magnetostriktsiooniks* ja kasutatakse magnetostriktsioon-ultraheliseadmetes.

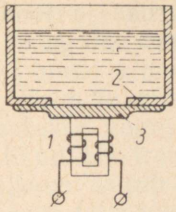


Joon. 17-31. Magnetostriktsioonvibraatori ehitus.

Joonisel 17-31 on lihtsustatult kujutatud magnetostriktsioonvibraatori ehitus. Ferriitlehtedest magnetjuhtmel *1* on mähis *2*, mida toidetakse ultraheligeneraatorist sagedusel $f = 16 \ldots 25$ kHz. Magnetjuhe on kinnitatud spetsiaalsesse keresse, mida joonisel pole näidatud, ja teda jahutatakse veega. Selleks et suurendada võnkumiste amplituudi vajaliku ulatuseni (10 ... 100 μm), on magnetjuhe mehhaaniliselt ühendatud võnkumiste kontsentraatoriga *3*, mille piirpinnad on konstrueeritud eksponentkõvera järgi. Kontsentraatoriga on joodis- või keermesliite abil ühendatud tööriist *4*.

Selle tööriista vibreerimine võimaldab töödelda mõõtu kõvu ja hapraid materjale, s. t. saada õõnsusi ja avasid, millel on tööriista kuju. Töötlemine toimub abrasiivpulbrit sisaldavas vees.

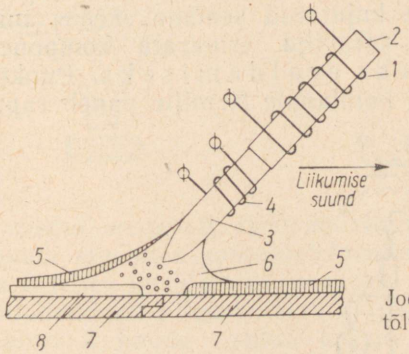
Joonisel 17-32 on kujutatud võimalus kiirendada detailide puhastamist tolmust ja rasvasest saastast magnetostriktsioonvibraatori *1* abil. Lahustiga, millesse sukelda-



Joon. 17-32. Meetod metallide rasvadest ja mehhaanilisest saastast puhastamise kiirendamiseks.

takse puhastatavad detailid, täidetud vanni *2* põhjaga on vibraator ühendatud resoneeriva akustilise membraani *3* vahendusel. Membraan annab vibraatori ultrahelivõnkumised edasi lahusele, kiirendades seega puhastamisprotsessi. Nii puhastatakse kellade, laagrite ja arstiriistade detaile, elektrovaakuumseadmete detaile jne.

Väga efektiivne on kergesti oksüdeeruvate metallide (alumiinium, uued kerged ja spetsiaalsulamid) jootmine ultraheli abil. Selle jootmismeetodi puhul etendab tähtsat osa nn. k a v i t a t s i o o n. Helivõnkumiste küllaldase võimsuse korral tekivad tugevad lööklained, mis tekitavad vedelas joodises mullikesed, kus rõhk on tuhandeid atmosfääre. Hüdraulilised löögid purustavad metalli pinnal oksiidikile, avades joodisele juurdepääsu materjalile. Sel juhul pole vaja mingeid räbusteid.



Joon. 17-33. Ultraheli-jootetõlvik.

Joonisel 17-33 on kujutatud ultraheli-jootetõlvik. Mehhaanilisi võnkumisi tekitab magnetostriktsioonsüdamiku *2* mähist *1* läbiv kõrgsagedusvool. Jootetõlviku kehal *3* on

nagu tavaliselt kuumutusmähis. Võnkumised rebivad metalli oksiidi kile *5* kuumutustsoonis puruks ja joodis *6*, pääsedes metalli *7* ligi, katab selle tugeva kihiga *8*.

17-6. Elektrostaatilised seadmed

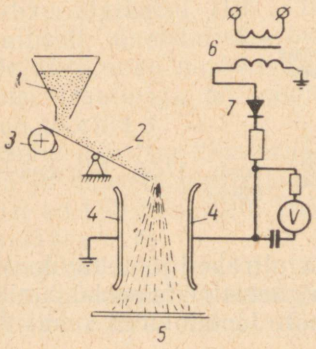
a) Töötamispõhimõte

Seadmeid, kus tekitatakse elektriväli, mis mõjutab töödeldavat materjali, põhjustamata seejuures viimases keemilisi muutusi, nimetatakse elektrostaatilisteks seadmeteks. Neis seadmetes liiguvad aine makroosakesed elektrostaatilise välja jõudude mõjul teatud kindlas suunas. Selliseid seadmeid kasutatakse gaaside puhastamiseks, puistmaterjalide segude sorteerimiseks ja koostisosade eraldamiseks, vee puhastamiseks, kolloidlahustest fraktsioonide eraldamiseks, elektriväljas värvimiseks jne.

Kõigil juhtudel tuleb neutraalsed aineosakesed eelnevalt elektriliselt laadida, kasutades selleks kas kontaktmeetodit või elektriseerimist elektriväljas. Esimest meetodit kasutatakse kuivade puistmaterjalide segude korral, teist aga gaasis või vedelikus hõljuvate osakeste korral.

b) Puistmaterjalide segude koostisosade eraldamine

Joonisel 17-34 on kujutatud seadme skeem, mis on mõeldud jahvatatud teravilja erinevate komponentide elektrostaatiliseks eraldamiseks. Punkrist *1* jõuab jahvatatud vili kaldlauale *2*, mille paneb rappuma

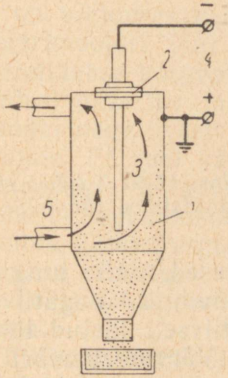


Joon. 17-34. Elektrostaatiline seade jahvatatud teravilja koostisosade eraldamiseks.

ekstsentrik *3*. Kaldlauda kasutatakse samal ajal ka osakesi elektriseeriva elektroodina. Laetud osakesed langevad läbi kahe elektroodi *4* vahelt, millede potentsiaalide vahe on kümneid kilovolte. Coulomb'i seaduse kohaselt mõjuvate jõudude mõjul eraldatakse puhas jahu kliidest ja suunatakse koguja *5* lahtritesse. Trafo *6* ja alaldi *7* on vajalikud elektroodidel *4* alalispinge saamiseks. Seadme tootlikkus sõltub kaldlaua *2* laiusest ja on kuni 100 kg ööpäevas laua laiuse iga sentimeetri kohta. Tarbitav võimsus on umbes 500 W kaldlaua laiuse iga meetri kohta.

c) Gaaside elektrostaatiline puhastamine

Gaaside puhastamiseks mõeldud elektrostaatilisi seadmeid nimetatakse elektrofiltriteks (joon. 17-35). Nagu eelmisel puhul nii ka siin peavad tolmuosakesed, tuhk või tsemenditolm, mis koos gaasiga filtrisse *5* tule-



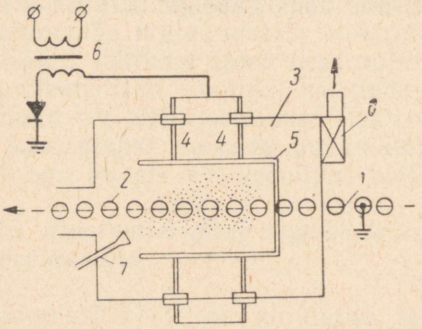
Joon. 17-35. Elektrofilter.

vad, olema eelnevalt elektriseeritud. Et nad aga gaasis hõljuvad, siis pole kontaktelektriseerimine võimalik. Sellistes filtrites kasutatakse osakeste elektriseerimiseks koroonalahendust. Filtri keresse *1* (joon. 17-35) on läbiviikisolaatori *2* kaudu toodud keskne elektrood *3*. Kõrgepingeallikas *4* tekitab filtri kere ja keskse elektroodi vahel potentsiaalide vahe, mille teatud väärtuse korral algab elektroodil *3* koroonalahendus. Gaasis tekib elektronivoog, mis suundub kerele *1*. Need elektronid laevadki gaasis lei-

duvaid kõrvalisi osakesi. Kui osakesed puutuvad vastu filtri keret *1*, laengud neutraliseeritakse. Osakesed sadestuvad kerele ja eemaldatakse filtrist.

d) Metalltoodete elektrostaatiline värvimine

Joonisel 17-36 on kujutatud metalltoodete värvimiseks või emailimiseks mõeldud seadme põhimõtteskeem. Maandatud konveieril on tooted *2*, mis lähevad värvimisele. Nad liiguvad värvimiskambris *3*, kus isolaatoritele *4* on üles riputatud raamid *5* neile tõmmatud peene traatvõrguga, mis on läbi isolaatorite *5* ühendatud kõrgepingelise toiteallika *6* negatiivse klemmiga ja on koroonalahendust tekitavaks elektroodiks. Kõrge pinge (kuni 150 kV) korral



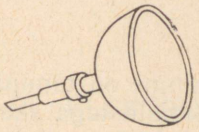
Jon. 17-36. Toodete elektrostaatiline värvimine.

tekib koroonalahendus ja värviosakesed, mis tungivad läbi pneumaatilise pihusti düüsi *7*, laaduvad negatiivselt ja liiguvad konveieril olevatele positiivselt laetud toodetele, kattes need tiheda värvikihiga. Värvimiskambril on ventilatsiooniseade. Kõrgepingeallika võimsus ei ületa tavaliselt 150 vatti. Elektervärvimist kasutatakse laialdaselt auto-, põllumajandusmasinate tööstuses ja elektrotehnikatööstuses ning mujal.

e) Puittoodete viimistlemine elektrostaatilisel meetodil

Võrreldes metalltoodete elektervärvimisega on siin rida iseärasusi. Need on tingitud sellest, et puittoodete lakiga katmisel esitatakse väga kõrgeid nõudeid kvaliteedi (de-

koratiivsuse) suhtes. Puidu eelnev töötlemine peab tagama pinnapuhtuse, mis vastab 9. või 10. klassile. Vastasel juhul krobelise värvitava pinna korral tekib pisikeste pindude ja mistahes teravate nukikeste ümber vastassuunaline koroonalahendus, millest tingituna jäävad mõned pinna osad värvkatteta.



Joon. 17-37. Elektrostaatiliseks värvimiseks kasutatav pihusti.

Teine iseärasus seisneb selles, et kuiv puit on halb juht. Siit tingimus, et puidus peab olema vähemalt 8% niiskust. Puidu elektrijuhtivuse suurendamiseks lisatakse tema ettevalmistamisel krundile vahel fosforhapet.

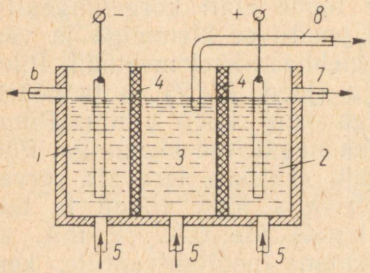
Värvimisel ühendatakse toode alati kõrgepingeallika (80 ... 150 kV) maandatud positiivse klemmiga ja värvi pihustamine toimub elektromehhaanilisel meetodil. Pihustil on seejuures karika kuju (joon. 17-37) ja ta pöörleb elektrimootori jõul kiirusega kuni 1 500 p/min. Pihusti ühendatakse kõrgepingeallika negatiivse klemmiga. Pöörlemisel pihustuv lakk laadub «karika» teravate servade lähedal negatiivselt ja elektrivälja jõud viivad ta toote pinnale. Et vool värvimisel pole üle 0,2 ... 2 mA, siis kasutatakse kõrgepingeallikatena pooljuhtventiile, kenotrone ja spetsiaalseid elektrostaatilisi generaatoreid. Ökonoomia viimistlusmaterjalide (värvid, lakid) osas on siin tavalise pihustiga värvimisega võrreldes 40% ja rohkemgi. Töökulu väheneb 30%, töö tootlikkus aga kasvab mitu korda.

Elektrostaatilisel värvimisel tuleb, ja seda eriti puidutöötlemistööstuses, täita rangelt ohutustehnika ja tuleohutuse eeskirju. Ruum, kus on elektervärvimisseade, isoleeritakse teistest ruumidest, kus õhus on puidutolmu. Tolmu osakesed on pärast elektrostaatilisse välja sattumist ja elektriliselt laetutena inimesele eriti kahjulikud. Selleks, et vältida inimeste kahjustamist voolu läbi, ei soovitata kasutada kõrgepingeseadmeid võimsusega üle 150 W. Värvimiskamber ja teised osad, mis normaalselt ei ole pingestatud, maandatakse. Maandustakistus peab olema väiksem kui 2 Ω. Seade soovitatakse varustada eraldi maandusega, mis pole ühendatud alajaama trafo maandatud

nullpunktiga. Seadme väljalülitamisel tuleb staatilised jääklaengud, seda eriti pihustil, läbi lahendi maandada. Tuleohutuse nõuete kohaselt tuleb teha kõik võimalik, et vältida koroonalahenduse üleminekut säde- ja kaarlahenduseks, mis võib põhjustada laki ja puidutolmu süttimist.

f) Vee elektroosmoospuhastus

Joogivee ja tehnilise mageda vee saamine on tänapäeval väga aktuaalne. Seoses reaalsete võimalustega saada aatomielektrijaamade abil suurt hulka elektrienergiat on võimalik magestada merede ja ookeanide vett. Vee elektroosmoospuhastuse viis, mida kirjeldame allpool, võimaldab puhastada vett, mille ühes liitris on lahustunud mitusada milligrammi kuivainet.



Joon. 17-38. Vee elektroosmoospuhastus.

Joonisel 17-38 on kujutatud anum, mis on seemisnahast, keraamikast, pärgamendist vms. vaheseintega *4* jagatud kolmeks osaks. Esimesse ja teise osasse on sukeldatud elektrienergiaallikatega ühendatud elektroodid. Torude *5* kaudu juhitakse anumasse puhastatav vesi. Vees olevad soolad Na_2SO_4, $CaSO_4$, $CaHCO_3$ jt. dissotsieeruvad katioonideks (H^+, Ca^{2+}, Na^+), mis liiguvad katoodile osas *1*, ja anioonideks (OH^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-), mis liiguvad anoodile osas *2*. Neist osadest eemaldatakse aluseline ja happeline vesi vastavalt torude *6* ja *7* kaudu. Osa *3* sooladevaene vesi antakse toru *8* kaudu teise anumasse, mis on esimesega jadamisi ühendatud jne. Anumate elektroodidele rakendatakse pinge 110 või 220 V, kusjuures jadaahela igale järgmisele anumale langev pinge on eelmisest suurem. Jadamisi ühendatud anumate rühmad võib omavahel rööbiti ühendada.

18. ELEKTRIVALGUSTUS

18-1. Põhimõisted ja mõõtühikud

Hea valgustus on üheks tingimuseks tööviljakuse tõstmisel, praagi vähendamisel, toodangu kvaliteedi parandamisel ja tööõnnetuste arvu vähendamisel.

Elektrivalgustuseks kasutatakse enamasti ligi 3 000 °C-ni kuumutatud hõõglambi volframniidi kiirgusenergiat.

Inimsilma poolt valgusaistinguna vastuvõetud kiirgusenergia osa suhet ajasse, mille vältel ta kiiratakse, nimetatakse *valgusvooks* (Φ). Seega kujutab valgusvoog endast inimsilma poolt vastuvõetava kiirgusenergia võimsust.

Kuna valgusallikate valgusvood ei jaotu ruumis ühtlaselt, siis iseloomustatakse neid veel valgusvoo ruumtihedusega erinevates suundades. Valgusvoo ruumtihedus on määratud valgusvoo suurusega ruuminurga ühikule, mida nimetatakse *valgustugevuseks* (I).

Järelikult valgustugevus

$$I = \frac{\Phi}{\omega}.$$

Ruuminurgaks (ω) nimetatakse ruumi osa, mis on piiratud koonilise pinnaga. Ruuminurga suuruse määrab sfääri pinna osa S, millele toetub ruuminurk, ja sfääri raadiuse ruudu suhe:

$$\omega = \frac{S}{R^2}.$$

Kui $S = R^2$, siis $\omega = 1$. Seega on ruuminurga ühikuks võetud nurk, mis lõikab sfääri pinnast välja pindalalt

sfääri raadiuse ruuduga võrdse osa. Seda ühikut nimetatakse steradiaaniks (sr).

Vastavalt rahvusvahelisele mõõtühikute süsteemile ja standardile ГОСТ 9867-61 on valguslikuks põhiühikuks valgustugevuse ühik kandela (cd). Kandela on võrdne valgustugevusega suunas, mis on risti absoluutselt musta keha pinnaga, mille pindala on 1,6667 mm², plaatina tahkumistemperatuuril $T = 2046\,°K$.

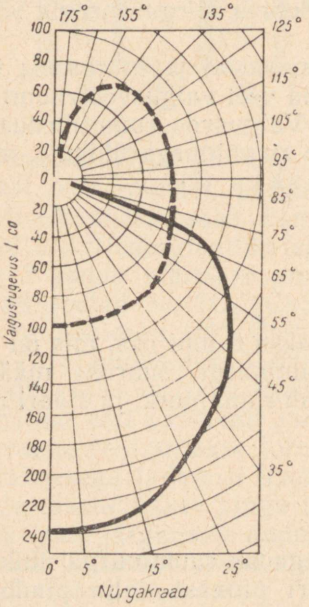
Valgusvoo ühikuks on luumen (lm) — valgusvoog, mille kiirgab valgusallikas valgustugevusega 1 cd ruuminurka 1 sr. Seega

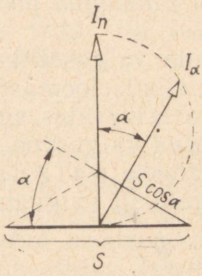
$$1\ lm = 1\ cd \cdot 1\ sr.$$

Näiteks annab hõõglamp nimipingega 127 V ja võimsusega 100 W valgusvoo $\Phi = 1\,320$ lm.

Nagu juba märgitud, on lampide ja valgustusseadmete valgustugevus erinevates suundades erinev. Valgusallika valgustugevus erinevates suundades antakse tavaliselt polaarkoordinaatides joonestatud kõveratega.

Kriipsjoonega kujutatud kõver (joon. 18-1) annab 100-





Joon. 18-2. Helendava pinna heledus.

◀Joon. 18-1. Valgustugevuse polaardiagramm.

vatise võimsusega ja 220-voldise nimipingega hõõglambi valgustugevuse jaotuse pikisuunas. Raadiuse lõigu pikkus poolusest O kuni lõikumiseni vastava kõveraga annab teatud mastaabis valgustugevuse radiaalsuunas. Näiteks on valgustugevus 45°-se nurga all oleva raadiuse suunas võrdne 100 kandelaga. Et lambil on sümmeetriatelg, tuleb valgustugevuse leidmiseks 180°-st suuremate nurkade puhul joonestada välja kõvera teine pool, mis kujutab endast esimese peegelpilti. Pideva joonega kõver (joon. 18-1) annab valgustugevuse jaotuse sama lambi kasutamisel valgustis «Universaal».

Kuna valgusallika valgustugevus on erinevates suundades erinev, siis iseloomustatakse teda sageli keskmise sfäärilise valgustugevusega, mis kujutab endast allika kogu valgusvoo ja sfääri ruuminurga (4π) suhet, s. t.

$$I_0 = \frac{\Phi}{4\pi}.$$

Seega kujutab keskmine sfääriline valgustugevus endast keskmist valgusvoo tihedust, näidates, milline oleks valgustugevus, kui kogu lambi valgusvoog jaotada ühtlaselt kõigis suundades. Nii on eelnenud näites vaadeldud lambi keskmine sfääriline valgustugevus

$$I_0 = \frac{\Phi}{4\pi} = \frac{1320}{4 \cdot 3{,}14} \approx 100 \text{ cd}.$$

Valgusvoog, langedes mingile pinnale, valgustab seda. Valgustatuse intensiivsust hinnatakse valgusvoo ja tema poolt ühtlaselt valgustatava pindala suhtega, mida nimetatakse valgustatuseks (E):

$$E = \frac{\Phi}{S}.$$

Võttes $\Phi = 1$ lm ja $S = 1$ m^2, saame valgustatuse mõõtühiku, mida nimetatakse luksiks (lx):

$$1 \text{ lx} = \frac{1 \text{ lm}}{1 \text{ m}^2}.$$

Hõõglampide kasutamisel on lubatav väikseim töötamiseks vajalik valgustatus määratud vastavate valgustatuse normidega, mis muutub piirides 30...1500 lx sõltuvalt töö iseloomust ja mitmesugustest tingimustest.

Eseme nähtavust iseloomustatakse heledusega (B), mis kujutab endast pinnalt kiirguva valgusvoo valgustu-

gevuse ja selle pinna suhet. Seega heledus pinna normaali suunas (joon. 18-2)

$$B_r = \frac{I_r}{S}.$$

Heledus pinna normaali suhtes nurga α all oleva sirge suunas (joon. 18-2)

$$B_\alpha = \frac{I_\alpha}{S \cos \alpha}.$$

Väljendades valgustugevust kandelates, pindala aga ruutmeetrites, saame heleduse kandelates ruutmeetri kohta. Seda heleduse ühikut nimetatakse nitiks (nt):

$$1 \text{ nt} = \frac{1 \text{ cd}}{1 \text{ m}^2}.$$

Nitt on ühtlaselt helenduva tasase pinna heledus, mis tekitab pinna normaali suunas ühe ruutmeetriliselt pinnalt valgustugevuse 1 cd.

Nägemisaisting, mille kutsub esile eseme kujutis silma valgustundlikul võrkkestal, on seda tugevam, mida suurem valgusvoog langeb silma igalt valgustatud või helenduva pinna elemendilt. Seega vastab keha igalt pinnaühikult kiiratavale suuremale valgustugevusele eseme parem nähtavus.

Kehale langev valgusvoog jaguneb kolmeks osaks. Üks osa valgusvoost (Φ_0) peegeldub keha pinnalt. Teine osa läbib keha ja levib teisel pool edasi. Kolmas osa valgusvoost aga neeldub kehas. Sõltuvalt keha füüsikalistest omadustest ning pinna iseloomust ja seisukorrast võivad nimetatud komponentide väärtused olla küllaltki erinevad.

Peegeldunud valgusvoo Φ_0 suhet sellele pinnale langevasse valgusvoogu Φ_l nimetatakse peegeldusteguriks

$$\varrho = \frac{\Phi_0}{\Phi_l}.$$

Peegeldusteguri järgi võib pindu jagada heledateks ($\varrho = 0{,}5 \ldots 0{,}8$), keskmisteks ($\varrho = 0{,}2 \ldots 0{,}5$) ja tumedateks ($\varrho = 0{,}06 \ldots 0{,}2$).

18-2. Valgusallikad

Tänapäeval kasutatakse valgustamiseks laialdaselt hõõg- ja luminestsentslampe.

Hõõglambi leiutas 1873. aastal vene insener A. N. Ladõgin ja seda täiustas T. A. Edison.

Üldtuntud hõõglambi ehitus on kujutatud joonisel 18-3. Normaal-hõõglambid võimsusega kuni 40 ... 60 W valmistatakse vaakuumlampidena, suurema võimsusega lambid aga gaasitäitega. Gaasitäitega lambi tööiga on pikem, sest gaas (argooni ja lämmastiku segu) vähendab lambi volframniidi pihustumist.



A. N. Ladõgin (1847—1923).

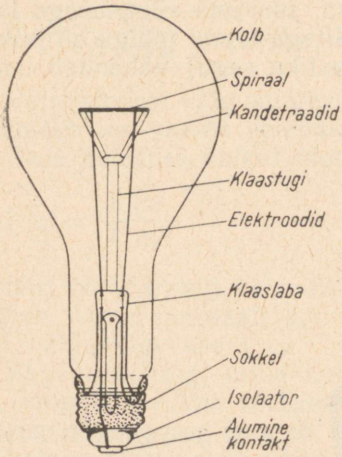
Lambi täitmine gaasiseguga krüptoon-ksenoon suurendab lambi tööiga ja ökonoomsust 30 ... 40%. Seda energiakadude vähenemise tõttu tänu gaasi soojusjuhtivusele ja bispiraalse hõõgniidi kasutamisele. Viimane kujutab endast spiraalsest traadist keeratud spiraali.

Hõõglampe iseloomustavad järgmised suurused: 1) nimipinge; 2) nimivõimsus; 3) valgusvoog; 4) valgusviljakus, s. o. valgusvoo ja lambi poolt tarbitava võimsuse suhe, mis iseloomustab lambi ökonoomsust; 5) tööiga. Hõõglampide karakteristikud on antud tabelis 18-1.

Tööiga sõltub peamiselt volframniidi pihustumisest. Hõõgniidi kuumutamisel kõrge temperatuurini volfram aurustub ja moodustab kolvi seintele sadestudes tumeda

kirme, mis neelab valgusvoogu. Sellest tingituna loetakse lambi normaalseks tööeaks tema põlemisaega nimipingel U_n valgusvoo vähenemiseni 20% võrra algväärtusest. Suurema valgusvoo vähenemise korral pole lambi kasutamine otstarbekas. Lambi normaalseks tööeaks loetakse 1000 t.

Lambi tööiga, valgusvoog ja valgusviljakus sõltuvad

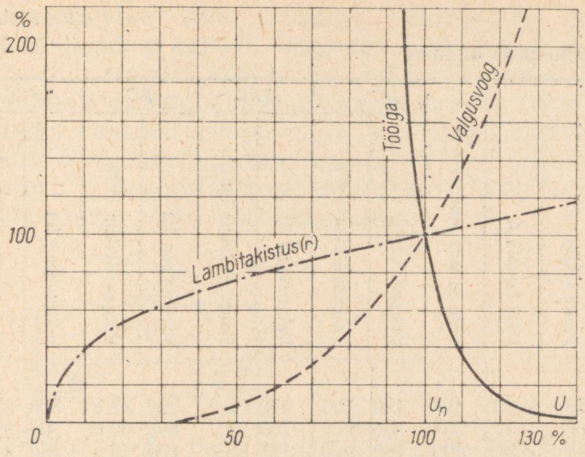


Joon. 18-3. Hõõglamp.

Tabel 18-1

Hõõglampide andmed

Võimsus W	110 ja 127 V		220 V	
	Valgusvoog lm	Valgusviljakus lm/W	Valgusvoog lm	Valgusviljakus lm/W
25	228	9,1	198	7,9
40	380	9,5	340	8,5
60	660	11	540	9,0
75	915	12,2	698	9,3
100	1 320	13,2	1 050	10,5
150	2 280	15,2	1 845	12,3
200	3 200	16,0	2 660	13,3
300	5 160	17,2	4 350	14,5
400	7 000	17,5	6 000	15,0
500	9 100	18,2	8 000	16,0

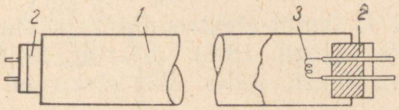


Joon. 18-4. Hõõglambi karakteristikud sõltuvalt pingest.

suuresti tema pingest (joon. 18-4), sellepärast peab lamp töötama kas nimipingel või sellest üsna vähe erineval pingel.

Luminestsentslamp (joon. 18-5) koosneb klaastorust *1*, mille otstesse on kinnitatud soklid *2* volframist bispiraalsete elektroodidega *3*, mis on kaetud õhukese emissiooni soodustava baariumoksiidi kihiga. Pärast õhu väljapumpamist viiakse torusse pisut elavhõbedat ja argooni.

Toru sisepind on kaetud luminofooriga või luminofooride seguga. Luminofooride segu helendub talle mõjuva elavhõbedaauru ultravioletse kiirguse toimel. Kiirgust põhjustavad elektrivälja mõjul elavhõbedaauru läbivad elektronid.



Joon. 18-5. Luminestsentslamp.

Sõltuvalt oma koostisest annavad luminofoorid erivärvilisi valgusvooge. Teatud luminofooride valiku puhul võib saada päevavalgusele lähedase kiirgusega lampe.

Luminestsentslampide andmed

Võimsus W	Pinge V	Pinge lambil V	Vool lambis A	Toru pikkus mm	*ДС*		*ХБС*		*БС*		*ТБС*	
					Valgusvoog lm	Valgusviljakus lm/W	Valgusvoog lm	Valgusviljakus lm/W	Valgusvoog lm	Valgusviljakus lm/W	Valgusvoog lm	Valgusviljakus lm/W
15	127	58	0,30	451	490	32,6	490	32,6	560	37,3	500	33,3
20	127	60	0,35	604	700	35,0	700	35,0	800	40,0	700	35,0
30	220	108	0,32	909	1 160	38,6	1 160	38,6	1 400	46,6	1 250	41,6
40	220	108	0,41	1 213	1 700	42,5	1 700	42,5	1 920	48,0	1 780	44,5
80	220	108	0,80	1 481	3 040	38,0	—	—	3 440	43,0	3 200	40,0

Luminestsentslampide nimi-tööiga on 3000 t. Nende kasutegur on ligi 6%, s. o. 2,5...3 korda suurem kui hõõglampidel. Ökonoomsuse tõttu tuleb soovitada nende laialdast kasutamist.

Kiirguse värvuse järgi jaotatakse luminestsentslampe järgmiselt: 1) päevavalguslambid — *ДС*; 2) valgevalguse lambid — *БС*; 3) külma valgevalguse lambid — *ХБС* ja 4) sooja valgevalguse lambid — *ТБС*.

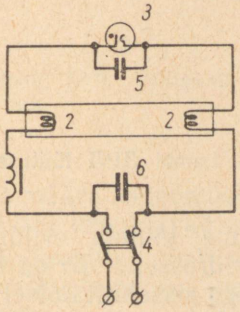
Lampe *ДС* ja *ХБС* kasutatakse valgustamiseks töödel, mis nõuavad eksimatut värvitoonide määramist. Lampe *БС* ja *ТБС* kasutatakse siis, kui on tingimata vaja loomulikule lähedast valguse värvust.

Luminestsentslampide karakteristikud on antud tabelis 18-2.

Voolu piirav drossel *1*, lambi elektroodid *2* ja starter *3* on ühendatud jadamisi (joon. 18-6). Starter kujutab endast väikest neoonlambikest, mille üks elektrood on bimetallist.

Lüliti *4* sulgemisel rakendatakse starteri teineteisest lahutatud elektroodidele võrgupinge ja nende vahel tekib huumlahendus. Bimetallist elektrood kuumeneb, lühistab starteri elektroodid ja vooluringis tekib lambi elektroode

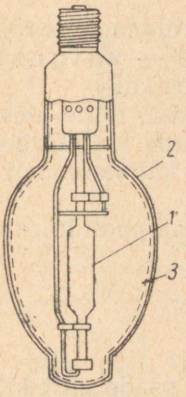
2 kuumendav vool. Starteri elektroodide lühistamisel huumlahendus katkeb, bimetallist elektrood jahtub ning katkestab starteri vooluringi. Sel hetkel ilmub lambi kuumendatud elektroodidele pinge ja lambis tekib lahendus, millega kaasneb helendumine, s. t. lamp süttib. Kondensaator *5* on mõeldud raadiohäirete välistamiseks. Kondensaatorit *6* kasutatakse võimsusteguri tõstmiseks ja stroboskoopilise efekti kõrvaldamiseks.



Joon. 18-6. Luminestsentslambi lülitusskeem.

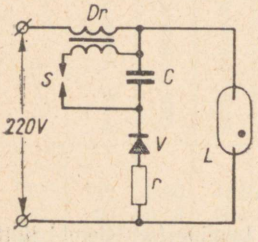
Viimasel ajal on tänavate, väljakute ja suurte kõrgete tootmisruumide valgustamisel üsna laialdast kasutamist leidnud luminestsents-elavhõbelambid *ДРЛ*.

Välisesse ovaalsesse klaaskolbi *2* (joon. 18-7) on paigutatud kõrgrõhu-elavhõbelamp, mille silindriline kolb *1* on kvartsklaasist. Vaatamata elavhõbelampide ökonoomsusele, oli nende kasutamine raskendatud, sest nende



Joon. 18-7. Lamp ДРЛ.

spektris puudusid oranž-punased kiired. Lampides *ДРЛ* on see puudus kõrvaldatud. Oranž-punast kiirgust annab ovaalse kolvi sisepinda kattev luminofoor (*3*). See tekib elavhõbelambi ultraviolettkiirguse toimel. Nii muutub lambi spekter lähedaseks päevavalguse spektrile. Neid lampe toodetakse võimsusega 250, 500, 750 ja 1000 W.



Joon. 18-8. Lambi ДРЛ lülitusskeem.

Lambi *ДРЛ* töösse rakendamine toimub erilülituse (joon. 18-8) kohaselt, mis koosneb drosselist *Dr* ja sädelahendiga *S* impulsskontuurist. Pinge sisselülitamisel kondensaator *C* laadub läbi seleenalaldi ja voolu piirava takisti *r*. Kondensaatori pinge tõusmisel teatud väärtuseni kondensaator tühjeneb, drosseli primaarmähises tekib pingeimpulss, mis «süütab» lambi. Lambi põlemisel on pinge kondensaatoril väiksem lahendi läbilöögipingest ja lahendust ei teki.

18-3. Valgustusseadised

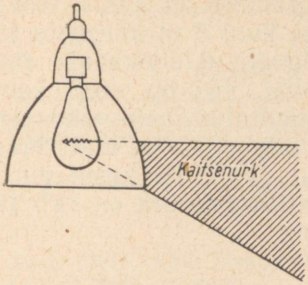
Valgustusseadised jagatakse kahte rühma: seadised lähivalgustamiseks kauguseni kuni 30 m — valgustid ja kaugvalgustusseadised — prožektorid.

Valgusti koosneb lambist ja armatuurist, mille ülesanded on järgmised: 1) ratsionaalselt jaotada valgusvoogu; 2) kaitsta silmi liigse heleduse eest; 3) kaitsta lampi vigastuste ja mustumise eest.

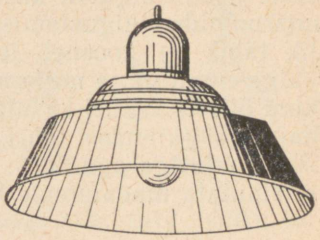
Valgusti kasuteguriks nimetatakse tema poolt kiiratava valgusvoo ja lambi valgusvoo suhet

$$\eta_v = \frac{\Phi_v}{\Phi_l}.$$

Vaatleja silma valgusallika heledate osade eest kaits-



Joon. 18-9. Valgusti kaitsenurk.



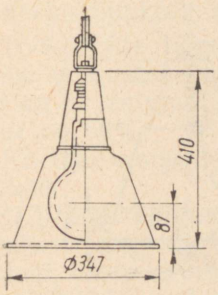
Joon. 18-10. Valgusti «Universaal».

mise määra iseloomustab kaitsenurk (joon. 18-9), mille ulatuses helendavad osad pole silmale nähtavad.

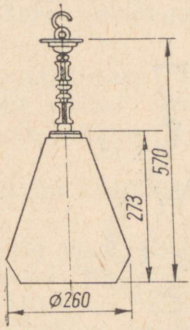
Valgustite põhilised karakteristikud on järgmised: 1) valgustugevuse jaotuskõver; 2) kasutegur η_v; 3) kaitsenurk.

Valgustid jaotatakse valgusvoo jaotuse iseloomu järgi kolme rühma: 1) otsevalgustid — klass П; 2) kaudvalgustid — klass O ja 3) hajutavad valgustid — klass P.

Otsevalgustid kiirgavad vähemalt 90% valgusvoost alumisse hemisfääri (poolkerasse). Sellesse klassi kuulub valgusti «Universaal» (joon. 18-10), mille valgustu-

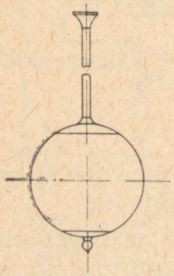


Joon. 18-11. Valgusti «Sügavkiirgaja».



Joon. 18-12. Valgusti «Lütsett».

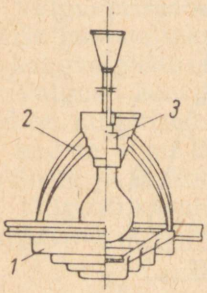
gevuse jaotuskõver (polaardiagramm) on antud joonisel 18-1. Seda valgustit kasutatakse kuni 8 m kõrguste tootmisruumide valgustamisel. Valgusti «Universaal» (tinglik tähis У) koosneb teraskuplist, mis on seest kaetud valge emailiga ja millesse on kinnitatud lamp võimsusega kuni 500 W. Vahel kasutatakse valgustit koos mattklaasist hajutiga (viimase tähis — $У_м$). Valgusti kasutegur on 70%, hajutiga aga 58%. Valgusti kaitsenurk on 14°. Teda ei riputata madalamale kui 3 m.



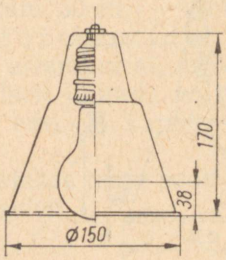
Joon. 18-13. Piimklaasist kuulvalgusti.

Samasse klassi П kuulub ka emailitud valgusti «Sügavkiirgaja» (joon. 18-11) (tähis $Г_э$), mis on arvestatud kuni 1000-vatisele lambile ja mille kasutegur on 58%, kaitsenurk 27°. Valgustit kasutatakse laialdaselt tootmisruumide valgustamiseks ja ta riputatakse 3...12 m kõrgusele.

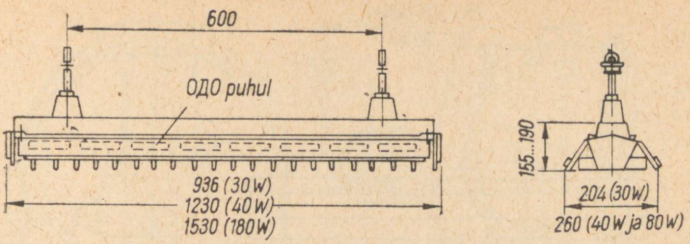
Kaudvalgustid kiirgavad vähemalt 90% valgusvoost ülemisse hemisfääri. Kujult on nad mitmesugused vastavalt otstarbele ja ruumide arhitektuurilisele kujundusele.



Joon. 18-14. CK-300-tüüpi rõngasvalgusti.



Joon. 18-15. Valgusti «Alfa».



Joon. 18-16. Kahe luminestsentslambiga ОД-, ОДР-, ОДО- või ОДОР-tüüpi valgusti.

Hajutavad valgustid kiirgavad alla 90% valgusest alumisse ja üle 10% ülemisse hemisfääri.

Nimetatud klassi kuulub laialt levinud valgusti «Lütsett» ($Л_{п}$), mis on näidatud joonisel 18-12. Ta kujutab endast piim- või mattklaasist kahekordset tüvikoonust ja on arvestatud kuni 200-vatisele lambile. Kasutegur on 75% ning kaitsenurk 36°. Niisuguseid valgusteid kasutatakse administratiiv-, ravi-, projekteerimis- või õppeasutuste, kaubandusettevõtete ja niisuguste tootmisruumide valgustamiseks, kus õhus on vähe tolmu. Nende rippkõrgus on 3 ... 5 m.

Samasse klassi kuuluvad veel piimklaasist (opaalklaasist) kuulvalgusti (joon. 18-13) ja СК-300-tüüpi rõngasvalgusti (joon. 18-14). Viimane koosneb viiest omavahel ühendatud valgust hajutavast terasrõngast *1*, kolmest ühenduskaarest *2* ja lambipesaga varustatud kerest *3*. Valgusti on värvitud valge emailvärviga. Tema kasutegur on 80%. Väikseim rippkõrgus — 2,5 m.

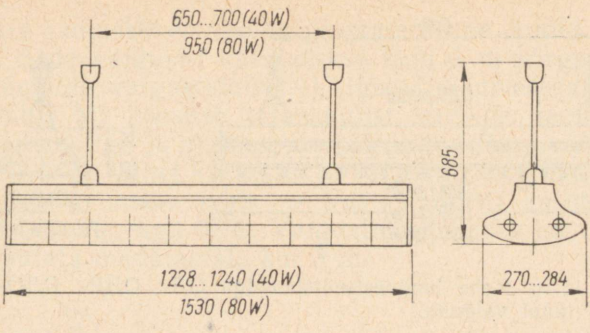
Töökohtade täiendavaks valgustamiseks kasutatakse üldise valgustuse kõrval valgustit «Alfa» (joon. 18-15). See on arvestatud kuni 75-vatisele lambile. Tema kasutegur on 50%.

Ka luminestsentslampide jaoks on kasutusel rida valgusteid.

ОД-tüüpi valgustid (joon. 18-16) on avatud emailitud metallist peegeldajaga otsevalgustid. Nagu enamik valgusteid, on ta arvestatud kahele lambile.

ОДР-tüüpi valgusti erineb ОД-tüüpi valgustist selle poolest, et tal on lampi alt kattev metallist kaitsevõre.

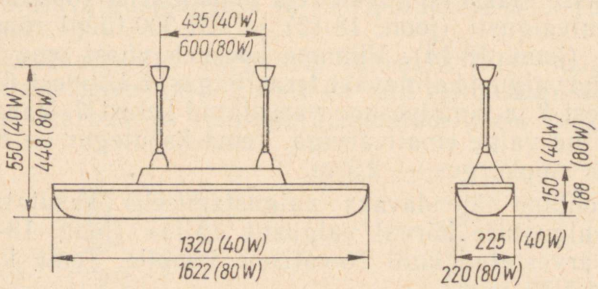
ОДО-tüüpi valgustid erinevad ОД-tüüpi valgusteist



Joon. 18-17. Kahe luminestsentslambiga ШЛД- või ШОД-tüüpi valgusti.

sellega, et neil peegeldaja ülaosas olevate pikisuunaliste avade kaudu suunatakse umbes 15% valgusvoost laele. Kui ОДО-tüüpi valgusti on valmistatud metallist kaitsevõrega, siis on tema tähis ОДОР. Tema väikseim rippkõrgus on 3,5 m.

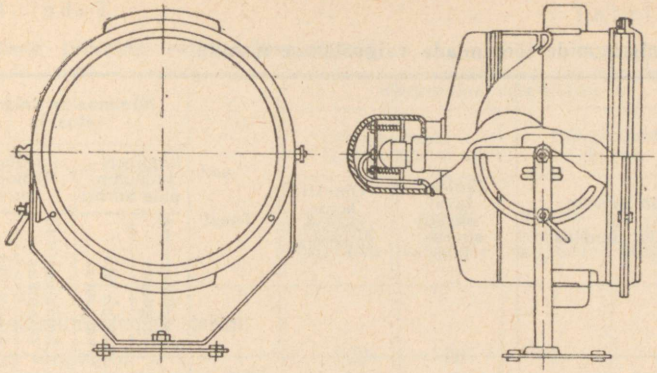
ШЛД- ja ШОД-tüüpi valgustid (joon. 18-17). Lambid on alt kaetud metallvõredega, külgedelt — opaalklaasiga, valgusti ülemises osas on pilud, mille kaudu suunatakse osa valgusvoost (üle 15%) laele.



Joon. 18-18. Kahe luminestsentslambiga ПВЛ-tüüpi valgusti.

ПВЛ-tüüpi valgusti (joon. 18-18) on hajutav valgusti. Tal on orgaanilisest klaasist hajuti, mis liibub tihedalt vastu valgusti keret ja kaitseb teda tolmu ja niiskuse eest.

Väljakute, raudteede, raudteejaamade, ehitusplatside,



Joon. 18-19. ПЗС-45-tüüpi prožektor

lahtiste ladude, trafoalajaamade jms. valgustamiseks kasutatakse prožektoreid. Joonisel 18-19 on kujutatud ПЗС-45-tüüpi prožektor. Optilise süsteemi abil koondatakse lambi valgusvoog väikesesse ruuminurka, millega saavutatakse suur valgustugevus Prožektor ПЗС-45 annab 1000-vatise võimsusega lambi korral valgustugevuse kuni 160 000 cd.

18-4. Elektrivalgustuse arvutus

Elektrivalgustuse arvutuse eesmärgiks on valgustusseadme koguvõimsuse ja iga üksiku lambi võimsuse määramine.

Arvutuste juures tuleb tingimata arvestada lubatava minimaalse valgustatuse norme (tabelid 18-3 ja 18-4).

Piisava valgustatuse tagamiseks tuleb võtta mitu valgustit, paigutades nad teineteisest kaugusele L, mis on võrdne või väiksem kahekordsest valgusti rippkõrgusest mõõdetuna tööpinnast H_r, seega

$$L \leqslant 2H_r.$$

Valgustid on soovitav paigutada kujutletavate ruutude tippudesse. Kui töökohti on ka seina ääres, siis peab olema valgustite esimese rea kaugus seinast veerand valgustitevahelisest kaugusest, vastasel juhul see kaugus suureneb kaks korda.

Valgustid riputatakse üles sellise arvestusega, et näi-

Tootmisruumide tööpindade valgustatuse normid

Töö iseloom või ruumi nimetus	Eraldatava objekti suurus mm	Objekti kontrastsus taustaga	Taust	Minimaalne valgustatus lx			
				Luminestsentslampide korral		Hõõglampide korral	
				Kombineeritud valgustus	Ainult üldvalgustus	Kombineeritud valgustus	Ainult üldvalgustus
Eriti täpne	0,1 ja väiksem	Väike	Tume	3 000	750	1 500	300
		„	Hele	2 000	750	1 000	300
		Keskmine	„	1 500	500	750	300
		Suur	„	750	300	400	150
Suure täpsusega	Üle 0,1 kuni 0,3	Väike	Tume	2 000	750	1 000	300
		„	Hele	1 000	400	500	150
		Keskmine	„	750	200	400	100
		Suur	„	500	150	300	75
Täpne	Üle 0,3 kuni 1	Väike	Tume	1 000	300	500	150
		„	Hele	750	200	400	100
		Keskmine	„	500	150	300	75
		Suur	„	400	150	200	50
Väikese täpsusega	Üle 1 kuni 10	Väike	Tume	150	150	150	50
		„	Hele	150	150	150	50
		Keskmine	„	100	100	100	30
		Suur	„	100	100	100	30
Täpsuseta	Üle 10	Sõltumata kontrastsusest ja taustast		100	100	100	30
Üldist järelevalvet nõudev töö ilma üksikosade eristamiseta		Sõltumata kontrastsusest ja taustast		75	75	—	20
Töö isehelenduvate esemetega või materjalidega		Sõltumata kontrastsusest ja taustast		150	150	—	50

Tabel 18-4

Mõnede ruumide valgustatuse normid

Ruumi või tööstusseadme nimetus	Minimaalne valgustatus lx			
	Luminestsentslampide korral		Hõõglampide korral	
	Kombineeritud valgustus	Ainult üldvalgustus	Kombineeritud valgustus	Ainult üldvalgustus
1. Metallitöötlemise tsehh:				
a) tööpingid	500	50	—	—
b) sepa- ja keevitustööd, termiline töötlemine .	1000	50	—	—
2. Katlamajad				
a) katlaruum	—	30	—	—
b) katelde esikülg . . .	150	—	—	—
c) mõõteriistad	300	—	—	—
3. Garaažid:				
a) remondi- ja profülaktikaruum	—	50	—	—
b) pesemisruum	—	20	—	—
4. Elektrijaamad ja alajaamad:				
a) lülituskilbid	—	200 . . . 100	—	—
b) transformaatorite kambrid	—	30	—	
5. Ühiselamud ja internaadid	—	100	—	50
6. Kabinetid ja kontoriruumid	—	200	—	75
7. Masinakirjutuse ja masinaarvutuse bürood, joonestussaalid	—	300	—	150
8. Auditooriumid, klassid, laboratooriumid	—	300	—	150
9. Saalid, sööklad, puhvetid	—	200	—	75
10. Trepid ja koridorid . .	—	75 . . . 50	—	20 . . . 10
11. Sanitaartehnika sõlmed .	—	75	—	30

teks tsehhi vms. sisustus ei segaks töökohtade valgustamist.

Siseruumide valgustuse arvutamisel kasutatakse tavaliselt kasuteguri meetodit. Sel juhul saadakse tööpinna ettenähtud valgustatus kui lambi otsese valgusvoo ja laelt ning seintelt peegeldunud valgusvoo liitumise tulemus.

Arvutusteks on vajalik:

1. Määrata kindlaks ruumi pindala $S = ab$, valida valgusti tüüp, rippkõrgus H_r mõõdetuna valgustatavast tööpinnast, valgustite arv n ja nende paigutus.

2. Määrata selline keskmine valgustatus E_k, et nõrgemini valgustatud kohtades oleks E_{min} võrdne või ületaks pisut normidega (tabelid 18-3 ja 18-4) antud väärtusi.

Minimaalse valgustatuse ja keskmise valgustatuse suhet nimetatakse ebaühtlusteguriks:

$$Z = \frac{E_{min}}{E_k}.$$

Ebaühtlustegurid on valgustitel järgmised: 1) emailitud «Sügavkiirgajal» — 0,9; 2) hajutiga «Universaalil» — 0,85; 3) hajutita «Universaalil» — 0,82; 4) piimklaasist kuulil — 0,87; 5) «Lütsetil» — 0,8.

Seega keskmine valgustatus

$$E_k = \frac{E_{min}}{Z}.$$

3. Varutegur k_v kindlustab suurema valgustatuse, mis on vajalik selleks, et valgusallika vananemine ja valgusallika ning ruumi lagede-seinte saastumine ei vähendaks valgustatust alla lubatava väärtuse. Ruumides, kus õhu tolmusisaldus on suur, võetakse varuteguriks 1,5, väikese tolmusisalduse korral aga 1,3.

4. Määrata ruumitegur (-indeks), kui ruumi pikkus on a ja laius b:

$$i = \frac{ab}{H_r(a+b)}.$$

5. Määrata valgustuse kasutegur η, mis võrdub valgustatavale pinnale langeva valgusvoo Φ ja lampide valgusvoo $n\Phi_l$ suhtega. See kasutegur sõltub valgusti tüübist, lae ja seinte peegeldamistegurist ja ruumitegurist.

Kasuteguri väärtused leitakse tabelist 18-5.

Tabel valgustuse kasuteguri määramiseks

Valgusti	Emailitud «Sügavkiirgaja» $Г_э$			Hajutita «Universaal» $У$			Hajutiga «Universaal» $У_м$			Piimklaasist kuul $Ш_о$				«Lütsett» $Л_ч$			
ρ_{lagi} %	30	50	70	30	50	70	30	50	70	30	50	50	70	30	50	50	70
ρ_{sein} %	10	30	50	10	30	50	10	30	50	30	30	50	50	50	30	50	50
Ruumitegur i	Kasutegur %																
0,6	24	27	31	27	30	34	19	22	26	10	12	16	17	19	21	25	27
0,8	32	34	37	35	38	41	26	28	32	14	16	20	21	25	26	31	33
1,0	36	38	40	40	42	45	30	32	35	17	19	22	24	29	31	34	37
1,25	39	41	43	44	46	48	33	35	37	19	21	24	28	31	34	38	41
1,5	41	43	46	46	48	51	35	36	40	21	23	27	30	34	37	41	44
2,0	44	46	49	50	52	55	39	40	43	24	27	30	34	38	41	45	48
2,5	48	49	52	54	55	59	42	44	46	27	29	33	37	41	45	48	52
3,0	49	51	53	55	57	60	43	45	47	28	31	35	39	44	47	51	54
4,0	51	52	55	58	59	62	45	47	49	31	35	38	43	46	50	54	59
5,0	52	54	57	57	60	63	46	48	51	32	37	40	46	48	52	56	61

Valgusti	*ОД*			*ОДР*			*ОДОР*		
ρ_{lagi} %	30	50	70	30	50	70	30	50	70
ρ_{sein} %	10	30	50	10	30	50	10	30	50
Ruumitegur i	Kasutegur %								
0,6	30	33	37	27	30	34	23	27	32
0,8	39	41	45	35	37	41	30	33	38
1,0	44	46	49	40	42	45	34	38	42
1,25	48	50	53	43	45	48	38	41	45
1,5	50	52	56	45	48	51	40	43	47
2,0	55	57	60	50	52	54	43	47	52
2,5	59	61	64	53	55	58	47	50	56
3,0	60	62	66	54	56	60	48	52	58
4,0	63	65	68	57	58	62	50	54	60
5,0	64	66	70	58	60	63	51	56	62

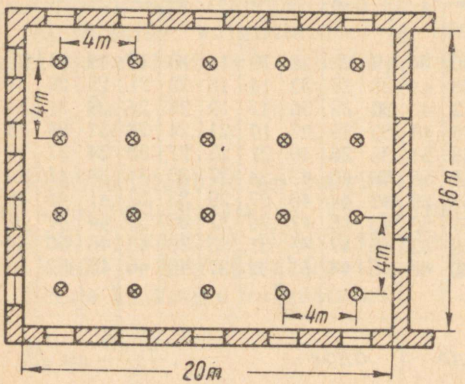
6. Ühe lambi valgusvoog määratakse valemi

$$\Phi_l = \frac{E_k S k_v}{\eta n}$$

järgi, kus n on lampide arv.

7. Lambi võimsus määratakse saadud valgusvoo väärtuse järgi, kasutades tabeleid 18-1 ja 18-2.

Näide 18-1. Arvutada valgustus tootmisruumile laiusega $a = 16$ m ja pikkusega $b = 20$ m (joon. 18-20), millel on hele lagi ja tumedad seinad. Ruum on määratud tööks detailidega 1 ... 10 millimeetrini heledal taustal.



Joon. 18-20. Valgustite paigutus.

Valgustamiseks valime hajutita «Universaali» rippkõrgusega tööpinnast $H_r = 3$ m. Tööpind asub 0,75 m kõrgusel ruumi põrandast.

Paigutame valgustid ruutude tippudesse, mille külje pikkus $L = 4$ m $< 2H_r$. Äärmiste valgustite kauguse seinast võtame $0{,}5\ L = 2{,}0$ m, sest seinte ääres töökohti ei ole. Valgustite arv $n = 20$.

Valgustatav pind $S = ab = 16 \cdot 20 = 320$ m². Normide (tabel 18-3) alusel valime minimaalse valgustatuse $E_{min} = 50$ lx. Kui võtame ebaühtlusteguri võrdseks 0,82-ga, leiame tööpinna keskmise valgustatuse

$$E_k = \frac{E_{min}}{Z} = \frac{50}{0{,}82} = 61 \text{ lx}.$$

Arvestades ruumi õhu keskmist tolmusisaldust, valime varuteguri $k_v = 1{,}4$.

Ruumitegur

$$i = \frac{ab}{H_r(a+b)} = \frac{16 \cdot 20}{3(16+20)} = \frac{320}{108} = 2{,}95.$$

Heledate lagede — peegeldustegur $\varrho_{lagi} = 50\%$ ja tumedate seinte $\varrho_{sein} = 30\%$ korral leiame ruumitegurile $i = 2{,}95$ vastava hajutita valgusti «Universaal» kasuteguri $\eta = 57\%$.

Ühe lambi valgusvoog

$$\Phi_l = \frac{E_k S k_v}{\eta n} = \frac{61 \cdot 320 \cdot 1{,}4}{0{,}57 \cdot 20} \approx 2400 \text{ lm}.$$

Võrgupinge $U = 220$ V korral leiame tabeli 18-1 järgi kõige lähedasema (suurema) valgusvooga lambi, mille $\Phi_l = 2660$ lm ja võimsus 200 W.

Selle lambi puhul keskmine valgustatus

$$E_k = 61 \cdot \frac{2660}{2400} \approx 67 \text{ lx}.$$

Valgustite koguvõimsus:

$$P = P_l n = 200 \cdot 20 = 4000 \text{ W} = 4{,}0 \text{ kW}.$$

Lihtsaimaks elektrivalgustuse arvutamise meetodiks on erivõimsuse meetod.

Erivõimsuseks nimetatakse mingi ruumi valgustusseadiste koguvõimsuse ja ruumi põrandapinna suhet, s. t.

$$P = \frac{P_l n}{S}.$$

Tabelis 18-6 on antud erivõimsuse väärtused sõltuvalt valgusti tüübist, tema rippkõrgusest, ruumi põrandapinnast ja nõutavast valgustatusest.

Leiame tabelist 18-6 erivõimsuse väärtuse ja korrutame seda ruumi põrandapinnaga, saame vajaliku lampide koguvõimsuse. Jagame leitud võimsuse lampide arvuga, saame ühe lambi võimsuse

$$P_l = \frac{PS}{n}.$$

Töövalgustuse kõrval tuleb kindlustada avariivalgustus. Ruumides, kus tööseisak on lubamatu (elektrijaamad, valu- ja martääntsehhid), tuleb ette näha avariivalgustus töö jätkamiseks avarii korral. Sel valgustussüsteemil peab olema sõltumatu toiteallikas, mis kindlustaks vähemalt 10% normaalsest valgustatusest.

Rohkem kui 50 töötajaga tootmisruumides, kus töö ajutine katkestamine on võimalik ja kus valguse puudumine võib põhjustada tööõnnetusi, peab läbikäikudes ja trepi-

Erivõimsuse normid ühtlaseks üldvalgustuseks W/m²

Valgusti tüüp	Ripp-kõrgus m	Valgus-tatus lx	Pindala m²			
			10 ... 25	25 ... 50	50 ... 150	üle 150
«Universaal» ja emailitud «Sügavkiirgaja»	3 ... 4	10	6,0	4,7	3,6	3,2
		20	10,3	7,7	5,9	5,2
		30	13,6	11	8	7
		50	21	16	12	11
		75	29	22	17	15
	4 ... 6	10	7,4	5,1	3,5	2,6
		20	13	8,7	6	4,7
		30	18	12	8,7	6,6
		50	28	19	13	10
		75	40	27	19	15
«Lütsett»	2 ... 4	10	5,8	4,6	3,7	3,2
		20	10	8	6,5	5,7
		30	14	11	8,7	7,3
		50	21	16	13	11
		75	29	21	18	15
		100	39	28	24	20
Piimklaasist kuul	2 ... 4	10	8,5	6,3	5	4
		20	15	11	8,6	6,9
		30	21	16	12	9,7
		50	32	25	20	16
		75	48	38	30	24
		100	64	50	40	32
ОД- ja *ОДР*-tüüpi valgustid lampidele *БС*	3 ... 4	75	10	6,5	5,5	4,5
		100	13	9	8	6,5
		150	19	13	11,5	9,5
		200	25	18	15,5	12,5
		300	38	26	23	19
		500	63	44	38	31
	4 ... 6	75	14,5	9	6,5	5
		100	19	12	9	7
		150	29	18,5	13,5	10
		200	38	24,5	18	13,5
		300	58	36,5	26,5	20,5
		500	95	61	44	33,5

kodades olema avariivalgustus, et inimesed saaksid ruumidest lahkuda.

Avariivalgustid võivad töötada üheaegselt töövalgustitega või nad lülituvad töövalguse kustumisel automaatselt sisse.

Näide 18-2. Arvutada valgustus näites 18-1 kirjeldatud ruumile erivõimsuse meetodil.

Valime valgusti «Universaal» rippkõrgusega $H_r = 3$ m. Kui teame keskmist valgustatust $E_k = 61$ lx ja ruumi põrandapinda $S = 320$ m, leiame tabeli 18-6 järgi vajaliku erivõimsuse 13 W/m^2.

Nõutav summaarne lampide võimsus

$$P = 13 \cdot 320 = 4160 \text{ W}.$$

Lampide arvu $n = 20$ korral on ühe lambi võimsus

$$P_l = \frac{4160}{20} = 208 \text{ W}.$$

Valime tabeli 18-1 järgi kõige lähedasema võimsusega lambi, mille võimsus $P'_l = 200$ W. Sel juhul kõigi lampide koguvõimsus

$$P' = P'_l n = 200 \cdot 20 = 4000 \text{ W}.$$

19. ELEKTRIENERGIA ÜLEKANNE JA JAOTAMINE

19-1. Üldisi andmeid elektrienergia ülekande kohta

Elektrienergiat toodetakse elektrijaamades mingi teise energialiigi muundamise teel.

NSV Liidus toodetakse suurem osa elektrienergiast võimsates riiklikes rajoonide soojuselektrijaamades (rajoonielektrijaamades) ja maailma suurimates hüdroelektrijaamades, näiteks: V. I. Lenini nimeline Volga hüdroelektrijaam võimsusega 2,3 GW, NLKP XXII kongressi nimeline Volga hüdroelektrijaam võimsusega 2,6 GW, Bratski hüdroelektrijaam võimsusega 4,5 GW jt.

Rajoonide soojuselektrijaamad ja hüdroelektrijaamad paiknevad rajoonides, kus on looduslikke energiavarusid — turvast, pruunsütt, põlevkivi, vee-energiat, ja asuvad enamasti elektrienergia tarbijatest kaugel.

Tunduvalt väiksem osa toodetavast energiast langeb teisele elektrijaamade rühmale — kohaliku tähtsusega jaamadele. Need on jaamad, mis paiknevad tarbijate vahetus läheduses. Nende hulka kuuluvad nn. soojuselektritsentraalid, mis toodavad elektri- ja soojusenergiat, tööstusettevõtete elektrijaamad, linnade ja põllumajanduslikud elektrijaamad jt. Nende võimsused on palju väiksemad ulatudes kümnest tuhandest kilovatist sadade või kümnete kilovattideni.

Kõik rajoonielektrijaamad, soojuselektritsentraalid ja suurem osa kohaliku tähtsusega elektrijaamadest annavad kolmefaasilist voolu.

Mõningate tööstusharude, näiteks elektrokeemia, elektrometallurgia, ja elektrifitseeritud transpordi alalisvoolu vajadus rahuldatakse kolmefaasilise voolu muundamise

teel alalisvooluks muundusalajaamades, mis on varustatud alalditega.

Väikese võimsusega kohaliku tähtsusega jaamad töötavad enamasti iseseisvalt, olemata ühendatud teiste jaamadega.

Suurem osa elektrijaamadest aga ühendatakse omavahel koostöö (rööptalitluse) eesmärgil. Selliseid ühendusi nimetatakse *energiasüsteemideks*.

Energiasüsteemil on soodsam töögraafik, s. t. tema suhtelised koormuse muutused on väiksemad kui üksikutel jaamadel. Jaamade ühendatud töö korral on võimalik ratsionaalsemalt jaotada koormust jaamade vahel ja tunduvalt vähendada varuagregaatide võimsust. Energiasüsteem võimaldab alandada elektrienergia omahinda ja vähendada hüdroelektrijaamade täielikuma kasutamise teel kütusekulu. Elektrijaamade ühendamine energiasüsteemidesse on nõukogude energeetika arengu iseloomulikuks jooneks.

Naaberrajoonide energiasüsteemid arenevad ja ühinevad samuti. Nad ühendatakse omavahel kõrgepinge-elektriülekandeliinide abil, nii et nad moodustavad võimsad ühendatud energiasüsteemid. Näiteks loodi Moskva, Gorki, Ivanovo ja Jaroslavli energiasüsteemide ühendamisega Keskrajooni ühendatud energiasüsteem.

Praegusel arenguetapil toimub edasine energiasüsteemide ühendamine ühtse kõrgepingevõrgu abil NSV Liidu ühtseks energiasüsteemiks.

Pärast V. I. Lenini nimelise hüdroelektrijaama, NLKP XXII kongressi nimelise Volga hüdroelektrijaama ning esimeste ühtse kõrgepingevõrgu lülide käikulaskmist, mis ühendasid nimetatud Volga hiigelelektrijaamad keskpiirkondade, kesk-mustmullapiirkonna, lõunapiirkondade ja Uraali energiasüsteemidega, on loodud NSV Liidu ühtse energiasüsteemi Euroopa osa esimene järk.

Käesoleval seitseaastakul hoogustuvad tööd ka Kesk-Siberi ühtse energiasüsteemi loomisel Irkutskist Novosibirskini, milles etendavad tähtsat osa Bratski ja Krasnojarski hüdroelektrijaamad.

1970. aastaks ühendatakse Kesk-Siberi ühtne energiasüsteem NSV Liidu Euroopa osa ühtse energiasüsteemiga ja nii tekib NSV Liidu ühtne energiasüsteem. Selle süsteemi loomine ja arendamine tagab mitmesuguste energeetiliste ressursside ja energeetikaseadmete parima ärakasu-

tamise ning Nõukogude Liidu rahvamajanduse energeetilise baasi parima manööverdusvõime ja ökonoomsuse.

Tööstuslikke väikesevõimsuselisi elektrienergia tarbijaid (mootoreid) valmistatakse nimipingetele 220, 380 ja 660 V, aga võimsuse korral üle 70 kW pingetele 3, 6 ja 10 kV.

Enamik majapidamises kasutatavatest tarbijatest valmistatakse nimipingele 110, 127 või 220 V.

Seega on tööstusettevõtete, linnade ja kolhooside madalpingevõrkude põhilisteks pingeteks 220, 380 ja 660 V.

Väikesevõimsuselised kohaliku tähtsusega jaamad, mis paiknevad tarbija lähedal, töötavad samal pingel mis tarbijagi (220, 380 või 660 V), s. t. energia ülekanne toimub transformeerimiseta.

Suurema võimsusega kohaliku tähtsusega jaamad töötavad pingetel 3, 6 või 10 kV. Osa nende jaamade energiast suunatakse vahetult kõrgepingelistesse tarbijatesse, millel on sama nimipinge. Teine osa energiast antakse edasi tarbija rajooni 127-, 220-, 380- või 660-voldise pingega võrgu kaudu.

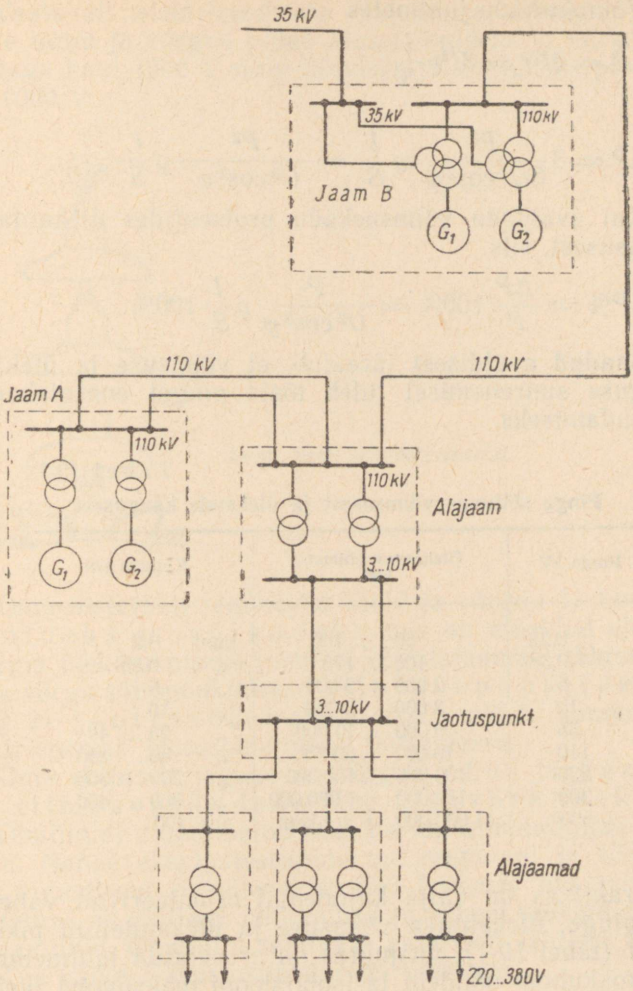
Energia ülekandmisel rajooni soojuselektrijaamadest ja osaliselt ka soojuselektritsentraalidest generaatorite nimipingega 10 või 15 kV suunatakse energia pinget tõstvatesse trafoalajaamadesse. Pärast pinge tõstmist alajaamas 35, 110, 220, 330 või 500 kilovoldini suunatakse energia mööda kõrgepingeliine tarbimisrajooni pinget 6 või 10 kilovoldini madaldavatesse alajaamadesse. Seejärel suunatakse energia osalt mööda 6- või 10-kilovoldise pingega võrku kõrgepingelistesse tarbijatesse, osalt aga pinget 6 või 10 kilovoldilt 220 või 380 voldini madaldavatesse alajaamadesse, kust ta juhitakse mööda 220- või 380-voldise pingega võrku tarbijatesse.

Joonisel 19-1 on kujutatud üks võimalikest elektrienergia ülekande skeemidest. Toodud on ühejooneline skeem, s. t. ülekandeliini kolm faasi on kujutatud ühe joonega.

Ülekandeliinide pinged valitakse sellise arvestusega, et energia edasikandmine toimuks väikeste kadudega vähima ülekande maksumuse ja vähima juhtmematerjalide kulu juures.

Kolmefaasilist liini mööda ülekantav võimsus (vt. paragrahve 6-4 ja 6-5)

$$P = \sqrt{3}\, UI \cos \varphi.$$



Joon. 19-1. Elektrienergia ülekande ja jaotuse skeem.

Võimsuskadu juhtmetes

$$\Delta P = 3I^2 r = 3I^2 \varrho \frac{l}{S}$$

ehk

$$\Delta P = 3 \frac{P^2}{3U^2 \cos^2 \varphi} \varrho \frac{l}{S} = \frac{P^2}{U^2 \cos^2 \varphi} \varrho \frac{l}{S}.$$

Kui avaldada võimsuskadu protsentides ülekantavast võimsusest, siis

$$\Delta P\% = \frac{\Delta P}{P} 100\% = \frac{P}{U^2 \cos^2 \varphi} \varrho \frac{l}{S} 100\%.$$

Saadud avaldisest järeldub, et võimsuse ja ülekande kauguse suurenemisel tuleb tõsta pinget energiakadude vähendamiseks.

Tabel 19-1

Pinge sõltuvus võimsusest ja ülekande kaugusest

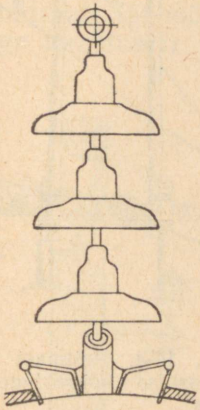
Pinge kV	Ülekantav võimsus kW	Kaugus km
0,22	50 100	kuni 0,2
0,38	100 ... 175	„ 0,35
6	2 000 ... 3 000	„ 5
10	3 000 ... 5 000	„ 10
35	5 000 ... 10 000	„ 25 ... 40
110	10 000 ... 50 000	„ 50 ... 150
220	100 000 ... 150 000	„ 200 ... 300
300	150 000 ... 1 000 000	„ 300 ... 400
500	1 000 000 ja rohkem	üle 400

Praktikas on välja kujunenud orienteerivad vahekorrad pinge, ülekantava võimsuse ja ülekandeliini pikkuse vahel (tabel 19-1), kusjuures on arvestatud juhtmematerjali kokkuhoiu nõudeid ja isolatsiooni maksumust ülekandeliini pinge suurendamisel.

19-2. Elektriliinid ja -võrgud

Elektrienergia antakse edasi juhtmetesüsteemi kaudu, mida nimetatakse elektriliiniks, kui juhtmetesüsteem ei hargne, või elektrivõrguks, kui süsteem hargneb.

Vastavalt elektriseadmete ehituse eeskirjadele jagatakse liinid ja võrgud pinge alusel liinideks ja võrkudeks pingega kuni 1000 V ning liinideks ja võrkudeks pingega üle 1000 V.



Joon. 19-2. Rippisolaatorid.

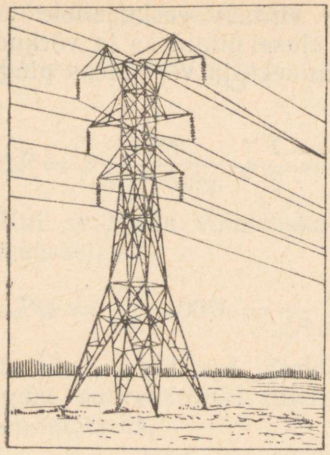
Oma otstarbelt jagunevad liinid ja võrgud 1) toiteliinideks ja -võrkudeks, mis on mõeldud elektrienergia ülekandmiseks jaamast või alajaamast tähtsaimatesse võrgu sõlmpunktidesse — jaotuspunktidesse, ning 2) jaotusvõrkudeks, mida mööda suunatakse elektrienergia jaotuspunktidest tarbijatesse.

Oma ehituselt jagunevad võrgud õhu- ja kaabliehk allmaavõrkudeks ning sisevõrkudeks.

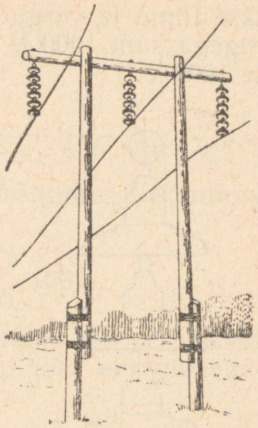
Õhuliinide rajamine on odavam kui allmaaliinide rajamine. Nende ekspluateerimine on mugavam ja lihtsam, sest vigastused on ülevaatamisel kergesti avastatavad. Seejuures on nad aga ohtlikumad ja vähem töökindlad kui allmaaliinid. Õhuliinid rajatakse peamiselt lahtisel maastikul ja väikese asustustihedusega paikades.

Õhuliin koosneb kolmest põhilisest osast: juhtmetest, isolaatoritest ja mastidest. Juhtmed kinnitatakse isolaatorite külge, viimased omakorda mastidele.

Õhuliinidel, s. t. elektriülekandeliinidel pingega 35 ... 500 kV, on paljad alumiinium- või terasalumiiniumjuhtmed, rippisolaatorid (joon. 19-2) ja metall- või raudbetoonmastid (joon. 19-3). Juhtmed peavad olema piisava mehhaanilise tugevusega. Nad peavad olema üksteisest



Joon. 19-3. Metallmast kahe 110-kilovoldise kolmefaasilise liini jaoks.

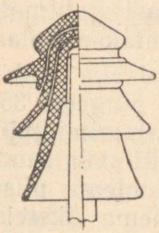


Joon. 19-4. Puitmast kolmefaasilise kõrgepingeliini jaoks.

niivõrd kaugel, et tuule käes kõikumise korral oleks välistatud juhtmetevahelise õhuvahe läbilöögi võimalus. Mastide tippudesse kinnitatakse maandatud tsingitud terastrossid, mis võtavad vastu atmosfääri elektrilahendusi ja juhivad elektrilaengud maasse.

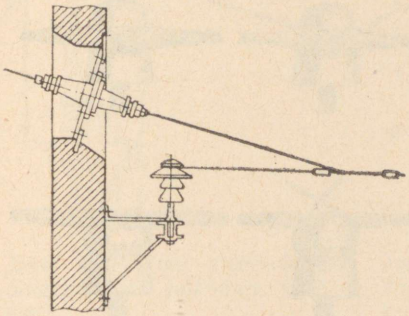
Õhuliinide puhul pingega 110 kV ja vähem kasutatakse vahel puitmaste (joon. 19-4). 35-kilovoldise ja madalama pingega ülekandeliinides kasutatakse rippisolaatorite asemel vardale või konksule kinnitatud tugiisolaatoreid (joon. 19-5).

Joonisel 19-6 on näidatud elektriliini sisestus hoonesse portselanist läbiviikisolaatori kasutamisega.



Joon. 19-5. Vardale kinnitatud tugiisolaator pingele 35 kV.

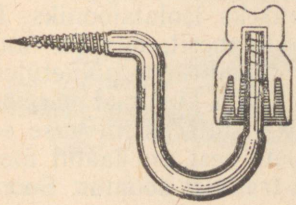
Kuni 1000-voldise pingega õhuliinide jaoks kasutatakse peamiselt alumiiniumjuhtmeid. Suure mastidevahelise kauguse korral asendatakse alumiiniumjuhtmed, mehhaanilist tugevust arvestades, terasalumiiniumjuhtmetega (näiteks AC-16 marki juhtmega, milles on seitse alumiiniumtraati läbimõõduga 1,8 mm ja üks sama läbimõõduga terastraat).



Joon. 19-6. Elektriliini sisestus hoonesse.

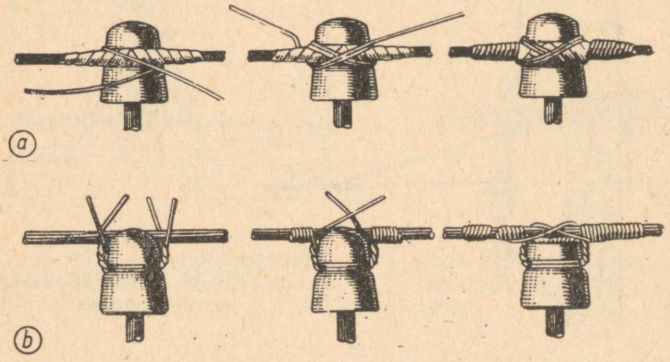
Juhtmed kinnitatakse portselanist madalpingeisolaatoritele (tüüp ТФ, joon. 19-7), mis on keeratud kas konksu vardakujulisele osale või vardale. Viimase abil kinnitatakse isolaator masti külge. Alumiiniumjuhtmete ristlõige ei tohi olla alla 16 mm^2. Juhtmed kinnitatakse isolaatori kaelale (joon. 19-8, *a*), harvemini ta peale (joon. 19-8, *b*) pehme tsingitud, umbes 1 mm läbimõõduga raudtraadi abil.

Kuni 1000-voldise pingega liinide jaoks kasutatakse puitmaste — umbes 9 m pikkusi poste. Masti alumine osa võib moodustada postiga ühtse terviku või ka eraldi osa. Viimasel juhul kinnitatakse posti alumine ots raudbetoo-



Joon. 19-7. Konksule kinnitatud ТФ-tüüpi portselanist madalpingeisolaator.

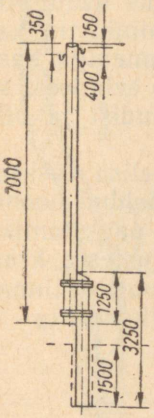
nist või harvemini puidust jalandi külge (joon. 19-9). Posti alumine osa ühendatakse jalandiga tugiköidise abil, mis valmistatakse umbes 4 mm läbimõõduga tsingitud terastraadist 6 ... 8 keerulisena. Kaugus mastide vahel on 30 ... 80 m. Juhtmete kõrgus peab maast olema vähemalt 5 m, juhtmetevaheline kaugus aga kuni 250-voldise pinge korral vähemalt 30 cm.



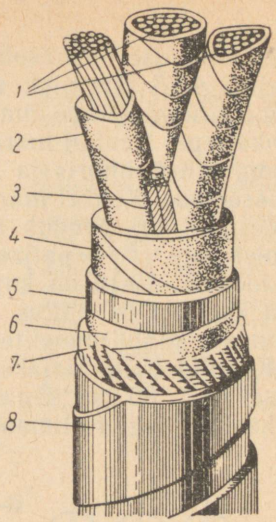
Joon. 19-8. Juhtmete kinnitamine.
a — isolaatori kaelale; *b* — isolaatori peale.

Kaabelliine kasutatakse linnades, suure asustustihedusega maakohtades, tööstusettevõtete territooriumidel ja tehasesisestes võrkudes. Kaablid koosnevad voolu juhtivatest kaablisoontest, isolatsioonist, hermeetilisest ümbrisest ja välisest kaitsekattest. Valmistatakse ühe-, kahe-, kolme- ja neljasoonelisi kaableid. Kaablisooned tehakse vasest või alumiiniumist ja neil on ümar või sektorikujuline ristlõige. Kaableid valmistatakse soonte ristlõikega 1 ... 240 mm^2 (1; 1,5; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25 jne.) pingetele kuni 1000 V ja ka pingetele 3, 6, 10 ja 35 kV.

Kaabli isoleeriv kate on mõeldud kaablisoonte endi ning kaablisoonte ja maa vaheliseks isolatsiooniks. Isoleermaterjalina kasutatakse kaablipaberit, mis on immutatud õli ja kampoli seguga, kummit ja polüetüleeni. Pliist, alumiiniumist, plastikaadist või kummist hermeetiline ümbris on mõeldud kaabli kaitsmiseks niiskuse eest. Kaitseks mehhaaniliste kahjustuste eest on kaabli ümber kahest teraslindist või tsingitud traadist soomus. Soomus



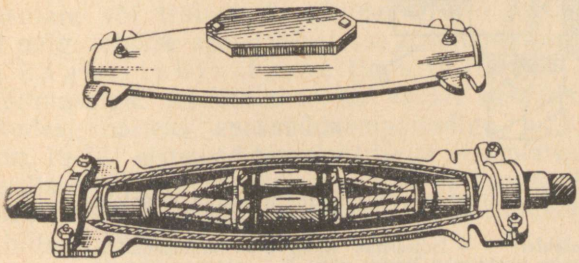
Joon. 19-9. Kuni 1000-voldise pingega liini jalandiga puitmast.



Joon. 19-10. Kolmesooneline kaabel *СБГ*.

1 — kaablisoon; *2* — soonte paberisolatsioon; *3* — täidis; *4* — paberist võõisolatsioon; *5* — pliikate; *6* — bituumeniga immutatud paberkate; *7* — kaablipunutis; *8* — kahest teraslindist soomus.

või kaablikate on kaetud kaitseks keemiliste mõjutuste eest bituumeniga immutatud džuudist punutisega. Kaablite markeering näitab ära kaablisoonte hermeetilise ümbrise materjalid ning kaitsekatte tüübi. Alumiiniumist kaablisooni tähistab täht *А*, mis seisab markeeringus esimesel kohal. Vasest kaablisooni ära ei märgita. Hermeetilise ümbrise materjal näidatakse ära järgmiste tähtedega: *С* — plii; *А* — alumiinium. Täht *Б* viitab teraslin-

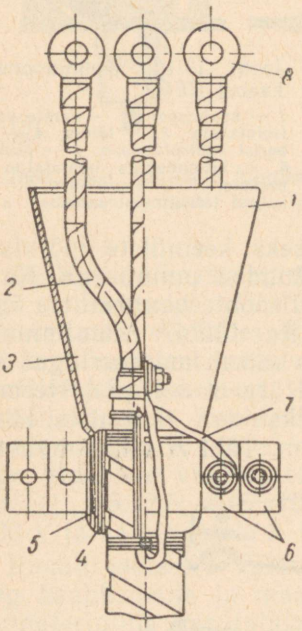


Joon. 19-11. Malmmuhv kaabliotste ühendamiseks.

tidest soomuse olemasolule. Näiteks tähistab kaabli markeering *ААБ* järgmist: alumiiniumist kaablisoon, alumiiniumist hermeetiline ümbris ja terassoomus džuut-bituumenkattega. Kaablil margiga *АСБ* on alumiiniumist kaablisoon, pliist ümbris ja džuudi ning bituumeniga kaetud terassoomus. Kaabel margiga *АСБГ* erineb eelmisest selle poolest, et tal puudub terassoomusel džuudist ja bituumenist kate (*Г* — paljas).

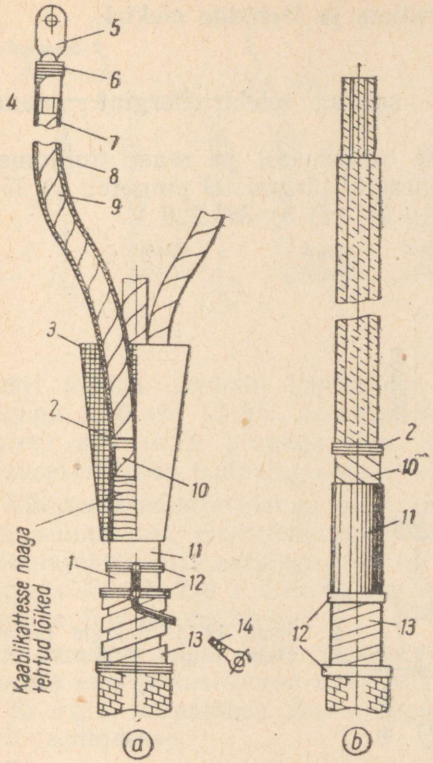
Joonisel 19-10 on kujutatud kolmesoonelise vasksoontega kaabli *СБГ* ehitus. See kaabel on mõeldud hoonetes asuvaisse kaablitunnelitesse ja -kanalitesse paigutamiseks.

Kaablid paigaldatakse 25...50 cm laiustesse kraavidesse 70...80 cm sügavusele maasse. Suurtes linnades on kaablid sageli allmaakoridorides — kollektorites.



Joon. 19-12. Kolmesoonelise kaabli otsamine teraslehtriga.

1 — teraslehter; *2* — isoleeritud soon; *3* — bituumentäidis; *4* — vaiguga immutatud lindist alus; *5* — vaiguga immutatud lindist bandaaž; *6* — kinnitusklamber; *7* — maandusjuhe; *8* — kaabliking.



Joon. 19-13. Kaabli otsamine epoksüüdkompaundiga.

a — üldvaade; *b* — astmeline isolatsioonist vabastamine; *1* — külge joodetud maandusjuhe; *2* — puuvillpunutisest bandaaž; *3* — epoksüüdkompaund; *4* — vitselpaelast mähis; *5* — kaabliking; *6* — sidumisnöörist bandaaž; *7* — kaablisoon; *8* — kompaundiga kaetud vitselpaelast mähis; *9* — faasiisolatsioon; *10* — vööisolatsioon; *11* — pliist kaablikest; *12* — terasbandaaž; *13* — kaabli soomus; *14* — otsatud maandusjuhe.

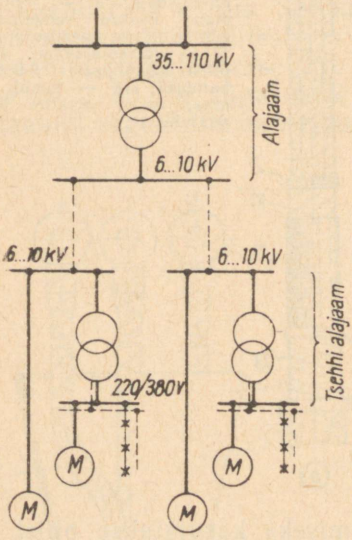
Kaablite otsade ühendamiseks kasutatakse pliist või malmist kaablimuhve (joon. 19-11), mis valatakse täis kaablimassi. Kasutatakse ka muhvideta kaablite ühendusi.

Kaablite otsad, mis ühendatakse elektriaparaatide, -masinate või trafode klemmidega, n.-ö. otsatakse, s. t. nad paigutatakse spetsiaalsetesse otsmuhvidesse või terasest kaablilehtritesse (joon. 19-12), mis täidetakse kaablimassiga. Kasutatakse ka «kuivi otsamisi». Tehisvaikudest, näiteks epoksüüdkompaundiga otsamised (joon. 19-13) erinevad teraslehtritega otsamistest hea hermeetilisuse, suure läbilöögitugevuse ja montaaži lihtsuse poolest. Neid kasutatakse kuni 10-kilovoldise pingega kaablite puhul.

19-3. Tööstusettevõtete ja tsehhide elektrivarustus

Tööstusettevõtted saavad elektrienergiat enamasti enegiasüsteemist.

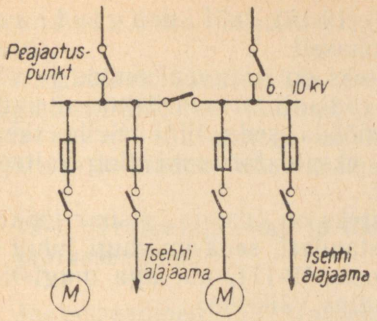
Sõltuvalt ettevõtte võimsusest ja reast tingimustest antakse talle elektrienergiat järgmistel pingetel: 1) 35 või 110 kV; 2) 3, 6 või 10 kV või 3) 380/220 V.



Joon. 19-14. Energia jaotamise skeem suures tööstusettevõttes.

Esimesel juhul antakse pinge ettevõtte pinget madaldavale alajaamale, kus ta transformeeritakse 35 või 110 kilovoldilt 6 või 10 kilovoldile (joon. 19-14). Selle pingega antakse elektrienergia tavaliselt tehase territooriumil paiknevate kaabelliinide kaudu tsehhide alajaamadesse. Nende alajaamade 6- või 10-kilovoldise pingega kogumislattidega ühendatakse kaabelliinid kõrgepingeliste elektrimootorite toitmiseks ja trafod, mis madaldavad pinget 380/220 voldini, millise pingega energia jaotatakse tsehhi madalapingeliste tarbijate vahel.

Teisel juhul jõuab energia esmalt ettevõtte peajaotuspunkti, mis on mõeldud energia vastuvõtmiseks ja jaotamiseks (joon. 19-15). Energia suunatakse peajaotus-



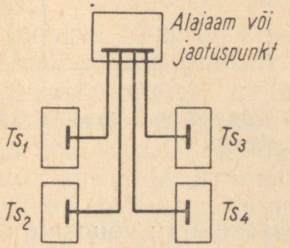
Joon. 19-15. Elektrienergia jaotamise skeem ettevõtte jaotuspunktis.

punkti mööda üht-kaht kaabelliini (harvemini õhuliini) pingega 3, 6 või 10 kV. Jaotuspunktist väljub tavaliselt suurem arv sama pingega liine, mida mööda energia antakse tsehhide trafoalajaamadesse.

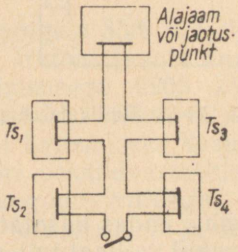
Väiksemates ettevõtetes, kus pole kõrgepingelisi tarbijaid, suunatakse elektrienergia energiasüsteemist tehase trafoalajaama primaarpingega 6 või 10 kV ja sekundaarpingega 380 või 220 V. Sekundaarpingega energia antakse tsehhide jaotuspunktidesse.

Kolmandal juhul saab väikese seadmete võimsusega ettevõte energiasüsteemist elektrienergiat pingel 380/220 V. Energia suunatakse madalpingelisse jaotuspunkti ja sealt tsehhidesse.

Energia jaotamine tööstusettevõtete peajaotuspunkti või trafoalajaama ja tsehhide jaotuspunktide vahel toimub



Joon. 19-16. Elektrienergia tsehhidele jaotamise radiaalskeem.



Joon. 19-17. Elektrienergia tsehhidele jaotamise magistraalskeem.

kas radiaal- (joon. 19-16) või magistraal-skeemi (joon. 19-17) kohaselt.

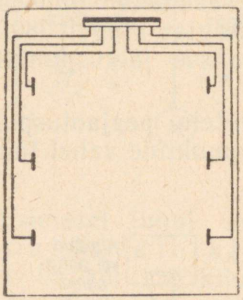
Radiaalskeemi puudusteks on suur maksumus ja väiksem töökindlus, sest ühe radiaalliini avarii korral katkeb elektrienergia ülekanne mööda seda liini. Selle skeemi eeliseks tuleb aga pidada ekspluatatsiooni ning kaitse ja automatiseerimise lihtsust.

Magistraalskeemi eelisteks on odavus ja suur töökindlus elektrienergiaga varustamisel, seda muidugi juhul kui magistraal on suletud (joon. 19-17), kui aga magistraal on katkestatud, on töökindlus väiksem.

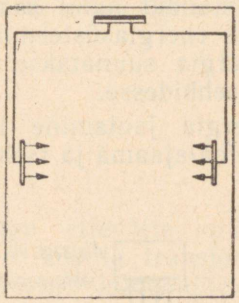
Ettevõtetes, kus on tegu suure tähtsusega tarbijatega, kasutatakse elektrienergiaga varustatuse kindlamaks tagamiseks magistraalskeeme nende toitmisega kahest kohast, erinevatest trafodest (alajaamadest).

Selleks et vältida elektrimootorite käivitamisega seotud pinge kõikumisi lampidel, kasutatakse liinide ja võrkude jaotamist valgustus- ning jõuliinideks ja -võrkudeks.

Toiteseadme pinge 380/220 V korral ühendatakse mootorid liinijuhtmetega (380 V), lambid aga lülitatakse nulljuhtme ja liinijuhtmete vahele (220 V).



Joon. 19-18. Radiaalskeem.



Joon. 19-19. Astmeline radiaalskeem.

Tsehhis endas kasutatakse väikese arvu võimsate mootorite puhul radiaal-toiteskeemi (joon. 19-18), mille puhul tsehhi kilbilt (jaotuspunkt) läheb iga mootorini eraldi liin. Suure arvu väikeste mootorite korral lähevad liinid tsehhi jaotuspunktist osakondade jaotuspunktidesse, millega on

ühendatud liinid üksikute tarbijate toitmiseks (joon. 19-19).

Laialdaselt kasutatakse tsehhides lihtsat ja odavat magistraalliini, mis koosneb paljastest lattidest (l a t t - j u h t m e s t i k), millega on kogu ta ulatuses võimalik vajalikes kohtades vahetult ühendada tarbijad.

19-4. Trafoalajaamad ja tööstusettevõtete jaotusseadmed

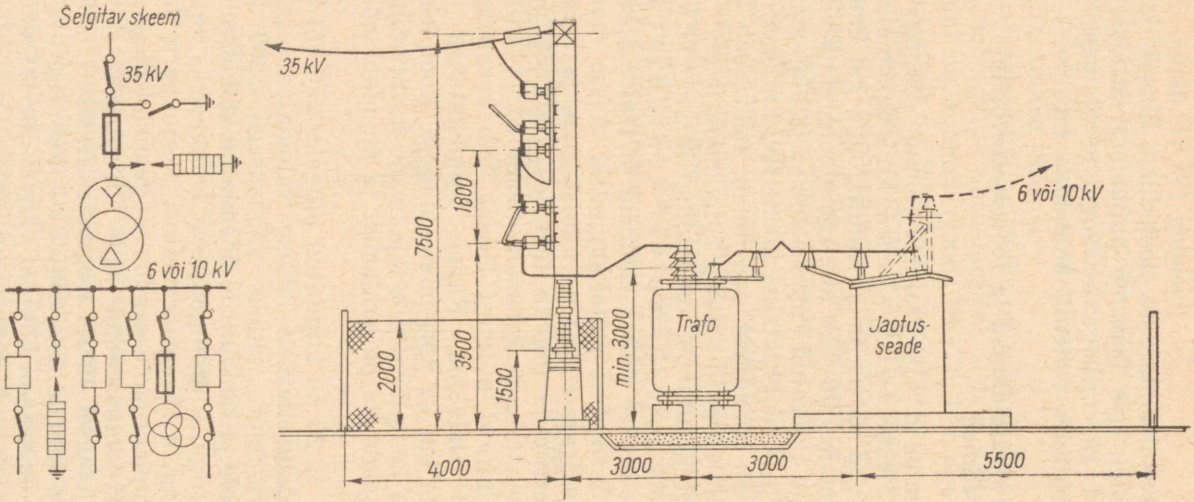
Jaotusseadmed ja trafoalajaamad pingega 35 või 110 kV ehitatakse l a h t i s t e n a. Kõik nende elektriseadmed paiknevad vabas õhus. Ainult juhul, kui õhus leidub elektriseadmeile kahjuliku toimega aineid, ehitatakse nimetatud pingele määratud jaotusseadmed ja alajaamad k i n n i s t e n a, s. o. paigutatakse hooneisse. Lahtised seadmed ja jaamad on kinnistest odavamad, neid saab kiiremini ehitada ja kulub palju vähem ehitusmaterjale.

Laialdast kasutamist on leidnud k o m p l e k t - j a o t u s s e a d m e d ja k o m p l e k t - t r a f o a l a j a a m a d. Nii nimetatakse jaotusseadmeid ja trafoalajaamu, mis koosnevad üksikutest metallkappidest neisse monteeritud elektriseadmetega. Kappide valmistamine ja neisse seadmete monteerimine toimub tehastes. Neid valmistatakse kindla nomenklatuuri kohaselt. Seadmed ja lülitusskeem on valitud nii, et mitmest kapist võib koostada jaotusseadme- või alajaama. Kappe valmistatakse nii kuni 500-voldisele kui ka kõrgemale pingele. Komplekt-jaotusseadmete ja komplekt-trafoalajaamade kasutamine kiirendab elektriseadmete paigaldamist ja muudab seda odavamaks.

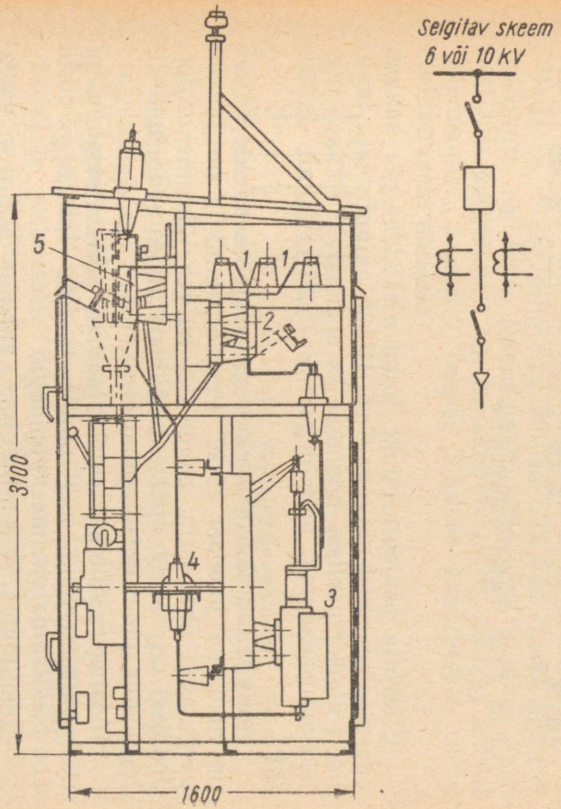
Joonisel 19-20 on kujutatud pingele 35/6 või 35/10 kV mõeldud tööstusettevõtte lahtise trafoalajaama ehitus.

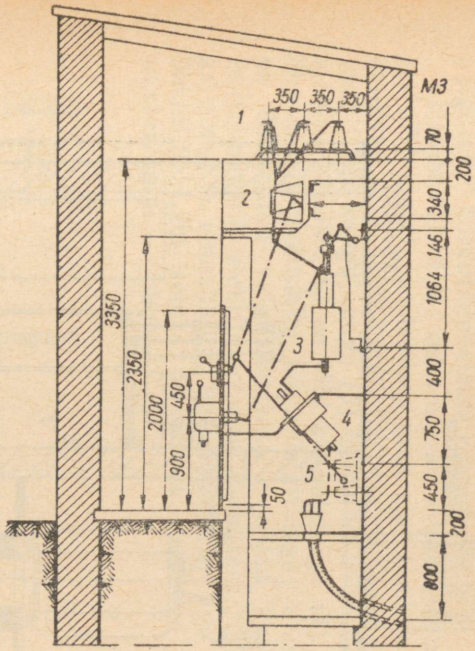
Transformaator, näiteks võimsusega 3200 kVA, on läbi kaitsmete ja lahklülitite ühendatud 35-kilovoldise pingega õhuliiniga. Liigpingete eest kaitsmiseks kasutatakse ventiil-lahendeid. Transformaatori sekundaarmähis ühendatakse komplekt-jaotusseadme kogumislattidega.

Komplekt-jaotusseadme kapi lülitusskeem ja läbilõige on toodud joonisel 19-21. Kogumislattidest *1* kulgeb vool läbi vastava lahklüliti *2*, õlilüliti *3*, voolutrafo *4* ja liinilahklüliti *5* kaabli või õhuliini väljastusse ja edasi mööda liini tsehhialajaama kogumislattidesse.



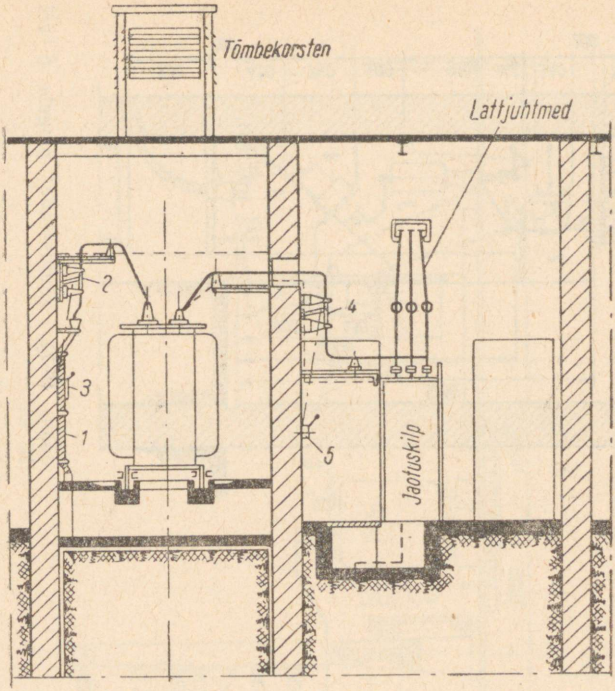
Joon. 19-20. Lahtine trafoalajaam pingele 35/6 või 35/10 kV.





Joon. 19-22. Jaotusseade pingele 6 või 10 kV.

◀ Joon. 19-21. Vabaõhu komplekt-jaotusseadme kapp õlilüliti ja kaabel- või õhuliinväljastusega.



Joon. 19-23. Tsehhi trafoalajaam.

Ettevõtte peajaotuspunkt, kuhu elektrienergia saabub energiasüsteemist pingega 6 või 10 kV, paigutatakse tavaliselt ühekorruselisse hoonesse ja sisustatakse kas komplektjaotusseadmete kappidega või monteeritavate lahtritega.

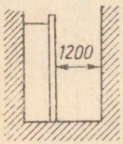
Monteeritud konstruktsiooniga peajaotuspunkti ehitus on näidatud joonisel 19-22. Peajaotuspunktis on lahtrid paigutatud ühte ritta, nende ees kulgeb juhtimiskoridor. Joonisel on vastav aparatuur tähistatud samade numbritega, mis on eelmisel joonisel.

Tööstusettevõtete tsehhialajaamad sisustatakse nagu peajaotuspunktidki kas monteeritavate lahtritega või komplekttrafoalajaama kappidega.

Tsehhialajaama ehitus on näidatud joonisel 19-23.

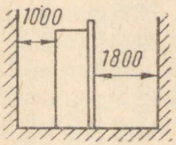
Trafo pingele 6 kV/380 V või 6 kV/220 V ja jaotuskilp on paigutatud kõrvutiolevatesse ruumidesse.

Kambri alumises osas olevad avad ja kanalid (joonisel näitamata) ja ülemises osas olev tõmbekorsten kindlustavad trafo jahutamise. Energia juhitakse trafosse läbi kaabli *1* ja kangajamiga (*3*) lahklüliti *2*. Trafo sekundaarmähise väljastused on läbi kangajamiga (*5*) lahklüliti *4* ühendatud jaotuskilbi kogumislattidega. Viimaste külge on ühendatud valgustamiseks mõeldud kaabelliinid ja lattjuhtmestik elektrimootorite toitmiseks. Igal liinil on kaitsmed ja vinnaklüliti, lattjuhtmestikul aga automaatne õhklüliti. Läbi seinas oleva ava kulgevad lattjuhtmed naaberruumi — tsehhi.



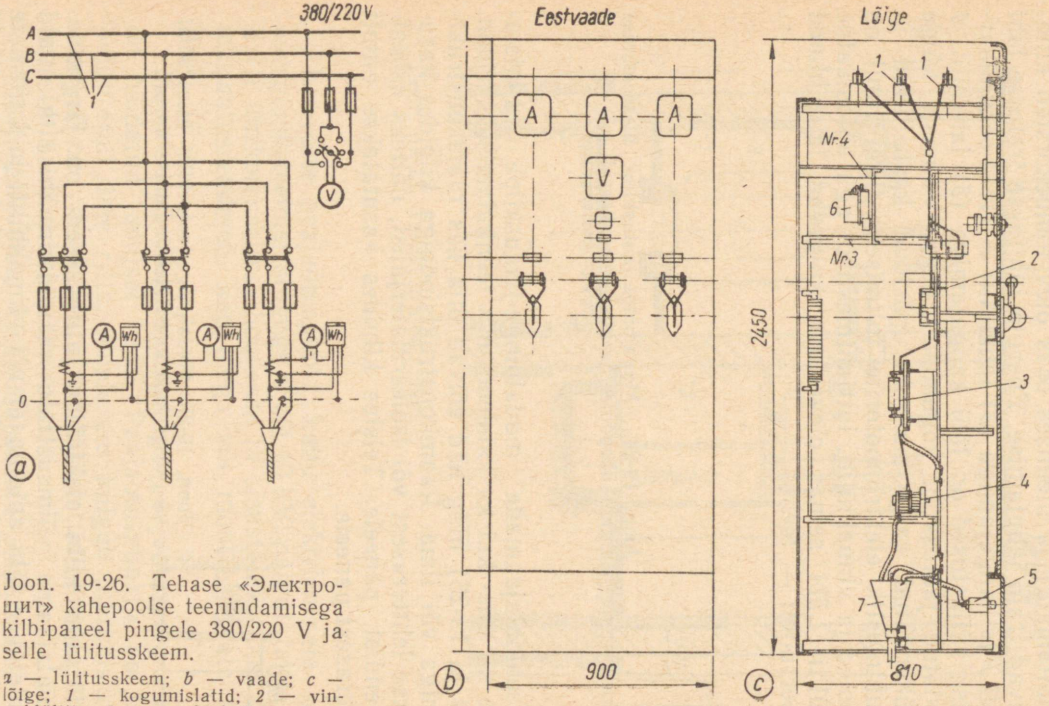
Joon. 19-24. Madalpinge-jaotuskilbi ülesseadmise skeem ühepoolse teenindamise korral.

Tsehhialajaamade madalpinge-jaotuskilpe valmistatakse nii ühe- kui ka kahepoolseks teenindamiseks (joon. 19-24 ja 19-25) ning nad võivad olla kas raamkonstruktsiooniga või ilma. Raamkonstruktsiooniga kilpides kasutatakse lehtterasest või isoleermaterjalist, näiteks asbesttsemendist, paneele. Teistes kilpides kasutatakse ainult lehtterasest paneele.



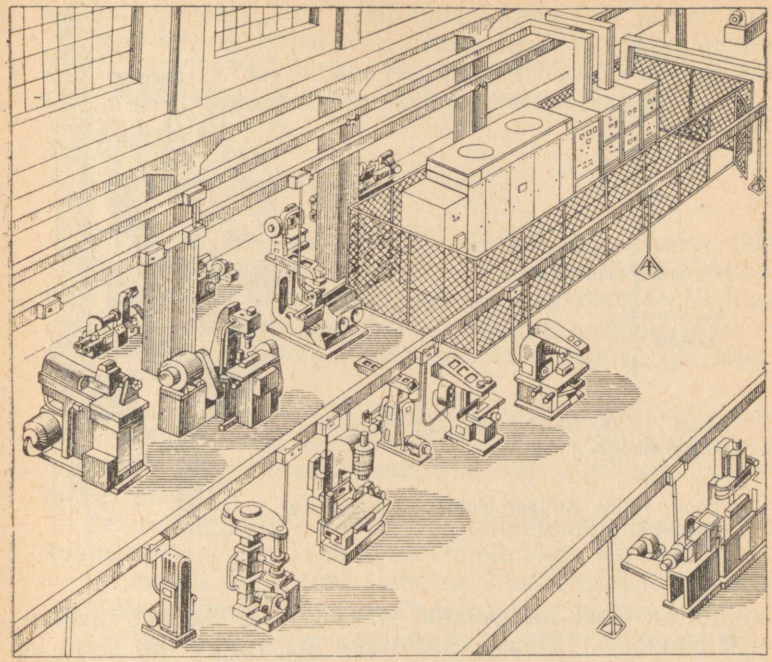
Joon. 19-25. Madalpinge-jaotuskilbi ülesseadmise skeem kahepoolse teenindamise korral.

Lihtsaim kilbi elektriline lülitusskeem on järgmine: tsehhialajaama võimsustrafo sekundaarmähise klemmid ühendatakse läbi automaadi või vinnaklüliti ja kaitsmete kilbi kogumislattidega. Viimastelt saavad alguse liinid tarbijate toitmiseks, mille alguses on vinnaklülitid ja kaitsmed. Mõõtmisteks kasutatakse kilbi kogumislattidega



Joon. 19-26. Tehase «Электрощит» kahepoolse teenindamisega kilbipaneel pingele 380/220 V ja selle lülitusskeem.

a — lülitusskeem; *b* — vaade; *c* — lõige; *1* — kogumislatid; *2* — vinnaklüliti; *3* — sulavkaitse; *4* — voolutrafo; *5* — null-latt; *6* — arvesti; *7* — kaablilehter.



Joon. 19-27. Komplekt-trafoalajaama kappidega ja lattjuhtmestikuga tsehhialajaam.

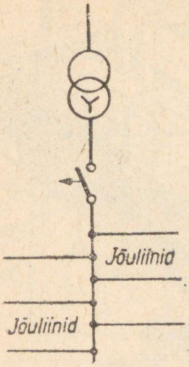
ühendatud voltmeetrit ja väljuvatesse liinidesse lülitatud ampermeetreid.

Kahepoolse teenindamisega raamkonstruktsiooniga kilp ja ühe paneeli lülitusskeem on näidatud joonisel 19-26.

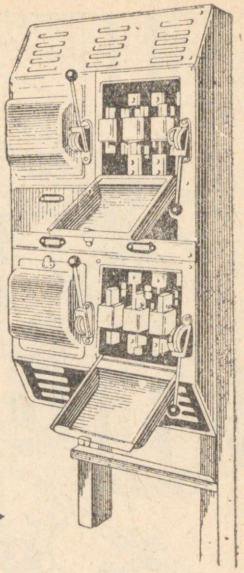
Joonisel 19-27 on kujutatud komplekt-trafoalajaama kappidega ja lattjuhtmestikuga tsehhialajaam.

Et ehitada odavamalt, kasutatakse tsehhialajaama ja lattjuhtmestiku lihtsustatud lülitusskeemi, mida nimetatakse blokiks «trafo — magistraal» (joon. 19-28). Selles seadmes puudub jaotuskilp. Vool kulgeb trafost läbi automaadi või vinnaklüliti otse lattjuhtmetesse, sealt aga üksikutesse elektrimootoritesse.

Väikeste väiksemate tarbijate rühmade toitmiseks paigaldatakse tsehhides jaotuspunktid. Joonisel 19-29 on



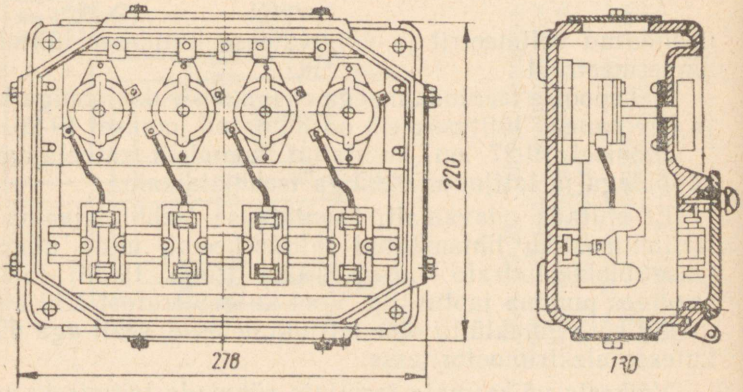
Joon. 19-28. Bloki «trafo—magistraal» lülitusskeem.



Joon. 19-29. Neljast blokist blokk-jaotuspunkt ПРБ-59. ▶

kujutatud blokk-jaotuspunkt ПРБ-59, mis koosneb üksikutest blokkidest. Temas lülitatakse iga väljuv liin sisse ja välja teistest sõltumatult ja kaitsmete vahetamine toimub pinge puudumisel.

Valgustustarbijate toitmine toimub rühmjaotuspunktide



Joon. 19-30. Valgustusvõrgu jaotuspunkt.

kaudu. Viimased kujutavad endast kappe või karpe, kuhu on monteeritud vinnak- või pakettlülitid ja sulavkaitsmed (joon. 19-30). Väiksemate valgustustarbijate rühmade korral kasutatakse sulav-keermekaitsmetega kilpe.

19-5. Juhtmete arvutus

Elektrijuhtmed ja -võrgud peavad: 1) tagama tuleohutuse ja inimeste elu ohutuse; 2) olema töökindlad ja tagama pideva elektrienergiaga varustamise; 3) kindlustama hea energia ülekande, s. t. tagama tarbijate klemmidel nimipingele võimalikult lähedase pinge; 4) olema odavad.

Esimene tingimus täidetakse juhtmete ristlõigete õige valikuga (lubatava kuumenemise astme järgi) ning sulavkaitsmete ja juhtmete isolatsiooni õige valikuga (juhtme margi järgi).

Teine tingimus on täidetud juhtmete küllaldase mehhaanilise tugevuse ja sulavkaitsmete õige valiku korral.

Kolmanda tingimuse täitmine kindlustatakse juhtmete ristlõike valimisega vastavalt lubatavale pingekaole.

Juhtmete arvutuse eesmärgiks on nende õige valimine.

a) Juhtmete ristlõike määramine lubatava kuumenemise järgi

Juhtmete ristlõike pindala määramiseks tuleb teada juhtmeosade pikkusi ja koormusi neil osadel.

Koormus on määratud võimsusega, muutumatu nimipinge korral ka vooluga.

Juhtmete arvutamisel kasutatakse järgmisi mõisteid: 1) nimivõimsus P_n — tarbija sildil märgitud võimsus; 2) installeeritud võimsus P_i — kõigi ülesseatud tarbijate nimivõimsuste summa; 3) arvutusvõimsus P_a — võimsus, mille alusel tehakse arvutused.

Loetletud võimsustele vastavad järgmised voolud I_n, I_i, I_a, mille juurde võib kirjutada analoogilised nimetused.

Praktikas ei lülitata mitte kunagi sisse kõiki tarbijaid ja mootorid pole kunagi kogu aeg täielikult koormatud. Sellepärast lähtutakse arvutustes mitte installeeritud

võimsusest, vaid tema sellest osast P_a, mida tarbijad võivad üheaegselt töötades tarbida.

Arvutusvõimsuse ja installeeritud võimsuse suhet nimetatakse tarbimisteguriks

$$k_t = \frac{P_a}{P_i} \qquad (19\text{-}1)$$

ehk

$$k_t = \frac{I_a U \cos\varphi}{I_i U \cos\varphi} = \frac{I_a}{I_i}.$$

Valgustuskoormuse korral

a) välistes valgustusvõrkudes $k_t = 1$; b) elukondlikes valgustusvõrkudes $k_t = 0{,}7 \ldots 0{,}8$; c) tööstusettevõtete võrkudeks $k_t = 0{,}7 \ldots 0{,}9$.

Valgustuskoormuse korral arvutusvool ühefaasilises vahelduvvooluringis või alalisvooluringis

$$I_a = \frac{k_t P_i}{U} = \frac{P_a}{U},$$

kolmefaasilises vahelduvvooluringis

$$I_a = \frac{k_t P_i}{\sqrt{3}\,U} = \frac{P_a}{\sqrt{3}\,U}.$$

Metallide külmtöötlemise tsehhide jõukoormuse tarbimistegur, mille väärtused on antud tabelis 19-2, on sõltuv ülesseatud elektrimootorite arvust.

Alalisvoolumootori nimivool

$$I_n = \frac{P_n}{U \cdot \eta} \qquad (19\text{-}2)$$

ja kolmefaasilisel voolul töötava mootori nimivool

$$I_n = \frac{P_n}{1{,}73 \cdot U \cdot \eta \cos\varphi}, \qquad (19\text{-}3)$$

kus η on elektrimootori kasutegur.

Tabel 19-2

Tarbimisteguri sõltuvus mootorite arvust

Ülesseatud mootorite arv	2	3	4	5	6	8	10	20	30
Tarbimistegur metallide külmtöötlemise tsehhides	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,45	0,3	0,25

Vask- ja alumiiniumsoontega juhtmetele ja kaablitele lubatavad kestvad koormusvoolud

Soone ristlõige mm²	Lubatavad kestvad koormusvoolud A*								
	lahtiselt paigaldatud juhtmetes margiga *ПР, ПРД, ПВ, ППВ, АПР, АПВ*	lahtiselt paigaldatud vasksoontega juhtmetes ja kaablites margiga *СРГ, СРБГ, ВРГ, ВРБГ, ТПРФ, ПРП*		ühte torusse paigutatud juhtmetes margiga *ПР, ПРТО, ПРГ, ПВ, ПГВ, АПР, АПВ* ja süvistatult paigaldatud juhtmes margiga *ППВ*				maasse paigaldatud kuni 3-kilovoldise pingega immutatud paberisolatsiooniga kaablites margiga *СБ, АБ, ВМБ, ААБ, АБМБ*	vabas õhus paiknevates ühesoonelistes paljastes juhtmetes
		kahesooneline	kolmesooneline	kaks juhet	kolm juhet	üks kahesooneline	üks kolmesooneline	kolmesooneline	
0,5	11/—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,75	15/—	—	—	—	—	—	—	—	—
1	17/—	—	—	16/—	15/—	15	14	—	—
1,5	23/—	19	19	19/—	17/—	18	15	30	—
2,5	30/24	27	25	27/20	25/19	25	21	40/31	—
4	41/32	38	35	38/28	35/28	32	27	55/42	50/40
6	50/39	50	42	46/36	42/32	40	34	70/55	70/55
10	80/55	70	55	70/50	60/47	55	50	95/75	95/75
16	100/80	90	75	85/60	80/60	80	70	120/90	130/105
25	140/105	115	95	115/85	100/80	100	85	160/125	180/135
35	170/130	140	120	135/100	125/95	125	100	190/145	220/170
50	215/165	175	145	185/140	170/130	160	135	235/180	270/215
70	270/210	215	180	225/175	210/165	195	175	285/220	340/265
95	330/255	260	220	275/215	255/200	245	215	340/260	415/325
120	385/295	300	260	315/245	290/220	295	250	390/300	485/375
150	440/340	350	305	360/275	330/255	—	—	435/335	570/440

* Lugejas on toodud koormusvool vasksoonte, nimetajas aga alumiiniumsoonte korral

Mootorite η ja $\cos\varphi$ väärtused võetakse käsiraamatutest või kataloogidest. Orienteerivates arvutustes võib väikese võimsusega (kuni 10 ... 12 kW) mootori puhul võtta korrutis $\eta \cos\varphi$ võrdseks 0,7 ... 0,8-ga.

Mootorite arvutusvool

$$I_a = k_t I_n = k_t I_i.$$

Juhtmete ristlõike määramine lubatava kuumenemise järgi toimub tavaliselt tabeli abil (tabel 19-3), kus antakse mitmesugust marki juhtmete standardsetele ristlõigetele maksimaalselt lubatavad kestvad voolud (I_l).

Juhtmele lubatav vool ei tohi olla väiksem arvutusvoolust, s. t.

$$I_l \geqslant I_a. \qquad (19\text{-}4)$$

Seega valitakse sellise ristlõikega juhe, mille lubatav vool on kas võrdne arvutusvooluga või sellest suurem.

Näide 19-1. Leida arvutusvool kolmefaasilise 220-voldise pingega liini magistraaljuhtmetes, kui nende lõppu on ühendatud kolm elektrimootorit nimivõimsustega $P_{n1} = 4{,}5$ kW, $P_{n2} = 2{,}8$ kW ja $P_{n3} = 3{,}5$ kW.

Valida torudesse paigutatavate juhtmete ПР ristlõige, lähtudes juhtmete lubatava kuumenemise normidest.

Arvutusvool magistraalis

$$I_a = \frac{k_t P_n \cdot 1000}{1{,}73 U \cos\varphi \cdot \eta} = \frac{0{,}9 \cdot 11{,}8 \cdot 1000}{1{,}73 \cdot 220 \cdot 0{,}7} = 30 \text{ A}.$$

Leitud arvutusvoolule $I_a = 30$ A lähimaks lubatavaks vooluks torusse paigutatud juhtmele margiga ПР (tabel 19-3) on $I_l = 35$ A, millele vastab juhtme ristlõige $S = 4$ mm^2. Antud tingimuste korral valimegi sellise ristlõikega juhtme.

Valitud juhtme ristlõiget tuleb kontrollida sulavpanuse voolu järgi (§ 19-5, *b*) ja lubatava suhtelise pingekao järgi (§ 19-5, *c*).

b) Kaitsmete sulavpanuste valimine

Kaitsmete sulavpanused on mõeldud juhtmete kaitsmiseks lühisvoolude ja suurte ülekoormuste eest.

Kui kaitsmes kulgevad arvutusvoolust suuremad voolud, siis peab sulavpanus n.-ö. «läbi põlema» — sulama.

Sulavpanuse valimisel lähtutakse kolmest tingimusest.

1. Sulavpanuse nimivool I_{sn} peab olema võrdne kaitstava liinilõigu arvutusvooluga või sellest suurem, s. t.

$$I_{sn} \geqslant I_a. \qquad (19\text{-}5)$$

Kui näiteks $I_a = 30$ A, siis valime sulavpanuste nimivoolude skaalalt (tabel 19-4) lähima sulavpanuse nimivoolu $I_{sn} = 35$ A.

Tabel 19-4

Sulavpanuste nimivoolud

Vool A	4	6	10	15	20	25	35	45	60	80	100	125	160	200	252	260	300	350

2. Sulavpanuse nimivool I_{sn} peab olema võrdne või suurem 2,5 korda vähendatud käivitusvoolust, mis kulgeb kaitstavas liiniosas, millega on ühendatud lühisrootoriga elektrimootor:

$$I_{sn} \geqslant \frac{I_k}{2{,}5}. \qquad (19\text{-}6)$$

Kui näiteks $I_k = 200$ A, siis

$$I_{sn} \geqslant \frac{200}{2{,}5} = 80 \text{ A}.$$

Lähim sulavpanuse nimivool (tabel 19-4)

$I_{sn} = 80$ A.

Sellise liini sulavkaitsme nimivool, millega on ühendatud mitu lühisrootoriga elektrimootorit, arvutatakse valemist

$$I_{sn} \geqslant \frac{I_{max}}{2{,}5} = \frac{I_k + I'_a}{2{,}5}, \qquad (19\text{-}7)$$

kus I_k on suurima käivitusvooluga mootori käivitusvool ja I'_a — liini arvutusvool, arvestamata suurima käivitusvooluga mootori voolu.

Sulavpanus valitakse 1. ja 2. tingimuse järgi leitud suurima vajaliku I_{sn} järgi.

Käivitusvoolu järgi (19-7) leitud sulavpanus kaitseb liini lubamatult suurte lühiajaliste käivitusvoolude eest; selleks et sulavpanus kaitseks liini ka kestva ülekoormuse eest, peab olema täidetud tingimus

$$3I_l \geqslant I_{sn}. \qquad (19\text{-}8)$$

Näide 19-2. Valida käivitusvoolu järgi sulavpanus 220-voldise pingega liini lõigule, mille lõppu on ühendatud kolm lühisrootoriga elektrimootorit: $P_{n1} = 4{,}5$ kW, $P_{n2} = 2{,}8$ kW ja $P_{n3} = 3{,}5$ kW. Elektrimootorite käivitusvoolud võtame võrdseks 7-kordsete nimivooludega ja $\eta \cos \varphi = 0{,}7$.

Elektrimootorite nimivoolud:

$$I_{n1} = \frac{P_{n1}}{1{,}73 \cdot U \cdot \eta \cos \varphi} = \frac{4{,}5 \cdot 1000}{1{,}73 \cdot 220 \cdot 0{,}7} = 17 \text{ A};$$

$$I_{n2} = \frac{P_{n2}}{1{,}73 \cdot U \cdot \eta \cos \varphi} = \frac{2{,}8 \cdot 1000}{1{,}73 \cdot 220 \cdot 0{,}7} = 10{,}5 \text{ A};$$

$$I_{n3} = \frac{P_{n3}}{1{,}73 \cdot U \cdot \eta \cos \varphi} = \frac{3{,}5 \cdot 1000}{1{,}73 \cdot 220 \cdot 0{,}7} = 13{,}3 \text{ A};$$

Liini arvutusvool, kui töötavad mootorid *2* ja *3*,

$I_{a2,3} = k_t (I_{n2} + I_{n3}) = 1 (10{,}5 + 13{,}3) = 23{,}8$ A.

Maksimaalne arvutusvool liinis elektrimootori *1* käivitamisel

$I_{max} = I_{k1} + I_{a2,3} = 7 \cdot 17 + 23{,}8 = 142{,}8$ A.

Sulavpanuse vool [valem (19-7)]

$$I_{sn} \geqslant \frac{I_{max}}{2{,}5} = \frac{142{,}8}{2{,}5} = 59 \text{ A}.$$

Valime sulavpanuse lähima nimivoolu väärtusega $I_{sn} = 60$ A.

3. Võrku jadamisi ühendatud kaitsmete sulavpanuste valimisel tuleb tarbijast arvates iga järgmine võtta sulavpanuste standardsete voolude skaala (tabel 19-4) järgi ühe astme võrra eelmisest kõrgemalt. Sel juhul on tagatud kaitsmete selektiivne (eristav) töö, s. t. kaitse lülitab välja ainult selle lõigu, kus on näiteks lühis. Kaitse tuleb paigaldada vastava lõigu algusesse (arvestades energia liikumise suunda), sest ainult sel juhul kaitseb ta seda lõiku.

c) Juhtmete ristlõike valimine lubatava pingekao järgi

Nagu teada (§ 1-15), nimetatakse pingekaoks liini alguses ja lõpus olevate pingete aritmeetilist vahet

$\Delta U = U_1 - U_2$.

Pingekadu väljendatakse sageli ka protsentides pingest liini alguses, nimetades seda siis suhteliseks pingekaoks

$$\varepsilon = \frac{\Delta U}{U} \cdot 100\%. \qquad (19\text{-}9)$$

Lubatav suhteline pingekadu lõigul alajaamast tarbijani on valgustuskoormuse korral 2 . . . 3%, jõukoormuse korral aga 4 . . . 6%.

Paragrahvis 1-15 saime juhtme ristlõike määramiseks valemi (1-43):

$$S = \frac{2Il}{\gamma \Delta U}.$$

Asendades ΔU suhtelise pingekao kaudu, saame:

$$S = \frac{2 \cdot 100 Il}{\gamma \varepsilon U}$$

või, korrutades ja jagades U-ga, anname valemile kuju:

$$S = \frac{2 \cdot 100 Pl}{\gamma \varepsilon U^2}. \qquad (19\text{-}10)$$

Viimasest avaldisest järeldub, et

$$\varepsilon = \frac{2 \cdot 100 Pl}{\gamma S U^2}. \qquad (19\text{-}11)$$

Valemite (19-10) ja (19-11) abil määratakse liini, mille lõpus asub koormus, juhtmete ristlõige suhtelise pingekao järgi või liini suhteline pingekadu antud juhtmete ristlõike järgi.

Neid valemeid võib kasutada alalisvoolu ning ühe- ja kolmefaasilise vahelduvvoolu korral. Viimasel juhul on pinge U liinipinge, s. t. $U = U_l$, P aga kolmefaasilise koormuse aktiivvõimsus.

Näide 19-3. Määrata pingelang kolmefaasilisel liinil pingega $U = 220$ V, kui liin on valmistatud juhtmest margiga ПР pikkusega $l = 15$ m ja ristlõikega $S = 4$ mm² ja kui liini lõppu on ühendatud kolm elektrimootorit võimsustega $P_{n1} = 4{,}5$ kW, $P_{n2} = 2{,}8$ kW ja $P_{n3} = 3{,}5$ kW (vt. näide 19-1).

Nimikoormusel mootorite poolt võrgust tarbitav võimsus

$$P = \frac{P_{n1}}{\eta_1} + \frac{P_{n2}}{\eta_2} + \frac{P_{n3}}{\eta_3} = \frac{4{,}5}{0{,}85} + \frac{4{,}5}{0{,}85} + \frac{3{,}5}{0{,}85} =$$

$$= 5{,}3 + 3{,}3 + 4{,}1 = 12{,}7 \text{ kW}.$$

Arvutusvõimsus

$P_a = k_t P = 0{,}9 \cdot 12{,}7 = 11{,}5$ kW.

Kasutades valemit (19-11), saame:

$$\varepsilon = \frac{2 \cdot 100 Pl}{\gamma S U^2} = \frac{2 \cdot 100 \cdot 11{,}5 \cdot 1000 \cdot 15}{57 \cdot 4 \cdot 220^2} \approx 3\%.$$

Seega ei ületa suhteline pingekadu lubatavat väärtust ja lubatava kuumenemise järgi valitud juhtme ristlõige $S = 4$ mm² on sobiv.

Tabel 19-5

Vähimad mehhaanilise tugevuse järgi lubatavad juhtmete ristlõiked

Juhtmete nimetused ja paigaldamisviisid	Ristlõige mm²	
	Vaskjuhtmed	Alumiiniumjuhtmed
Juhtmed valgustite toitmiseks hoonetes ja väljas	0,5; 1,0	—
Nöör- ja kerged voolikjuhtmed ripp-, laua- ja teiste valgustite jaoks	0,75	—
Keskmise ja suure tugevusega voolikjuhtmed liikuvate tarbijate jaoks	1 ja 2,5	
Kahe mitmest traadist kokkukeeratud soonega juhtmed isolaatoritel, mille vaheline kaugus on 1 m	1,0	—
Isoleeritud juhtmed hoonetes isolaatoritel, mille vaheline kaugus meetrites on järgmine:		
kuni 1	1,0	2,5
kuni 2	1,5	2,5
kuni 6	2,5	4
kuni 12	4	10
suurem kui 12	6	16
Paljad juhtmed hoonetes	2,5	4
Isoleeritud ja paljad kaitstud juhtmed välisjuhtmestikus:		
seintel	2,5	4
ülejäänud juhtudel	4	10
Isoleeritud juhtmed torudes	1	2,5
Õhuliinid pingega kuni 1000 V	6	16
Õhuliinide sisestused kuni 25 m kaugusel lähimast mastist	4	10

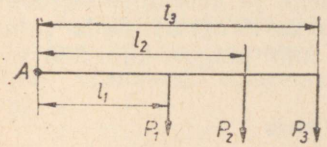
Kui liinil, mis saab energiat toitepunktist A (joon. 19-31), on mitu tarbijat tema erinevates punktides, siis arvutatakse juhtmete ristlõige liini kõigi lõikude juhtmete ühesuguse ristlõike ja materjali korral valemiga

$$S = \frac{2 \cdot 100 (P_1 l_1 + P_2 l_2 + P_3 l_3 + \ldots)}{\gamma S U^2} = \frac{2 \cdot 100 \Sigma P l}{\gamma \varepsilon U^2}, \qquad (19\text{-}12)$$

suhteline pingekadu aga valemiga

$$\varepsilon = \frac{2 \cdot 100 (P_1 l_1 + P_2 l_2 + P_3 l_3 + \ldots)}{\gamma S U^2} = \frac{2 \cdot 100 \Sigma P l}{\gamma S U^2}. \qquad (19\text{-}13)$$

Kaks viimast valemit erinevad eelmistest selle poolest, et avaldis Pl — koormuse P ja liini pikkuse l korrutis, mida nimetatakse koormusmomendiks, on asendatud koormusmomentide summaga (joon. 19-31).



Joon. 19-31. Kolme tarbijaga liin.

Juhtmete ristlõikeid, mis on leitud lubatava kuumenemise järgi ja rahuldavad nõudmisi lubatava pingekao osas, kontrollitakse mehhaanilise tugevuse järgi tabeli 19-5 abil.

19-6. Sisevõrkude ehitus

Elektrienergia suunamiseks ja jaotamiseks hoonetes kasutatakse juhtmeid, nöörjuhtmeid, kaableid ja latte.

Juhtmeks nimetatakse paljast või isoleeritud traati või soont. Isoleeritud juhtmel võib olla kummist, polüvinüülkloriidist, nairiit- või puuvillast kaitsekest.

Sooneks nimetatakse üht või mitut kokkukeeratud traati, mis juhivad elektrivoolu.

Nöörjuhtmeks nimetatakse kahte või enamat kokkukeeratud painduvat omaette isoleeritud soont.

Kaabliks nimetatakse üht või mitut kokkukeeratud isoleeritud soont, mis on suletud pliist, alumiiniumist või polüvinüülkloriidist kaitsekesta.

Latiks nimetatakse ribavaske, -alumiiniumi või -terast, harva on latt ümara ristlõikega.

Juhtmeid ja kaableid eristatakse soonte materjali (vask, alumiinium — *A*), soonte arvu (ühe- ja mitmesoonelised), isolatsiooni liigi (kummi — *P*, polüvinüülklo-

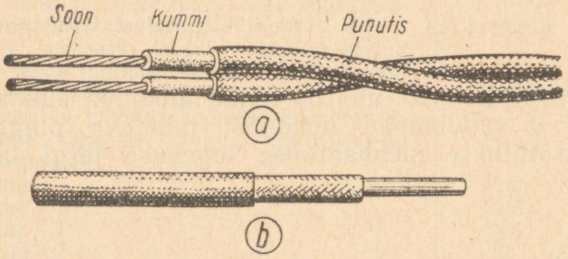
riid —*B*) ja kaitsekesta liigi (plii — *C*, alumiinium — *A* jne.) järgi.

Seega tuleb eristada ühe- ja mitmesoonelisi juhtmeid, nöörjuhtmeid ning kaableid, s. t. neil on voolu kulgemiseks vastavalt üks või mitu üksteisest isoleeritud teed (soont). Nii ühed kui teised võivad olla ühe- või mitmetraadilised.

Sooni valmistatakse ainult standardsete ristlõigetega: 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 35; 50; 70; 95; 120; 150; 185; 240; 400; 500; 625 ja 800 mm^2.

Jõu- ja valgustusvõrkudes kasutatakse enamasti järgmist marki juhtmeid ja kaableid.

1. Painduv kahe vasksoonega ja kummiisolatsiooniga puuvillpunutises juhe *ПРД* (joon. 19-32, *a*). Seda valmistatakse ristlõikega 0,75 kuni 6 mm^2 pingele kuni 380 V.



Joon. 19-32.
a — nöörjuhtmed ПРД ja ШР; *b* — juhtmed ПР ja АПР.

2. Juhtmed *ПР* ja *АПР* on ühesoonelised, kummiisolatsiooniga ja puuvillpunutises. Esimese soon on vasest, teisel — alumiiniumist (joon. 19-32, *b*). Neid valmistatakse pingele kuni 500 V järgmiste ristlõigetega: esimest 0,75-st ja teist 2,5-st kuni 400 mm^2-ni.

3. Juhe *ПРГ* on üldiselt sama mis juhe *ПР*, ainult viimasest painduvam, peenematest traatidest soontega.

4. Juhtmed *ПВ* ja *АПВ* erinevad juhtmeist *ПР* ja *АПР* vaid selle poolest, et neil on polüvinüülkloriidisolatsioon. Neid valmistatakse ristlõikega 0,75 kuni 95 mm^2 pingele kuni 500 V.

5. Painduv polüvinüülkloriidisolatsiooniga juhe *ПГВ*. Seda valmistatakse samade ristlõigetega, millega juhet *ПВ*-gi, pingele kuni 500 V.

6. Kummiisolatsiooniga soontele ühise puuvillpunutisest kattega juhtmed *ПРТО* ja *АПРТО*. Neid valmistatakse ristlõikega 1 kuni 500 mm² ühe-, kahe-, kolme- ja neljasoonelistena pingetele kuni 500 ja kuni 2000 V.

7. Kummiisolatsiooniga kaitsesoomuses juhe *ПРП*. Soomus on valmistatud peenikestest tsingitud terastraatidest. Juhet valmistatakse ristlõikega 1 kuni 95 mm² ühe-, kahe- ja kolmesoonelisena pingele kuni 500 V.

8. Torukujulise metallkestaga kummiisolatsioonis vaskjuhe *ТПРФ*. Seda valmistatakse ühe-, kahe-, kolme- ja neljasoonelisena ristlõikega 1 kuni 10 mm² pingele kuni 500 V.

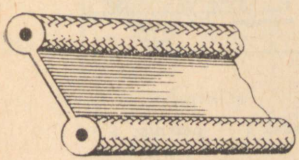
9. Kummiisolatsiooniga kahesooneline nöörjuhe *ШР*. Seda kasutatakse samadel juhtudel kui juhet *ПРД*. Ta erineb viimasest suurema painduvuse poolest (joon. 19-32, *а*).



Joon. 19-33. Voolikjuhe ШРПС.
1 — kaitsev kummivoolik; *2* — kummiisolatsioon; *3* — vasksoon.

10. Kummiisolatsiooniga keskmise tugevusega voolikjuhe *ШРПС* (joon. 19-33). Isolatsiooniga sooned on paigutatud ühisesse kummist kaitsekesta. Juhet valmistatakse ühe-, kahe- ja kolmesoonelisena ristlõikega 1 kuni 4 mm² pingele 500 V. Voolikjuhe on mõeldud liikuvate tarbijate (tolmuimejad, elektritööriistad jms.) ühendamiseks.

11. Kahe- või kolmesoonelised polüvinüülkloriidisolatsiooniga lamejuhtmed *ППВ* ja *АППВ* (vastavalt vask- ja alumiiniumsoontega) (joon. 19-34). Ristlõige on vask-



Joon. 19-34. Kahesooneline lamejuhe ППВ või АППВ.

soonte puhul 0,75 ... 2,5 mm², alumiiniumsoonte puhul 2,5 ... 4 mm². Juhtmed on pingele kuni 500 V. Valgustusvõrkudes on nad varem kasutatud nöörjuhtmed peaaegu täielikult välja tõrjunud.

12. Tasapinnaline kahe- või kolmesooneline nairiitisolatsiooniga alumiiniumsoontega juhe *АПН*. Ristlõige 2,5 ... 4 mm². Mõeldud pingele 500 V.

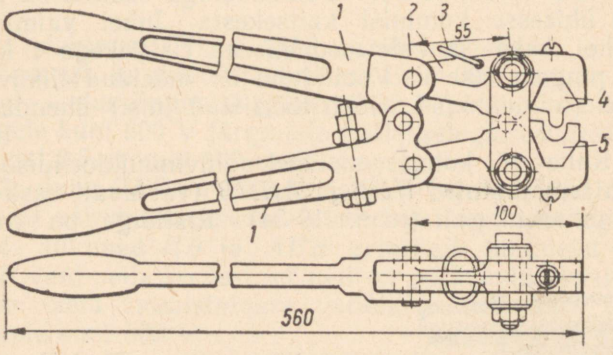
13. Tinakesta ja teraslintidest soomusega kaetud kummiisolatsiooniga vasksoontega kaabel *СРБ*, mille välispind on kaetud immutatud puuvillpunutisega. Soonte ristlõike pindala on 4 ... 185 mm². Kaabli nimipinge on 500 V.

14. Kaabel *СРГ* on samasugune kui kaabel *СРБ*, ilma puuvillpunutisest katteta.

15. Kummiisolatsiooniga ja polüvinüülkloriidkestaga kaabel *ВРГ*. Kaabel *ВРГ* on samasugune kui *ВРГ*, kuid ümbritsetud veel teraslintidest soomusega. Neid valmistatakse kahe-, kolme- ja neljasoonelistena soonte ristlõikega 1 ... 185 mm². Nimipinge on 500 V.

16. Kaablid *НРГ* ja *АНРГ:* esimene vask-, teine alumiiniumsoontega, mõlemad kummiisolatsiooniga ja nairiitkaitsekestaga. Neid valmistatakse ühe-, kahe-, kolme- ja neljasoonelistena soonte ristlõikega 4 ... 185 mm² nimipingele 500 V.

Kasutatavamate juhtmete ja kaablite kasutamine ja paigaldamisviisid on antud tabelis 19-6.



Joon. 19-35. Käsitangid ПК-1.
1 — käepide; *2* — kang; *3* — rõngas; *4* — patriits; *5* — matriits.

Tabel 19-6

Põhiliste juhtmemarkide kasutamine

Juhtmete paigutuse liik	Paigaldamisviis	Juhtme margid	Ruumi iseloom						
			Kuivad						
			administratiiv- ja elutarbelised	tootmis-	Niiske õhuga	Rõsked	Tolmused	Keemiliselt aktiivse keskkonnaga	Välisvõrgud
Lahtiselt isoleermaterjalist tugedel	Isoleerrullidel	*ПР; ПРД*	×	×	—	—	—	—	—
		ПР; АПР; ПВ; АПВ	×	×	×	×	—	—	×
	Isolaatoritel	*ПР; АПР; ПВ; АПВ*	×	+	+	+	×	+	+
		Paljasjuhtmed	—	+	×	×	×	×	+
Lahtiselt isoleermaterjalist tugedeta	Seintel ja lagedel	*ТПРФ*	×	+	—	—	+	—	—
		ВРГ; СРГ; НРГ; АНРГ	×	+	+	+	+	×	×
		ППВ; АППВ; АПН	+	×	×	×	×	×	—
	Metallist kaitsekestaga papptorudes	*ПР; АПР; ПВ; АПВ*	×	×	—	—	×	—	—
	Terastorudes	*ПР; АПР*	×	×	×	—	×	—	—
		ПРТО; АПРТО; ПВ; АПВ	×	+	×	×	×	×	×
	Karpides	*ПР; АПР; ПРТО; ПВ; АПВ*	—	+	×	—	×	—	—
Süvistatult	Klaastorudes	*ПР; АПР*	+	×	—	—	×	—	—
	Terastorudes	*ПР; АПР*	×	+	+	—	+	—	—
		ПРТО; АПРТО	×	×	+	+	+	×	×

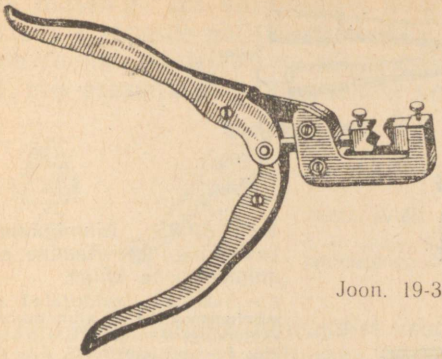
Juhtmete paigutuse liik	Paigaldamisviis	Juhtme margid	Ruumi iseloom						
			Kuivad		Niiske õhuga	Rõsked	Tolmused	Keemiliselt aktiivse keskkonnaga	Välisvõrgud
			administratiiv- ja elutarbelised	tootmis-					
Süvistatult	Poolkõvades isoleertorudes	*ПР*; *АПР*	×	×	—	—	×	—	—
	Metallist kaitsekestaga papptorudes	*ПР*; *АПР*	×	×	×	—	×	—	—
	Ehituskonstruktsioonides ja krohvi all	*ППВ*; *АППВ*; *ПВ*; *АПВ*; *АПН*	+	×	×	—	×	—	—

Tingmärgid: + — soovitatav, × — lubatav — — keelatud.

Juhtmete paigaldamine on võimatu ilma juhtmete ühendamise ja otsamiseta.

Juhtmete ja kaablite mitmetraadilisi vask- või alumiiniumsooni otsatakse ja ühendatakse nende kokkumuljumise, keevitamise või jootmise teel. Kokkumuljumine seisneb selles, et voolu juhtiv soon viiakse kaablikinga või ühendushülsi torukujulisse ossa (viimane on soonega samast materjalist), mis seejärel kas spetsiaalsete tangidega *ПК*-1, *ПК*-2 (joon. 19-35 ja 19-36) või hüdraulilise pressiga kokku pigistatakse. Soone ümber pressitud kaabliking ja kokkupressimine on näidatud joonisel 19-37. Pressimise käigus tekib soone ja toru vahel töökindel elektriline kontakt.

Vasksoonte otsamine ja ühendamine kokkumuljumise teel toimub ühe pressimisega — ühe patriitsi (puansoon)

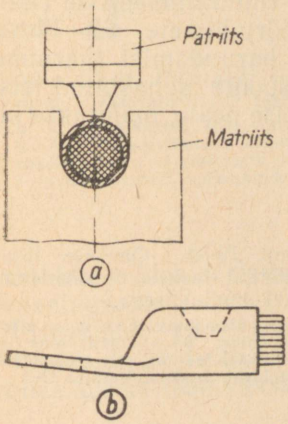


Joon. 19-36. IIK-2-tüüpi tangid.

vajutusega, alumiiniumsoonte puhul tuleb aga teha kaks vajutust (joon. 19-37). Alumiiniumsoonte kokkumuljumisel täidetakse kaablikinga õõs või ühendushülss eelnevalt pastaga, mis koosneb vaseliinist ja sellesse segatud peenest kvartsliivast. Pressimisel peened liivaterad purustavad oksiidikile, vaseliin aga ei lase metallil uuesti oksüdeeruda.

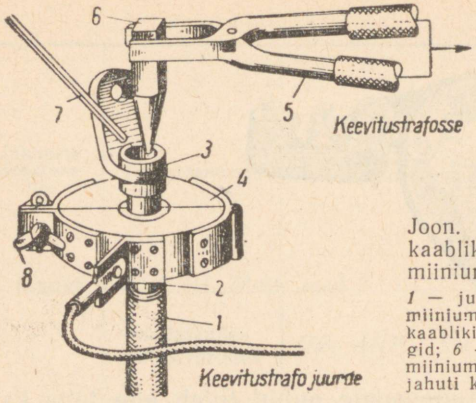
Kokkumuljumise meetod on väga efektiivne, lihtne ja mugav.

Elekterkeevitust kasutatakse peamiselt alumiiniumsoonte ühendamiseks ja otsamiseks. Sageli kasutatakse keevitamist nn. kontaktkuumutamisega, s. o. ilma elektrikaare tekkimiseta. Voolu kulgemisel eraldub soojus sel juhul kohas, kus süsielektrood puutub kokku sulatatava soone otsaga. Kaablikinga keevitamine alumiinium-



Joon. 19-37.

a — kaablikinga ühendamine juhtmesoonega kokkumuljumise teel; *b* — ühe vajutusega ühendatud kaabliking; *c* — kahe vajutusega ühendatud kaabliking.



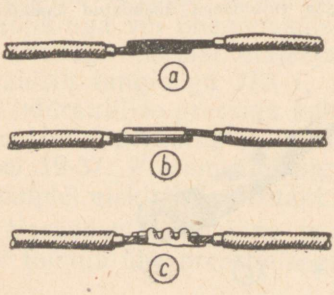
Joon. 19-38. Alumiiniumist kaablikinga keevitamine alumiiniumsoone külge.

1 — juhe; *2* — paljastatud alumiiniumsoon; *3* — alumiiniumist kaabliking; *4* — jahuti; *5* — tangid; *6* — süsielektrood; *7* — alumiiniumist manustusvarras; *8* — jahuti kinnitusmutter

soonele on näidatud joonisel 19-38. Ühelt poolt toimub jahuti *4* abil voolu juhtimine juhtme soonde ning juhtme isolatsiooni kaitsmine ülekuumenemise eest, teiselt poolt jõuab keevitustrafo vool keevitamiskohale läbi tangide *5* ja süsielektroodi *6*.

Kui pole võimalik kasutada kokkumuljumist ega keevitamist, siis ühendused joodetakse. Vasksoonte j o o t m i n e toimub jootelambi leegis. Kasutatakse tina-pliijoodist ja kampolit. Alumiiniumsoonte jootmisel kasutatakse tsink-tinajoodist. Keevitatavad pinnad kaetakse joodisega, seejärel valatakse vormid (hülsid) või kaablikinga õõned joodist täis. Oksiidikile eemaldatakse jootmisel kuumutatud pindadelt metallpintsliga.

Järgnevalt kirjeldame kuni 10-ruutmillimeetrise ristlõikega painduvate (kiududest) nöörjuhtmete või lihtsate juhtmete vasksoonte jätkamist ja harundamist (haruühenduste tegemist). Ühendatavate soonte puhastatud otsad (joon. 19-39) paigutatakse teineteise peale, mähitakse õhu-



Joon. 19-39. Õhukese lindiga mähitud vasksoonte ühendamine kokkumuljumisega.

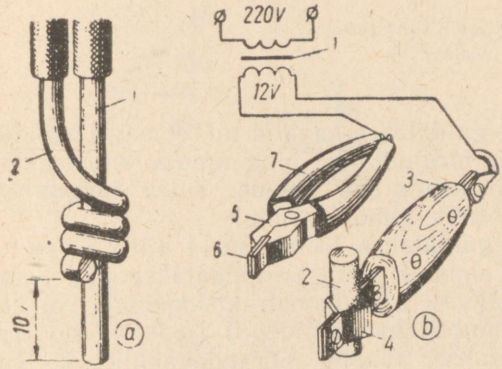
a — ühendatavate otsade ettevalmistamine; *b* — mähkimine õhukese vasklindiga; *c* — ühendamine tangidega kokkumuljumise teel.

kese messing- või vasklindiga ning seejärel muljutakse vastavate tangide abil käsitsi kokku. Selliste soonte otsamine toimub spetsiaalsete rõngasotsikute abil (joon. 19-40), mis pressitakse juhtme ümber vastavate tangidega.



Joon. 19-40. Rõngasotsik.
1 — enne kokkupressimist; *2* — pärast juhtmerõnga ümber pressimist.

Juhtmete alumiiniumtraadist soonte (ristlõige kuni 2,5 mm²) ning ka alumiinium- ja vasksoonte ühendamine toimub elekterkeevituse teel (joon. 19-41). Ühendatavate soonte otsad keeratakse kokku ja surutakse otsapidi vastu süsielektroodi, kuni ühenduskoht sulab ühtseks keraks.

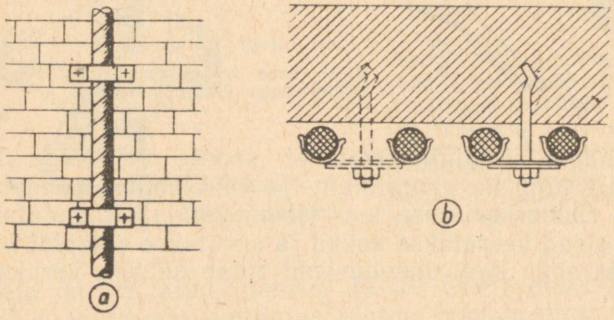


Joon. 19-41. Ühetraadiliste vask- ja alumiiniumjuhtmete ühendamine elekterkeevituse teel.
a — ettevalmistus keevitamiseks; *1* — vasksoon; *2* — alumiiniumsoon; *b* — elekterkeevitamise skeem: *1* — trafo; *2* — süsielektrood; *3* — elektroodihoidja; *4* — elektroodi vasknäpits; *5* — lapiktangid; *6* — vaskmokad; *7* — isoleertorud lapiktangide käepidemeil.

Juhtmete ühenduskohad isoleeritakse kummeeritud isoleerpaelaga.

Ettevõtete jõuvõrkudes kasutatakse enamasti 1) kaableid; 2) lattjuhtmeid; 3) isoleeritud juhtmeid nii torudes kui ka isolaatoritel.

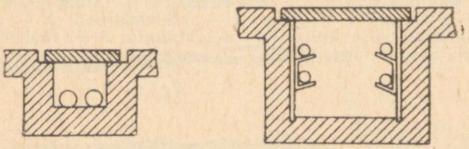
Ettevõtete valgustusvõrkudes kasutatakse peamiselt 1) metalltorudes paigaldatud juhtmeid; 2) juhtmeid, mis on paigaldatud isolaatoritele, isoleerrullidele (pinnapealne juhtmestik) või kandetrossi külge (rippjuhtmestik).



Joon. 19-42. Kaabli kinnitamine.
a — seinale; *b* — lakke.

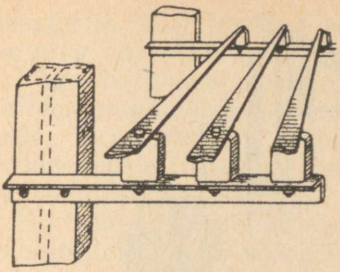
Hoonetes paigaldatakse kaablid nii, et nad võimalikult ei läheks ümber torujuhtmete ning muude konstruktsioonide, samuti läbi seinte ega lagede. Tuleb tagada vaba juurdepääs kaablitele remondi puhul.

Kaableid paigaldatakse lahtiselt või varjatult (süvistatult). Esimesel juhul paigaldatakse nad seintele ja lagedele vastavatele tugikonstruktsioonidele või kinnitatakse neile klambritega (pellidega) (joon. 19-42). Teisel juhul paigaldatakse kaablid põrandakanalitesse (joon. 19-43). Kaablite otsamist vaatlesime eespool paragrahvis 19-2.



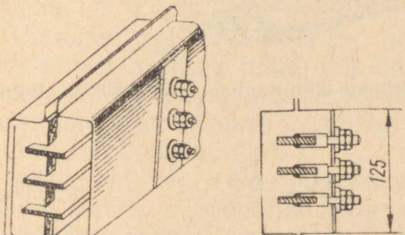
Joon. 19-43. Kaablite paigaldamine kanalitesse.

Lattjuhtmed võivad olla lahtised ja kinnised. Lahtised lattjuhtmed (joon. 19-44) kujutavad endast isolaatoritele kinnitatud metall-latte. Isolaatorid on oma-



Joon. 19-44. Lahtised lattjuhtmed.

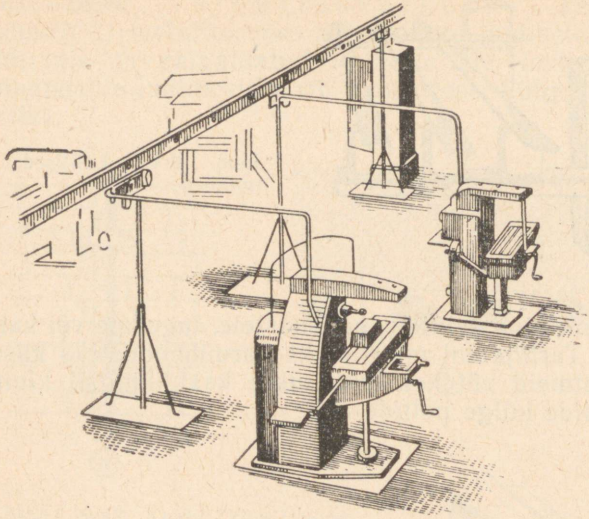
korda kinnitatud seintele, sammastele, lagedele või kandekaartele. Tarbijateni minevateks haruühendusteks kasutatakse juhtmeid või kaableid, mille kaablikingad kinnitatakse lattide külge poltide abil.



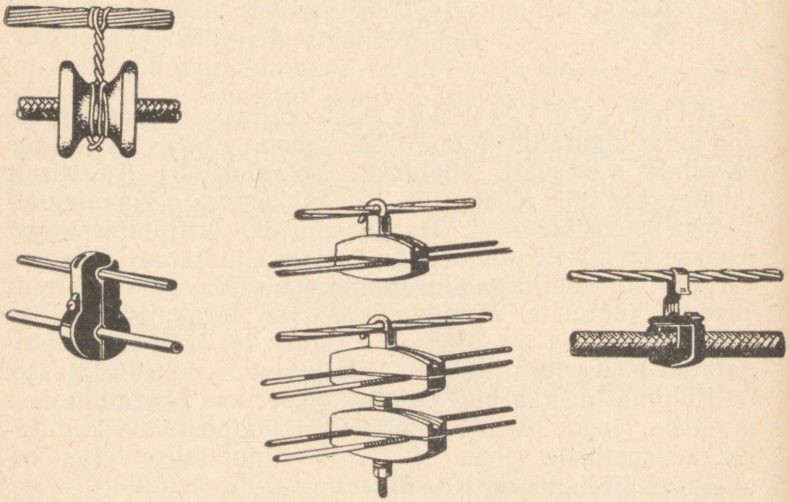
Joon. 19-45. Kinnised lattjuhtmed.

K i n n i s e d l a t t j u h t m e d kujutavad endast latte, mis on paigutatud teraskarbis (joon. 19-45) või -torus olevatele vastavate soontega isolaatoritele. Tavaliselt koostatakse nad üksikutest 3 m pikkustest normaalmõõtmetega sektsioonidest. Haruühendused lattjuhtmestikust tehakse tavaliselt juhtmestiku karbile kinnitatud vastavate karpide või kastide abil. Viimased sisaldavad kas ainult klemme juhtmete ühendamiseks või torukaitsmeid ja klemme, millega on ühendatud teras- või kõritorusse paigutatud isoleeritud juhtmed, mis juhivad voolu tarbijasse. Lattjuhtmestik (karbid) kinnitatakse kas gaasitorudest tugedele (joon. 19-46), seintele või tugipostidele kinnitatud konsoolidele (joon. 19-27) või riputatakse terastõmmitsate abil kandekaarte külge.

Jõuvõrkudes paigaldatakse juhtmed enamasti t e r a s t o r u d e s s e. Plahvatus- ja tuleohtlikes ruumides on see



Joon. 19-46. Kinniste lattjuhtmete kinnitamine gaasitorudest tugedele.



Joon. 19-47. Rippjuhtmestikes kasutatavad moodused isoleeritud juhtme trossi külge kinnitamiseks.

kohustuslik. Neil juhtudel peab torustik olema hermeetiline ning aparatuur ja valgustid plahvatusohutud.

Väga hargneva elektrivõrguga tsehhides ja masinasaalides paigaldatakse torud varjatult, süvistatult põrandasse. Terastorudesse paigutatud juhtmete jätkamine ja haruühenduste tegemine toimub spetsiaalsetes karpides või kastides.

Nii isoleeritud juhtmete paigaldamist isoleerrullidele ja isolaatoritele kui ka nöörjuhtmeid kasutatakse tänapäeval harva.

Tööstusettevõtete valgustusvõrkudes kasutatakse laialdaselt r i p p j u h t m e s t i k k u. Rida erinevaid juhtmete kandetrossile kinnitamise viise on näidatud joonisel 19-47. Valgustid ja juhtmed kinnitatakse trosside külge juba enne ülespanemist. Monteerimispaigas tõmmatakse tross spetsiaalsete pingutusabinõudega kinnituspunktide vahel pingule.

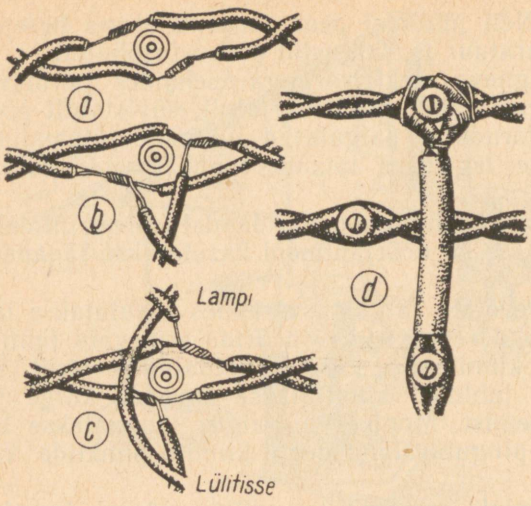
Viimasel ajal kasutatakse sellise võrgu loomiseks spetsiaalset trossiga juhet, mis ühtse konstruktiivse tervikuna sisaldab peale juhtmesoonte veel isoleeritud trossi. Haruühendused tehakse vajalikus kohas trossi külge kinnitatud harukarpide abil.

Isoleerrullidel n ö ö r j u h t m e i d (joon. 19-48) kasutatakse harva. Eluruumide valgustusvõrkude jaoks kasutatakse tänapäeval lamejuhtmeid margiga *ППВ* ja *АППВ*. Neid paigaldatakse nii süvistatult kui ka lahtiselt.

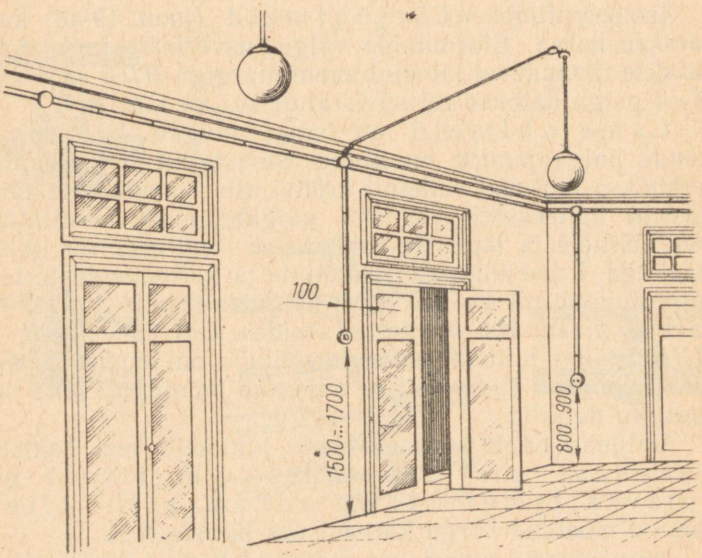
L a m e j u h t m e i d on väga mugav kasutada ja nende paigaldamine on lihtne. Süvistatult paigaldamisel pannakse juhtmed vahetult krohvi alla, kasutamata täiendavaid kaitsekesti. Lahtisel paigaldamisel kinnitatakse nad seintele ja lagedele spetsiaalse liimi abil või lihtsalt naeltega. Lamejuhtmete jätkamine ja haruühenduste tegemine toimub nii ühe kui teise paigaldamisviisi korral vastavates plastmass- või teraskarpides. Üldvaade *ППВ*- või *АППВ*-tüüpi juhtmetest juhtmestikule on toodud joonisel 19-49, joonisel 19-50 on aga näidatud mõningad selle juhtmestiku detailid.

Valgustusvõrk koosneb peale juhtmete veel l a m b i p e s a d e s t, p i s t i k u p e s a d e s t, l ü l i t i t e s t ning s u l a v k a i t s m e t e s t või a u t o m a a t l ü l i t i t e s t, mis on mõeldud võrgu kaitsmiseks lühiste eest.

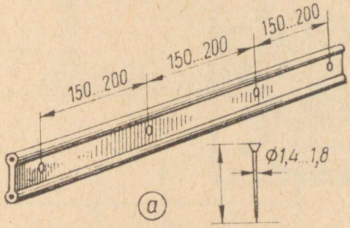
Mitu ühisele alusele monteeritud kaitset moodustavad r ü h m a k i l b i (joon. 19-51).

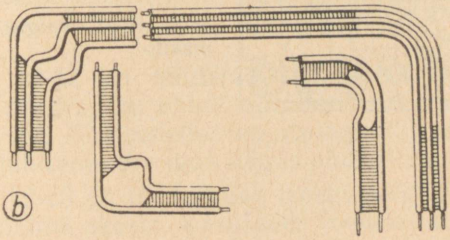


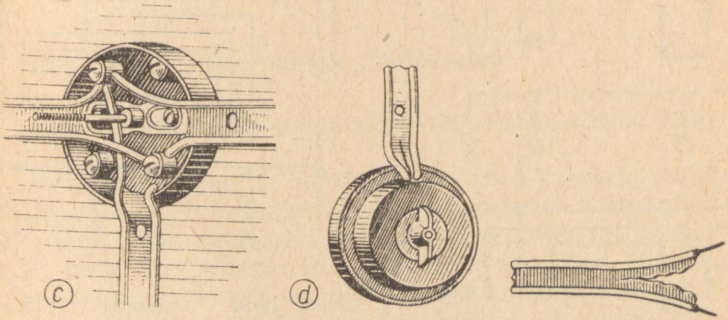
Joon. 19-48. Nöörjuhtmete ШР ja ПРД paigaldamine.
a — nöörjuhtmete ühendamine; *b* — haruühendus pistikupesa juurde; *c* — haruühendused lambi ja lüliti juurde; *d* — nöörjuhtmete ristumine.



Joon. 19-49. Üldvaade ППВ-tüüpi lamejuhtmete paigaldamisest.

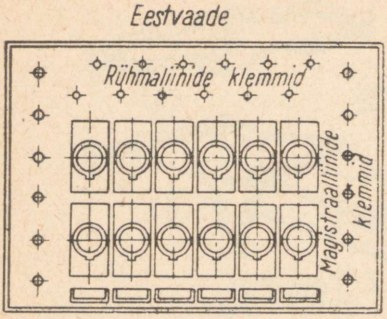


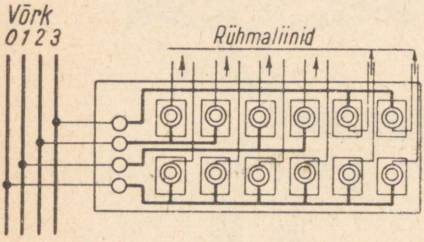




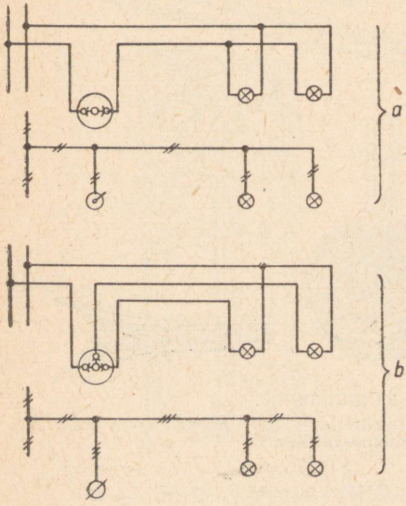
Joon. 19-50. ППВ-tüüpi lamejuhtme paigaldamine.

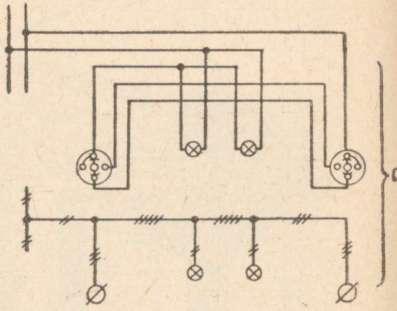
a — sirgjooneline lõik; *b* — juhtme painutamine; *c* — karp ühenduste ja haruühenduste tegemiseks; *d* — juhtme ühendamine lülitiga.





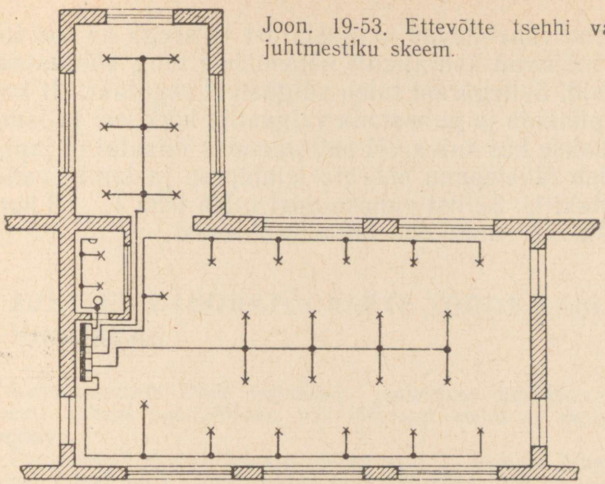
Joon. 19-51. Valgustusvõrgu rühmakilp.





Joon. 19-52. Lampide lülitusskeem ühe- ja mitmejoonelises kujutuses.

a — ühe või mitme lambi lülitamine ühe lülitiga; *b* — ühe, teise või mõlema lambi lülitamine ühe lülitiga; *c* — ühe või mitme lambi lülitamine lülititega kahest kohast.



Joon. 19-53. Ettevõtte tsehhi valgustusjuhtmestiku skeem.

Joonisel 19-52 on näidatud lihtsaimad hõõglampide lülitusskeemid. Nad on antud nii ühe- kui ka mitmejoonelises kujutuses. Ühejoonelise kujutusega lülitusskeemides näidatakse juhtmete arv igas lõigus põikkriipsukestega.

Joonisel 19-53 on toodud ühe tsehhi valgustusjuhtmestiku ühejooneline skeem. Kasutades joonisel 19-52 toodud lülitusskeeme, pole raske joonestada ka selle juhtmestiku mitmejoonelist skeemi.

19-7. Valgustusseadmete hooldamine

Elektrivalgustusseadmed nõuavad süstemaatilist kontrolli ja hooldamist.

Perioodiliselt, mitte harvemini kui kord kvartalis, tuleb kontrollida kogu juhtmestikku ja aparatuuri ning mõõta selle isolatsioonitakistust. Kontrollimisel tuleb välja selgitada ning kõrvaldada kõik puudused ja vead, näiteks tuleb kinnitada longu vajunud juhtmed, likvideerida halvast kontaktist tingitud rikked lülitites, lambipesades, rühmakilpides. Tuleb kontrollida ka üksikute faaside koormusi ning suure ebaühtluse korral koormused ümber jaotada.

Mitmesugused vead, valgustite halb seisukord ja nende

mustumine vähendavad valgustatust ja seega ka töö tootlikkust, mõjuvad kahjulikult nägemisele ning põhjustavad lisakulusid. Sellepärast tuleb valgusteid regulaarselt kontrollida, pühkida ja puhastada valgustite kõiki osi ja lampe. Seda tehakse kas kuiva või petrooleumis niisutatud lapiga. Eriti tuleb tähelepanu pöörata lambipesa ja lambi vahelisele kontaktile. Sellist puhastamist tuleb teha 1 . . . 3 korda kuus sõltuvalt ruumi õhu tolmusisaldusest.

Lisa

JUHISED LABORATOORSETE TÖÖDE LÄBIVIIMISEKS

Laboratoorsete tööde tegemiseks jaotatakse õpperühm (25...30 inimest) kaheks poolrühmaks, mis töötavad eraldi — mõlemad ühe õppejõuga.

Poolrühmas moodustatakse õpilastest 2...4-kaupa lülid või brigaadid. Lülid teevad kordamööda läbi kõik tööd, mis on programmis ette nähtud. Laboratoorsete tööde tegemist on otstarbekas alustada esimese osa — «Elektrotehnika alused ja elektrimõõtmised» — läbivõtmise järel. Laboratoorsete tööde kvaliteet sõltub sellest, kuidas õpilased on ette valmistunud. Õpilane peab vähemalt nädal aega ette teadma, millist tööd ta hakkab tegema. Ta peab õpiku järgi kordama teoreetilist materjali, tutvuma töö plaaniga, tegema endale selgeks laboratoorses töös seatud eesmärgid ja ülesanded. Igal õpilasel peab olema töövihik, millesse eeltööna kirjutatakse tööplaan, vajalike aparaatide ja seadmete loetelu, elektrilised skeemid, arvutusvalemid, tabelid jms.

Selleks et valida vajalikku aparatuuri, tuleb ligikaudu (täpsusega kuni 10%) arvutada voolud ja pinged kõigis vooluringi osades suurima ning väikseima võimsuse korral. Saadud andmete alusel valida töö tegemiseks vajalik aparatuur ja märkida üles selle tehnilised andmed. Seejärel tuleb teha plaan aparatuuri paigutamiseks töölauale. Mõõteriistad, abi- ja reguleerimisseadmed tuleb paigutada nii, et koostatav lülitus oleks võimalikult lihtne ja ülevaatlik, et lugemite võtmine ja reguleerimine oleksid mugavalt teostatavad, et poleks vaja liigseid liigutusi, et vaatleja asend oleks mugav. Enne lülituse kokkumonteerimist tuleb tutvuda seadmete, aparaatide ja masinate elektriliste skeemidega ning nende omavaheliste lülitusviisidega. Tuleb välja selgitada, millised seadme või masina klemmid vastavad ühele või teisele elektrilise skeemi punktile, millisesse asendisse tuleb viia reostaatide liugkontaktid ja reguleerimisseadmete käepidemed. Alati tuleb püüda elektrilise lülituse elemente ühendada nii, et saadav vooluring oleks võimalikult lihtne ja ülevaatlik. Selle nõude täitmist soodustab mitte ainult seadmete otstarbekas paigutus, vaid ka sobivate ühendusjuhtmete valik. Juhtmete pikkused peavad vastama kaugustele ühendatavate klemmide vahel. Juhtmed, mida mööda kulgeb töövool, on soovitav valida ühtevärvi ja voolule vastava ristlõikega. Abi-vooluringid (vattmeetrite ja arvestite rööpharud jms.) on soovitav ühendada teist värvi ja väiksema ristlõikega juhtmete abil.

Vooluringi ühendamisel on otstarbekas ühendada algul peavooluring, siis rööpharud. Vooluringi koostab üks lüli liige. Teised kontrollivad saadud lülitust. Järgmised lülitused koostavad kordamööda teised lüli liikmed. Elektrilise lülituse kontrollimine toimub peavooluringi ja seejärel ka abivooluringide ülevaatamisega. Kontrollimisel tuleb veenduda kõikide klemmühenduste kindluses, reostaatide liugkontaktide ja reguleerimisseadmete käepidemete õiges asendis, samuti selles, et kõikide mõõteriistade osutid seisaksid skaaladel nullis.

Pärast koostatud lülituse kontrollimist lüli liikmete poolt peab seda tegema ka õppejõud. Ainult tema loal võib lülitust pingestada. Pärast vinnaklüliti sulgemist tuleb teha vajalikud reguleerimised ja saada järjest kõik vajalikud töörežiimid. Algul teha vaatlusi (märkmeteta). Seejärel saada teist korda vajalikud töörežiimid, teha vaatlusi ja märkmeid töövihikusse.

Laboratooriumis tuleb töötada väga ettevaatlikult ja näha ette, milliseid tagajärgi võib põhjustada vooluringi töörežiimi iga muutus.

Töö tegemisel tuleb täita ohutustehnika eeskirju. Kategooriliselt on keelatud puudutada kätega isoleerimata juhtmeid ja klemme, kui lülitus on pingestatud. Eriti ettevaatlikult tuleb töötada vahelduvvooluringidega, mis sisaldavad poole ja kondensaatoreid, kus töö käigus võib tekkida pingeresonants. Sellisel juhul võib pinge tunduvalt ületada võrgupinge.

Kui kõik vajalikud vaatlused ja arvutused on tehtud, näidatakse saadud tulemusi õppejõule, kes annab rahuldavalt tehtud töö korral loa selle lõpetamiseks. Nüüd võetakse lülitus lahti. Seadmete klemmid keeratakse kinni ja juhtmed paigutatakse korralikult oma kohale.

Iga õpilane koostab iga laboratoorse töö kohta aruande. Aruanne vormistatakse kas eriblanketile või ruudulisele paberilehele. Ta peab olema tehtud täpselt ja korralikult. Aruandes peab olema:

1) töö nimetus ja number;
2) õpilase nimi, rühma nimetus ja töö tegemise kuupäev;
3) mõõteriistade ja aparaatide loetelu ning nende tähtsamad tehnilised andmed;
4) lühike töö kirjeldus;
5) lülitusskeemid;
6) tabelina esitatud vaatluste ja arvutuste tulemused;
7) graafikud;
8) järeldused.

SISUKORD

Eessõna 3
Sissejuhatus 5

1. Alalisvooluring

1-1. Põhimõisted 7
1-2. Elektripinge 8
1-3. Elektrivool 10
1-4. Vooluring ja tema elemendid 11
1-5. Ohmi seadus 14
1-6. Elektriline takistus ja -juhtivus 15
1-7. Elektrilise takistuse sõltuvus temperatuurist 18
1-8. Elektriline juhtivus 19
1-9. Elektrijuhid 21
1-10. Töö ja võimsus 24
1-11. Elektrienergia muundumine soojusenergiaks 26
1-12. Juhtmes lubatav vool. Kaitse ülekoormuse eest 27
1-13. Kirchhoffi esimene seadus 28
1-14. Tarbijate (takistite) ühendamine 29
1-15. Kahejuhtmeline liin 34
1-16. Toiteallika kaks töörežiimi 36
1-17. Kirchhoffi teine seadus 38
1-18. Liitahelate arvutamine 39
1-19. Mittelineaarsed elektriahelad 42
1-20. Laboratoorne töö. Pingekadu liinis 46

2. Voolu keemiline toime

2-1. Elektrivool elektrolüütides 47
2-2. Galvaani- ehk primaarelemendid 49
2-3. Akumulaatorid (sekundaarelemendid) 52
2-4. Toiteallikate ühendamine 55

3. Elektromagnetism

3-1. Magnetvoo tihedus. Magnetvoog 59
3-2. Elektromagnetiline jõud 62
3-3. Vooluga juhtmete vastastikune mõju 65
3-4. Magnetiline läbitavus 66

3-5. Magnetvälja tugevus. Magneetimisosaergutus 68
3-6. Koguvoolu seadus 69
3-7. Vooluga pooli magnetväli 70
3-8. Elektromagnetiline induktsioon 72
3-9. Elektrigeneraatori töötamispõhimõte 77
3-10. Elektrimootori töötamispõhimõte 78
3-11. Pöörisvoolud 80
3-12. Ferromagnetiliste materjalide magneetimine 82
3-13. Ferromagnetilised materjalid 86
3-14. Magnetahela arvutus 90
3-15. Elektromagnetid 92
3-16. Induktiivsus. Endainduktsiooni elektromotoorjõud 93
3-17. Magnetvälja energia 95

4. Kondensaatorid. Elektriisolatsioon

4-1. Elektrimahtuvus. Kondensaatorid 97
4-2. Kondensaatorite ühendamine 100
4-3. Elektrivälja energia 102
4-4. Dielektrik elektriväljas 103
4-5. Gaas elektriväljas 107
4-6. Elektriisolatsioon 110
4-7. Elektriisoleermaterjalid 111

5. Vahelduvvool

5-1. Vahelduvvoolu periood ja sagedus 118
5-2. Siinuselise emj. saamine 119
5-3. Faasinihe 123
5-4. Vektordiagramm 125
5-5. Voolu ja pinge efektiivväärtused 127
5-6. Üldisi märkusi vahelduvvooluahelate kohta 129
5-7. Takistusega vooluring 130
5-8. Induktiivsusega vooluring 132
5-9. Aktiivtakistuse ja induktiivsusega vooluring 136
5-10. Aktiivtakistuste ja induktiivsustega mittehargnev vooluring 141
5-11. Aktiivtakistuste ja induktiivsustega hargnev vooluring . . 143
5-12. Mahtuvusega vooluring 146
5-13. Pingeresonants 149
5-14. Vooluresonants 152
5-15. Võimsustegur 154
5-16. Aktiiv- ja reaktiivenergia 156
5-17. Laboratoorne töö. Aktiivtakistuse, induktiivsuse ja mahtuvusega vahelduvvooluring 157
5-18. Laboratoorne töö. Pooli ja kondensaatori rööpühendus . . 158

6. Kolmefaasiline vool

6-1. Kolmefaasilise voolu saamine 160
6-2. Generaatori faasimähiste tähtühendus 162
6-3. Generaatori faasimähiste kolmnurkühendus 164
6-4. Tarbijate tähtühendus 165
6-5. Tarbijate kolmnurkühendus 169

6-6. Tarbijate ühendamine kolmefaasilisse võrku 174
6-7. Laboratoorne töö. Neljajuhtmeline kolmefaasiline vooluring 175
6-8. Laboratoorne töö. Kolmejuhtmeline kolmefaasiline vooluring 175

7. Elektrimõõtmised ja -mõõteriistad

7-1. Põhimõisted 177
7-2. Elektrimõõteriistade liigitus 178
7-3. Mõõteriistade mõõtemehhanismid 182
7-4. Voolu ja pinge mõõtmine 187
7-5. Võimsuse mõõtmine 196
7-6. Elektrienergia mõõtmine 201
7-7. Takistuse mõõtmine 205
7-8. Mitteelektriliste suuruste elektriline mõõtmine 211
7-9. Laboratoorne töö. Isolatsioonitakistuse mõõtmine 226
7-10. Laboratoorne töö. Induktsioonarvesti kontrollimine . . . 226
7-11. Laboratoorne töö. Võimsuse mõõtmine kolmefaasilises süsteemis 227
7-12. Laboratoorne töö. Termoelektrilise püromeetri gradueerimine ja tema kasutamine temperatuuri mõõtmiseks . . . 229

8. Alalisvoolumasinad

8-1. Alalisvoolumasinate otstarve 232
8-2. Alalisvoolumasina ehitus 232
8-3. Alalisvoolumasina töötamispõhimõte 235
8-4. Ankrumähise ehitus 237
8-5. Ankrumähise elektromotoorjõud 240
8-6. Pöördemoment masina võllil 241
8-7. Alalisvoolumasina mehhaaniline võimsus 241
8-8. Ankrureaktsioon 242
8-9. Voolu kommuteerimine 244
8-10. Alalisvoolugeneraatorite tüübid 250
8-11. Võõrergutusgeneraator 251
8-12. Rööpergutusgeneraator 254
8-13. Jadaergutusgeneraator 256
8-14. Kompaundgeneraator 257
8-15. Generaatorite rööptalitlus 258
8-16. Alalisvoolumootorid 260
8-17. Rööpergutusmootor 262
8-18. Jadaergutusmootor 266
8-19. Kompaundmootor 268
8-20. Kaod ja kasutegur 269
8-21. Keevitusgeneraatorid 270
8-22. Kolme harjaga generaator 271
8-23. Masinvõimendi 272
8-24. Leonardajam 274
8-25. Laboratoorne töö. Rööpergutusmootor 275
8-26. Laboratoorne töö. Rööpergutusgeneraator 277

9. Transformaatorid

9-1. Trafo otstarve 279
9-2. Ühefaasilise trafo töötamispõhimõte ja ehitus 280

9-3. Trafo tühijooks 283
9-4. Trafo koormus 286
9-5. Kolmefaasiline trafo 288
9-6. Trafode rööptalitlus 292
9-7. Trafo pinge reguleerimine 294
9-8. Mitme mähisega trafod 295
9-9. Autotrafod 295
9-10. Mõõtetrafod 297
9-11. Trafo energiakaod ja nende määramine 300
9-12. Trafo kasutegur 301
9-13. Trafo kuumenemine ja jahutamine 302
9-14. Keevitustrafod 303
9-15. Gaaslahendustrafod 305
9-16. Laboratoorne töö. Ühefaasiline trafo 316

10. Asünkroonmasinad

10-1. Asünkroonmootori otstarve 307
10-2. Pöörleva magnetvoo saamine 307
10-3. Staatorimähis 311
10-4. Rootorimähised 314
10-5. Asünkroonmootori töötamispõhimõte 316
10-6. Rootori libistus 317
10-7. Elektromotoorjõu ja voolu sagedus rootorimähises . . . 318
10-8. Elektromotoorjõud staatori- ja rootorimähises 318
10-9. Rootorimähise takistus 319
10-10. Vool rootorimähises 319
10-11. Asünkroonmootori tööprotsess 320
10-12. Mootori pöördemoment 320
10-13. Asünkroonmootorite käivitamine 324
10-14. Asünkroonmootori pöörlemiskiiruse muutmine 327
10-15. Kahe- ja ühefaasilised asünkroonmootorid 329
10-16. Asünkroonmootori kaod ja kasutegur 334
10-17. Asünkroonmootoreid toitva võrgu võimsusteguri parendamine 335
10-18. Laboratoorne töö. Kolmefaasiline asünkroonmootor . . . 336

11. Sünkroonmasinad

11-1. Sünkroonmasinate otstarve 338
11-2. Sünkroonmasina ehitus ja töötamispõhimõte 339
11-3. Kolmefaasilise sünkroongeneraatori töö koormusel . . . 341
11-4. Sünkroongeneraatorite lülitamine rööbiti 343
11-5. Sünkroongeneraatorite töötamine rööbiti võrguga konstantse ergutusvoolu korral 345
11-6. Sünkroonmootor 347
11-7. Sünkroonmasina töötamine rööbiti võrguga muutuva ergutusvoolu korral 348
11-8. Elektrimasinate hooldamine 349

12. Automaatseadmete elektrimasinad

12-1. Masinate otstarve 354
12-2. Alalisvoolu-servomootor 355

12-3. Kahefaasiline vahelduvvoolu-servomootor 358
12-4. Kahefaasiline ferromagnetilise õõnes- või massiivrootoriga asünkroonmootor 362
12-5. Käivitustakistiga ühefaasiline asünkroonmootor 362
12-6. Ühefaasiline sünkroonne reaktiivmootor 363
12-7. Kolmefaasiline ja ühefaasiline sünkroonne hüstereesimootor 365
12-8. Universaalne kommutaatormootor 366
12-9. Alalisvoolu-tahhogeneraator 367
12-10. Mittemagnetilise õõnesrootoriga vahelduvvoolu-tahhogeneraator 368
12-11. Pöördtrafod 369
12-12. Asünkroonmasinad sünkroonsidestuseks 372
12-13. Elektrivõll 375

13. Tööstuselektroonika

13-1. Elektronseadiste liigitus ja otstarve 376
13-2. Väikese võimsusega elektronalaldid. Silumisfiltrid . . . 377
13-3. Keskmise võimsusega ioonventiilid 382
13-4. Pooljuhtide elektrijuhtivus 386
13-5. Väikese ja keskmise võimsusega pooljuhtalaldid 389
13-6. Suure võimsusega elavhõbealaldid 396
13-7. Ignitron 400
13-8. Vaheldi 401
13-9. Kolme elektroodiga lamp 402
13-10. Nelja ja viie elektroodiga lambid 404
13-11. Elektronvõimendid 406
13-12. Transistorid — pooljuht-võimenduselemendid 411
13-13. Generaatorid 414
13-14. Stabilisaatorid 420
13-15. Elektronkiiretoru 423
13-16. Elektronostsillograaf 425
13-17. Fotoelemendid. Fototakistid 426
13-18. Termotakisti 432
13-19. Laboratoorne töö. Pooljuhtalaldid 434
13-20. Laboratoorne töö. Elektronostsillograaf 436

14. Elektriajamid ja juhtimisaparatuur

14-1. Elektriajami mõiste 441
14-2. Elektrimasinate kuumenemine ja jahutamine 442
14-3. Mootori võimsuse valik kestevrežiimis 444
14-4. Mootori võimsuse valik lühiajalises režiimis 446
14-5. Mootori võimsuse valik vaheajalises režiimis 447
14-6. Elektrimasinate juhtimisaparatuur 448
14-7. Vinnaklülitid 449
14-8. Pakettlülitid 452
14-9. Elektrimootorite käivitus- ja reguleerimisreostaadid . . . 453
14-10. Kontrollerid 455
14-11. Sulavkaitsmed 457
14-12. Automaatsed õhklülitid (automaadid) 460
14-13. Kontaktorid 461
14-14. Releed 464

14-15. Magnetkäivitid 467
14-16. Õlilülitid 469
14-17. Koormuslülitid 471
14-18. Magnetvõimendid 472
14-19. Elektriseadmete kaitsemaandus 474

15. Elektroautomaatika alused

15-1. Üldmõisted 477
15-2. Automaatkaitse releede abil 478
15-3. Rööpergutusega alalisvoolumootori käivitamise automatiseerimine 478
15-4. Automaatreguleerimissüsteemi põhimõtteline skeem . . . 480
15-5. Lülitusskeem generaatori pinge automaatseks reguleerimiseks 482
15-6. Tagasiside automaatreguleerimissüsteemides 485
15-7. Pinge automaatne reguleerimine elektrimasinvõimendi abil 487
15-8. Lülitusskeem alalisvoolumootori pöörlemiskiiruse stabiliseerimiseks 488
15-9. Sünkroonne järgivajam 489

16. Arvutusseadmed

16-1. Arvutusseadmete otstarve 492
16-2. Elektronarvutusseadmete süsteemid 493
16-3. Analoogarvutusseadmed 494
16-4. Arvutused potentsiomeetritel töötavates modelleerimisseadmetes 496
16-5. Numberarvutusseadmete otstarve ja üldisi andmed nende kohta 499
16-6. Numberarvutusseadmete töötamispõhimõte 500
16-7. Numberarvutusseadme üksikute blokkide koostöö 502
16-8. Kahendsüsteem 503
16-9. Aritmeetilised tehted kahendsüsteemi arvudega 505
16-10. Mõningate numberarvutusseadmete elementide töötamispõhimõte 507
16-11. Kahendloenduri töötamispõhimõte 513
16-12. Aritmeetikaseadme summaatori töötamispõhimõte 514
16-13. Mäluseadmed 518
16-14. Sisend- ja väljundseadmed 523

17. Elektrotehnoloogia

17-1. Üldisi andmeid 526
17-2. Elektrokeemilised meetodid 527
17-3. Elektrotermilised meetodid 534
17-4. Elektroerosioontöötlus 553
17-5. Ultrahelitöötlus 555
17-6. Elektrostaatilised seadmed 558

18. Elektrivalgustus

18-1. Põhimõisted ja mõõtühikud 563

18-2. Valgustusallikad 567
18-3. Valgustusseadised 572
18-4. Elektrivalgustuse arvutus 577

19. Elektrienergia ülekanne ja jaotamine

19-1. Üldisi andmeid elektrienergia ülekande kohta 586
19-2. Elektriliinid ja -võrgud 590
19-3. Tööstusettevõtete ja tsehhide elektrivarustus 598
19-4. Trafoalajaamad ja tööstusettevõtete jaotusseadmed . . . 601
19-5. Juhtmete arvutus 609
19-6. Sisevõrkude ehitus 617
19-7. Valgustusseadmete hooldamine 633
Lisa. **Juhised laboratoorsete tööde läbiviimiseks** 635

Попов Виктор Степанович, Николаев Сергей Александрович. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. Перевел с русского А. Ронк. На эстонском языке. Издательство «Валгус». Таллин, Пярнуское шоссе, 10.

Toimetajad R. Võrk ja L. Abo. Kunstiline toimetaja R. Kelu. Tehniline toimetaja S. Kohu. Korrektor E. Bitter. Laduda antud 22. IV 1969. Trükkida antud 28. XI 1969. Kohila Paberivabriku trükipaber nr 2. 54×84/16. Trükipoognaid 40,25. Tingtrükipoognaid 33,61. Arvestuspoognaid 30,32. Trükiarv 8000. Tellimuse nr. 2611. H. Heidemanni nim. Trükikoda. Tartu, Ülikooli 17/19. II.

Hind 97 kop.

Kontrolleksemplar

97 kop.

A-30433
76336

