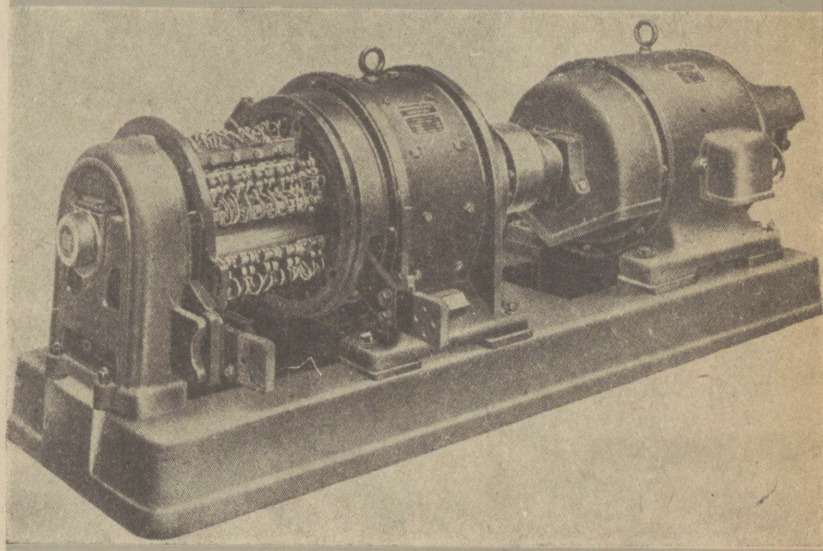
S. A. ASTAFJEV
G. P. SOROKIN
E. K. JURKOVSKI

ELEKTROTEHNIKA



S. A. ASTAFJEV — G. P. SOROKIN — E. K. JURKOVSKI

ELEKTROTEHNIKA

ÕPIK MITTE-ENERGEETIKA TEHNIKUMIDELE

RK
„PEDAGOOGILINE KIRJANDUS"
TALLINN 1948

Bibliotheca
Universitatis
Tartuensis
1948:0429

TARTU
ÜLIKOOL

18367
A-17186

EESSÕNA

Käesolev raamat on kirjutatud arvestades erilisi nõudeid, mis esitatakse temale kui mitte-energeetika tehnikumide õpikule. Ühenduses sellega on elektrienergia saamisega seotud küsimusi puudutatud ainult üldjoontes. Elektrotehnika teooria aluste kõrval on pearõhk pandud elektrimootorite omadustele ja tööstuste elektriseadmetele.

Küllalt üksikasjaliselt on toodud ka elektrimõõtmised, mis omavad suurt tegelikku tähtsust tehnikuile, kes töötavad elektrifitseeritud masinate ja tööpinkide ekspluatatsiooni alal.

Peale E. K. JURKOVSKI, kes kirjutas raamatu suurema osa, võtsid selle õpiku koostamisest vahetult osa ins. S. A. ASTAFJEV, kes kirjutas I osa — „Alalisvool" ning VI osa peatükid XXIII ja XXVII — „Elektron- ja ioonseadised" ja „Elektrotermia", ning ins. G. P. SOROKIN, kes kirjutas III osa — „Elektrimõõtmised" ning II osa peatükid VII kuni IX — „Oomiline ja induktiivne takistus", „Võimsus. Tarvitajate ühendamine" ja „Keerdvool".

E. JURKOVSKI.

I peatükk.

PÕHIMÕISTED.

1. Voolutugevus.

Käesoleva sajandi alguseni peeti aatomit aine väikseimaks jagamatuks osaks, kuid viimasel ajal toimetatud rohkearvulised katsed muutsid seni õigeks peetud kujutlust. Nüüd võib lugeda lõplikult kindlakstehtuks, et mitmesuguste ainete (keemiliste elementide) aatomid on tegelikult enam või vähem keerulised mehhanismid, millede koosseisu kuuluvad raskemad materiaalsed osakesed — *tuumad* ja pisimad materiaalsed osakesed — *elektronid*, kusjuures viimased vahetpidamatult liiguvad pöörlevalt tuuma ümber, nagu planeedid pöörlevad päikese ümber.

Igasuguse aine aatomi koosseisu kuuluvad tuumad ja elektronid omavad omadustelt üksteisele vastupidiseid elektrilisi laenguid, *kusjuures loetakse, et tuumad on laetud positiivselt, elektronid aga — negatiivselt*. Aatomi normaalses olukorras elektronide negatiivsete laengute summa on võrdne tuuma positiivse laenguga. Seepärast normaalses olukorras aatom osutub elektrilisest seisukohast neutraalseks, kuna positiivsed ja negatiivsed laengud kompenseeruvad. Ühe või mitu elektroni kaotanud aatom osutub positiivselt laetuks. Endale liigse elektroni saanud aatom aga omandab negatiivse laengu. Selliseid aatomeid nimetatakse *positiivseteks ja negatiivseteks ioonideks*.

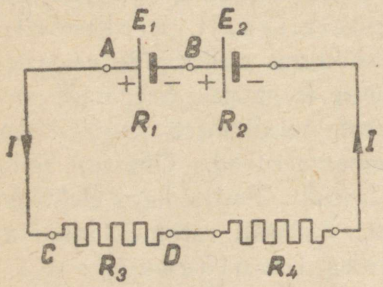
Elektrotehnikas õpitakse tundma elektrilaengute, s. o. ioonide ja elektronide käitumist ja nende laengutega seotud mitmesuguseid väliseid nähteid. Ühe elektroniga seotud elektrilaeng ehk elektrihulk osutub kõige väiksemaks elektrihulgaks looduses. Niivõrd kui üks elektron omab alati ühte ja sedasama laengut, oleks ju võidud seda võtta elektrihulga mõõtühikuks; kuid see osutub ebakohaseks, kuna praktikas esinevad elektrihulgad —

elektrilaengud — on liiga suured, võrreldes ühe elektroni laenguga, ning arvud kujuneksid liiga suurteks, ebakohasteks käsitamisel. Elektrihulga praktiliseks mõõtühikuks on kulon, mis kujutab endast elektronide kaunis suurt kogust. Ümmarguselt üks kulon võrdub $6 \cdot 10^{18}$ elektroni laenguga.

Käesolevas raamatus käsitletakse laengute liikumisega, nõndanimetatud elektrivooluga seotud nähteid, kusjuures edaspidi elektrivoolu all me mõistame elektronide ja ioonide korrapärast, ühtlast liikumist (ioonide liikumist ainult juhtudel, kui vool läbib vedelikke või gaase).

Füüsikast on teada, et igas kehas esineb molekulide korrapäratu termiline liikumine. Sealjuures aine aatomitega seotud elektronid peale oma pöörleva liikumise aatomi tuuma ümber võtavad osa veel korrapäratust termilisest liikumisest — kuid säärase liikumisega ei kaasne mingisuguseid elektrilisi väliseid avaldusi ning seda ei loeta elektrivooluks. Kui aga lisaks korrapäratule liikumisele kõik elektronid antud aines nihkuvad mingisuguses suunas, siis säärast elektrilaengute liikumist nimetatakse elektrivooluks.

Leppeliselt loetakse, et elektrivool voolab sinna, kuhu liiguvad positiivsed laengud. Niivõrd kui metallist juhtide positiivsed laengud on liikumatud ning liiguvad ainult negatiivsed laengud — elektronid, on selge, et leppeline elektrivoolu suund tavalistes elektrijuhtides osutub just vastupidiseks laengute tegelikule liikumisele. See tähendab, et kui mingisuguse vooluallika klemmidele on märgitud + (pluss) ja — (miinus), siis leppeliselt loetakse, et välisahelas voolab vool plussilt miinuse poole (vt. joon. 1), kuna aga tegelikult elektronid liiguvad miinuselt plussi poole.



Joon. 1.

Suuruselt elektrivool iseloomustub voolutugevusega.

Voolutugevust määratakse elektrihulgaga, mis ajaühiku (sekundi) vältel voolab läbi juhi mingist ristlõikest.

Voolutugevuse mõõtühikuks on amper (A). Voolu tugevusel 1 A voolab läbi juhi ristlõikest 1 sekundi vältel 1 kulon elektrit.

Oleks ekslik arvata, et voolutugevus on määratud ainuüksi elektrilaengute liikumise kiirusega. Selle selgituseks olgu toodud järgmine näide: kui tänaval liigub rongkäik, siis vaatleja eest ajaühiku vältel mööduvat inimeste hulka ei määra mitte üksi rongkäigu liikumise kiirus, vaid see oleneb

veel inimeste arvust kolonni reas, s. t. kolonni laiusest. Siintoodud voolutugevuse määratlusest selgub, et nimetus voolu „tugevus" ei vasta nähtuse olemusele ja me kasutame teda ainult leppeliselt, pidades silmas, et elektrivoolu tugevusel pole midagi ühist mehaanilise tugevusega.

2. Juhid ja mittejuhid. Takistus.

Eespool, aatomi ehituse kirjeldamisel märkisime, et elektronid asuvad alalises pöörlevas liikumises tuuma ümber. Samal ajal elektrivooluks loetakse elektronide korrapärast liikumist aine sees, mis on võimalik ainult siis, kui elektronid pole seotud aatomitega ja võivad liikuda sõltumatult viimastest. Me põrkame siin vastuolule ja oleme õigustatud küsima: kas on võimalik elektri voolamine, kui elektronid on seotud aine aatomitega? Vastus sellele küsimusele viib meid uute kujutluste juurde.

Kui antud aines elektronid on kindlalt seotud aatomitega, siis elektri voolamine — elektronide ühtlane liikumine — selles aines pole võimalik. Niisuguseid aineid nimetatakse mittejuhtideks ehk isolaatoriteks. Kui aga elektronid nõrgimal välisel mõjutusel lahkuvad aatomitest ja võivad iseseisvalt edasi liikuda, siis elektri voolamine on võimalik ja niisuguseid aineid nimetatakse elektrijuhtideks.

Tüüpilisteks isolaatoriteks osutuvad: klaas, eboniit, kummi, siid, õhk ja paljud teised ained.

Kõik metallid seevastu on elektrijuhid; mittemetallilistest juhtidest võiks nimetada elektrotehnikas sageli esinevat grafiiti või sütt.

Tahketes elektrijuhtides tekib elektri voolamine ainult elektronide liikumise näol, neil juhtidel on elektroniline juhtivus. Vedelates elektrijuhtides, milledeks on kõik soolade ja hapete lahused, esinevad alati positiivselt ja negatiivselt laetud ioonid, millede liikumine vastastikku vastupidistes suundades tekitabki elektri voolamist vedelikkudes; neil juhtidel on iooniline juhtivus.

Elektri voolamisel juhtides elektrilaengud ei liigu mitte vabalt, vaid põrkavad aeg-ajalt kokku aine molekulidega; sellisel viisil elektrijuht osutab siiski teatavat takistust elektri voolamisele.

Edaspidi takistuse all me mõistame elektrijuhi omadust takistada elektrivoolu liikumist.

Rohkearvulised katsed on näidanud, et juhi takistus oleneb väga mitmesugustest teguritest; sõnaliselt võiks seda olenevust väljendada järgmiselt: takistus on võrdeline juhi pikkusega, pöördvõrdeline juhi ristlõikega ning oleneb juhi materjalist. Kui

võtta tarvitusele järgmised tähised: takistus — R, pikkus — l (meetrites), ristlõige — q (ruutmillimeetrites), siis takistuse eelnimetatud olenevust võib väljendada järgmise valemiga (1):

$$R = \varrho \frac{l}{q}, \qquad (1)$$

kus ϱ (loe: roo) on juhi materjalist olenev tegur. Selgitame selle teguri olemust.

Kui võtta juht pikkusega 1 m ja ristlõikega 1 mm^2 ning asetada need arvud l ja q kohale valemisse (1), siis viimane omandab järgmise kuju:

$$R = \varrho,$$

millest nähtub, et ϱ on juhi takistus, kui selle pikkus on 1 m ja ristlõige 1 mm^2.

Tegurit ϱ nimetatakse aine eritakistuseks.

Eritakistuse väärtus mitmesugustel materjalidel on erinev; lähemaid andmeid vaata tabelis I.

Takistuse mõõtühikuks on oom (Ω).

Oomi rahvusvaheliseks etalooniks (normaaliks) on elavhõbeda sammas pikkusega 1,063 m ja ristlõikega 1 mm^2.

Kasutades valemit (1) ja tabelit I võime antud mõõtude ja materjali järgi leida juhi takistuse.

Näide 1. Leida vaskjuhtme takistus, kui selle pikkus on 40 m ja ristlõige — 2,5 mm^2.

Tabelist I leiame vase eritakistuse $\varrho = 0{,}0175$. Edasi, kasutades valemit (1) leiame:

$$R = \varrho \cdot \frac{l}{q} = \frac{0{,}0175 \cdot 40}{2{,}5} = 0{,}28\ \Omega.$$

Näide 2. Traadi pikkus on 5 m, traadi läbimõõt — 0,5 mm, takistus — 28,03 Ω. Määrata traadi materjal.

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

Väljendades traadi ristlõiget tema läbimõõdu kaudu ja asetades saadud valemisse vastavad arvud, saame:

$$\varrho = \frac{R \cdot \pi \cdot d^2}{l \cdot 4} = \frac{28{,}03 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}5^2}{5 \cdot 4} = 1{,}1.$$

Tabelist I leiame, et säärast eritakistust omab kroomnikkel.

Juhi pikkuse, ristlõike ja materjali kõrval oleneb juhi takistus veel temperatuurist, kusjuures peaaegu kõigil metallist juhtidel takistus temperatuuri tõusuga suureneb. See on seletatav sellega, et temperatuuri tõusuga suureneb aine molekulide korrapäratu termiline liikumine, ning suurenenud korrapäratu liikumise tõttu elektronide korrapärane liikumine on raskendatud või, teiste sõnadega, suureneb juhi takistus.

Vastupidiselt sellele söe takistus temperatuuri tõusuga väheneb. See esimesel pilgul arusaamatu nähe seletub siiski väga lihtsalt. Põhjus seisneb selles, et normaalsel temperatuuril söe vabade elektronide arv on suhteliselt väike, temperatuuri tõusul aga see kaunis järsku suureneb; see põhjustabki söe takistuse vähenemise soojenemisel.

Katsume nüüd selgitada, millisel määral muutub juhi takistus temperatuuri muutumisel. Tähistades R_1-ga juhi takistuse algtemperatuuril $t_1°$ ning R_2-ga tema takistuse kõrgemal temperatuuril $t_2°$, võime kirjutada järgmise avaldise:

$$R_2 = R_1 + \Delta R, \tag{2}$$

kusjuures ΔR (loe: delta R) on takistuse juurdekasv. Temperatuuri muutumisel see juurdekasv võib olla positiivne või negatiivne, sõltuvalt materjali omadustest.

Katsed näitavad, et juurdekasv on võrdeline takistuse algväärtusega ja temperatuuri juurdekasvuga ning oleneb juhi materjalist. Seda võib matemaatiliselt väljendada järgmiselt:

$$\Delta R = \alpha \cdot R_1 \cdot (t_2° - t_1°), \tag{3}$$

kus $t_2° - t_1°$ on temperatuuri juurdekasv ja α on nn. temperatuuritegur, mis oleneb materjali omadustest. Temperatuuriteguri olemuse selgituseks valime algtakistuseks 1 Ω ja temperatuuri juurdekasvuks 1° C; asetades need väärtused valemisse (3) leiame:

$$\Delta R = \alpha,$$

millest selgub järgmine määratlus: temperatuuritegur α näitab 1 Ω-se algtakistuse juurdekasvu oomides temperatuuri muutumisel 1° C võrra. Mitmesuguste metallide temperatuuritegurite väärtused on antud tabelis I.

Tabel 1.

Mitmesuguste metallide eritakistused (ϱ) ja temperatuuritegurid (α).

Materjal	Eritakistus ϱ 20° C juures	Temperatuuritegur α
Alumiinium	0,03	0,004
Hõbe	0,016	0,0036
Konstantaan	0,5	0,00003
Kroomnikkel	1,1	0,00017
Manganiin	0,42	0,00001
Nikeliin	0,4	0,0002
Raud	0,1 ... 0,14	0,0045
Reotaan	0,47	0,0004
Vask	0,0175	0,004

Asetades ΔR suuruse valemist (3) valemisse (2), saame:

$$R_2 = R_1 + \alpha \cdot R_1 \cdot (t_2° - t_1°),$$

ning moodustades selle vähe ümber, saame lõplikult:

$$R_2 = R_1 \, [1 + \alpha \, (t_2° - t_1°)]. \qquad (4)$$

Takistusetaloonide (normaalide) valmistamine on suuresti raskendatud temperatuuri mõju tõttu. Tuleb otsida erilisi, võimalikult väikese temperatuuriteguriga sulameid (konstantaan, manganiin ja teised), ning peale selle tuleb näidata temperatuur, mille juures normaal omab õiget takistust; teistsuguste temperatuuride puhul tuleb takistuse ümberarvutamist teostada valemi (4) alusel.

Kuid takistuse muutumisel on ka hea külg: teades mingi juhi alg- ja lõpptakistust on võimalik valemi (4) abil arvutada temperatuuri tõusu. Seesugune temperatuuri määramise meetod on kasutusel mitmesuguste elektrimasinate ja aparaatide soojenemise suuruse määramiseks, samuti ka temperatuuri määramiseks mingis ahjus, kusjuures selleks paigutatakse ahju eriline juhe tuntud algtakistusega.

Näide 3. Elektrimootori vasktraadist mähis temperatuuril 20° C omas takistust 0,08 Ω; millise temperatuurini soojenes mootor, kui ta takistus pärast teatud aega töötamist oli 0,0928 Ω?

Kasutades valemit (4) ja kujundades ta ümber otsitava temperatuuri $t_2°$ suhtes, leiame:

$$t_2° = \frac{\frac{R_2}{R_1} - 1}{\alpha} + t_1°.$$

Asetades valemisse antud suurused, saame:

$$t_2 = \frac{\frac{0{,}0928}{0{,}08} - 1}{0{,}004} + 20 = 60^\circ \text{ C}.$$

Temperatuuritegur vasele on võetud tabelist I.

Näide 4. Mitmekordselt muutub raudtraadi takistus tema soojenemisel 0° C kuni 100° C?

Ülesande kohaselt tuleb leida suhe $\frac{R_2}{R_1}$. Kasutades valemit (4) ning võttes raua temperatuuriteguri tabelist I, saame:

$$\frac{R_2}{R_1} = 1 + \alpha (t_2^\circ - t_1^\circ) = 1 + 0{,}0045 \ (100 - 0) = 1{,}45.$$

Vastus: 1,45-kordselt.

3. Pinge. Elektromotoorne jõud.

Vaadeldes elektrivoolu elektronide liikumisena, pole me seni uurinud seda liikumist tekitavaid põhjusi. Liikudes juhi sisemuses elektronid põrkavad kokku aine molekulidega, kaotades oma kiirust ja vooluallikalt saadud energiat. Selleks, et elektronide liikumist pidevalt alal hoida, tuleb nähtavasti ikka ja jälle kulutada uusi energia hulki, kusjuures energia andjaks peaks olema vastav vooluallikas. Energia, mida kaotab elektrihulk üks kulon tema voolamisel vooluringi teatud osas, nimetatakse pingelanguseks.

Energia, mida kaotab üks kulon terves kinnises vooluringis, võrdub pingelanguste summaga. Voolu alalhoidmiseks vooluringis tuleb pingelanguste summa kompenseerida nõndanimetatud elektromotoorse jõuga (lühendatult EMJ), mida annab elektrienergia allikas. Elektrienergia allikaid nimetatakse generaatoriteks. Niisiis, generaatori elektromotoorse jõu all mõistame seda energia hulka, mida tuleb anda elektrihulgale üks kulon tema juhtimiseks läbi kogu kinnise vooluringi.

Edaspidi tuleb sageli tegelda võrgupingega. See on seletatav sellega, et praktikas mitmesugused voolutarvitajad on ühendatud toitevõrgu juhtmetega, asudes kaugel elektrienergia allikast. Seepärast on tarvitaja enamasti huvitatud just pingest võrgujuhtmete vahel, mitte aga vooluallika elektromotoorsest jõust. Sealjuures tuleb mõista, et võrgupinge võrdub elektrienergia vooluallika elektromotoorse jõuga,

maha arvatud pingelangused nii vooluallikas endas kui ka toitejuhtmete kogu pikkuses.

Võib üles lugeda terve rea tingimusi, milledes tekib elektri voolamist põhjustav jõud ehk nn. elektromotoorne jõud.

Lihtsaimad elektromotoorse jõu saamise tingimused on järgmised: kui asetada vasest ja tsingist plaadid hapendatud vette ning peaIpool vedeliku pinda ühendada plaadid omavahel mingi juhtmega, siis voolab selles elektrivool, mida võib tõendada mitmesugusel viisil. Nende viiside vaatlusel me praegu ei peatu, kuna neid käsitletakse vastavas järjekorras allpool. Niivõrd kui elektrivool on tekitatud elektromotoorse jõu abil, järeldame, et hapendatud vette asetatud vase ja tsingi vahel tekibki elektromotoorne jõud. Seesugune elektromotoorse jõu saamise algelisem viis on kasutusel nõndanimetatud nõrkvoolutehnikas (telegraaf, telefon, raadio). Tugevvoolutehnikas (elektrijõujaamad) saadakse elektromotoorne jõud juhtme liikumisel magneti pooluste vahel; see viis annab võimaluse muundada mehaanilist energiat elektrienergiaks, kusjuures saadava elektrienergia hulk on väga suur võrreldes esimese viisiga.

Mitmesugustes tingimustes tekivad suuruselt mitmesugused elektromotoorsed jõud. Nende võrdluseks omavahel võeti tarvitusele EMJ mõõtühikuna — volt *(V)*.

Selleks, et saada ettekujutust selle mõõtühiku suurusest, esitame mõningaid näiteid: vase ja tsingi vahel tekkiv EMJ võrdub ligikaudselt 1 voldiga; tavalises valgustusvõrgus kasutatakse EMJ 120 või 220 volti. Võimsa elektrijõujaama elektrienergia ülekandmiseks kasutatakse EMJ suuruses 100 000 volti. Suurim EMJ, mida praegusel ajal saadakse erilistes kõrgepinge-laboratooriumides, on mitu miljonit volti. Voldi täpsema määratluse saame me järgmise peatüki esimeses punktis.

Tuleks märkida, et elektrivoolu võib väga mitmes suhtes võrrelda torudes voolava veega. Näiteks, voolutugevust võib võrrelda veekuluga, väljendatult näiteks liitrites ühes sekundis; elektromotoorset jõudu võib võrrelda survega, mille all vesi jookseb.

Et vältida võimalikke ebaõigeid oletusi, märgime veel järgmist: elektrivõrgu juhtmete vaheline pinge on antud seadmele ligikaudselt püsiv väärtus ja on ära määratud vooluallika elektromotoorse jõuga; voolutugevus juhtmetes on üldiselt muutlik väärtus, ta ei olene elektrienergia allikast ning sõltub tarvitajast; näiteks oleneb voolutugevus sisselülitud elektrilampide arvust või töötavate mootorite võimsusest. Teiste sõnadega, voltide arv antud elektrivõrgus on kindel väärtus, kuna amprite arv kõigub, olenevalt tarvituse suurusest, nullist kuni kaitsmetega piiratud väärtuseni.

Tuleb veel rõhutada, et elektrienergia allikas ei tooda elektrone, vaid ainult tekitab elektromotoorset jõudu, mis sunnib liikuma kõigis juhtmeis olemasolevaid vabu elektrone.

Elektrotehnikas esineb veel sageli mõiste potentsiaalide vahe (potentsiaalide diferents) Tuleb märkida, et see termin vastab täiesti enamtarvitatavale terminile pinge.

II peatükk.

ALALISVOOLU PÕHISEADUSED.

4. Ohmi seadus.

Vaatleme vooluringi mingit osa, mille takistus on R oomi. Voolaku selles osas vool tugevusega I amprit.

Elektrihulga iga kulon, voolates selles osas, kulutab teatavat energiahulka, mida me nimetasime pingelanguseks selles osas. Märgime seda suurust tähega U.

Pingelangus vooluringi mingis osas on seda suurem, mida suurem on selle takistus ia mida suurem on voolutugevus:

$$U = I \cdot R. \qquad (5)$$

Vaadeldes ühe kuloni ümberpaiknemist kogu kinnises vooluringis, peame valemi (5) vasemasse ossa asetama kogu energia, mida kulon kulutab vooluringi kogutakistuse ületamiseks.

See energia võrdub, nagu nägime eelmises punktis, generaatori elektromotoorse jõuga. Tähistades viimast tähega E ning vooluringi kogutakistust — ΣR (loe: sigma R), võime kirjutada valemi (5) järgmisel kujul:

$$E = I \cdot \Sigma R.$$

Siit võime leida voolutugevuse, kui on antud generaatori EMJ ja vooluringi kogutakistus:

$$I = \frac{E}{\Sigma R};$$

ehk sõnaliselt: voolutugevus on võrdeline vooluallika elektromotoorse jõuga ning pöördvõrdeline vooluringi kogutakistusega. Viimast avaldust nimetatakse Ohmi seaduseks kogu vooluringile. Kogutakistuse ΣR hulka tuleb arvata ka vooluallika sisetakistus.

Ohmi seadust võib rakendada ka vooluringi üksikule osale. Sel juhul tuleb valemi lugejasse kirjutada vastava osa pinge U, ning nimetajasse — vastava osa takistus R:

$$I = \frac{U}{R}. \qquad (6)$$

Valemite (5) ja (6) vaatlusest selgub, et vooluringi mingi osa pingelangus võrdub pingega vooluringi samas osas. See on aga õige ainult siis, kui vaadeldavas vooluringi osas ei esine EMJ, s. t. pole sisse lülitud generaator.

Näiteks pinge vooluringi osas CD (joon. 1) on võrdne $U_{CD} = I \cdot R_3$, kuid pinge vooluringi osas AB, kuhu on sisse lülitud generaator elektromotoorse jõuga E_1, leiame vastavalt punktis 3 öeldule kui vahe (diferentsi) generaatori EMJ ja generaatori sisemise pingelanguse vahel, s. t. $U_{AB} = E_1 - I \cdot R_1$, kus R_1 on generaatori sisetakistus.

Ohmi seadus iseendast pole keeruline, kuid rakendades teda mitmesugustel erijuhtudel, võib kergesti eksida, asetades sellesse mittevastavad pinged ja takistused. Tuleb kindlalt meeles pidada, et valemisse asetatakse pinge vooluringi osa klemmidel ja sama vooluringi osa takistus.

Kasutades Ohmi seadust, võib voldile, kui EMJ ja pinge mõõtühikule, anda vastava määratluse. Elektromotoorne jõud, suurusega üks volt, tekitab kinnises vooluringis, mille kogutakistus on üks oom, voolutugevuse üks amper. Ehk teisiti: 1 A voolutugevuse tekitamiseks juhtmes takistusega 1 Ω vajatakse pinget 1 V.

Näide 5. Leida alumiiniumjuhtme pikkus, kui pinge puhul $U = 6$ V temas voolab vool tugevusega $I = 3$ A.

Juhtme ristlõige $q = 1$ mm^2.

Ohmi seaduse alusel $I = \frac{U}{R}$, kust

$$R = \frac{U}{I} = \frac{6}{3} = 2 \text{ oomi}.$$

Teades juhtme takistust, tema ristlõiget ja eritakistust, võime leida pikkuse l:

$$R = \varrho \frac{l}{q}, \text{ ehk } l = \frac{R \cdot q}{\varrho}.$$

Tabelist I leiame alumiiniumi eritakistuse $\varrho = 0{,}03$.

$$l = \frac{2 \; 1}{0{,}03} = 66{,}7 \text{ m}.$$

Näide 6. Leida hõõglambi niidikese takistus, kui pinge puhul $U = 120$ V teda läbib vool 0,25 A.

Kasutades Ohmi seadust leiame takistuse:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{120}{0{,}25} = 480\ \Omega.$$

Näide 7. Leida elektrienergia ülekandeliini lõpus (tarvitaja juures) pinge U_2, kui vooluallika ja tarvitaja vahemaa $l = 200$ m, juhtmete ristlõige $q = 4\ \text{mm}^2$; juhtmed on vasest. Pinge juhtmete vahel liini alguses $U_1 = 235$ V. Voolutugevus ülekandeliinis $I = 10$ A.

Leiame juhtmete takistuse, arvestades mõlemaid juhtmeid (sinna ja tagasi) ning võttes vase eritakistuse tabelist I:

$$R = \frac{2 \cdot \varrho \cdot l}{q} = \frac{2 \cdot 0{,}0175 \cdot 200}{4} = 1{,}75\ \Omega.$$

Ohmi seaduse abil leiame pingelanguse juhtmetes:

$$U_{juhtmed} = I \cdot R = 10 \cdot 1{,}75 = 17{,}5\ \text{V}.$$

Selleks et leida pinget liini lõpus, peame pingelanguse juhtmetes lahutama liini algpingest:

$$U_2 = U_1 - U_{juhtmed} = 235 - 17{,}5 = 217{,}5\ \text{V}.$$

5. Takistuste ja vooluallikate järjestikku-lülitus.

Joonisel 1 on näidatud järjestikku-lülitus, koosnev kahest välistakistusest R_3 ja R_4 ning kahest vooluallikast elektromotoorsete jõududega E_1 ja E_2. Takistused R_1 ja R_2 on vooluallikate sisetakistused.

Joon. 1 näidatud lülituse kohta on kehtiv rida põhilisi vahekordi, millede vaatlusele me nüüd asumegi. Voolutugevus I antud lülituses on ühesugune vooluringi kõigis osades. Tõesti, antud järjestikku-lülituse puhul vool läbib järjekorras kõik vooluringi osad. Kuna seejuures vool kujutab endast vabade elektronide ringlemist kinnises vooluringis, siis on selge, et ühe sekundi vältel juhtme ristlõiget läbiv elektronide hulk on kõigis vooluringi osades täpselt samasugune.

Joonisel 1 näidatud skeemi kogutakistuse ΣR leidmiseks tuleb liita vooluringi kõikide osade takistused, sealhulgas ka vooluallikate sisetakistused, kuna vooluringis voolav vool järjekorras ületab kõik järjestikku lülitatud takistused. Vastavalt sellele leiame kogutakistuse valemist:

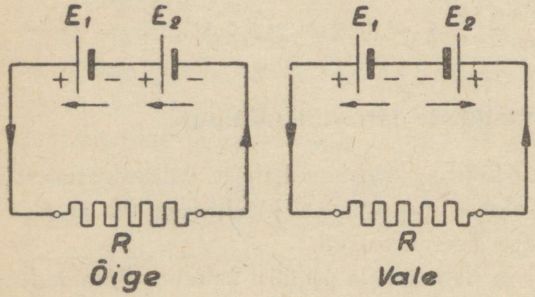
$$\Sigma R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4.$$

Tuleb märkida, et järjestikku lülitatud takistuste suurema arvu puhul suureneb vastavalt ka liidetavate arv valemis.

Joonisel 1 vooluallikate klemmid on märgitud plussi ja miinusega. See võimaldab määrata skeemis voolu suunda. Leppeliselt loetakse, nagu voolaks vool välisringis vooluallika pluss-klemmilt miinus-klemmile. Paneme tähele, et lihtsaimas vooluallikas — tsink ja vask hapendatud vees — voolab vool välisringis vaselt tsingi poole, s. t. et vask laetakse positiivselt (pluss), tsink aga negatiivselt (miinus). Meie skeemil vool väljub esimese vooluallika pluss-klemmilt, läbib välistakistused R_3 ja R_4, sisendub teise vooluallika miinus-klemmi, väljub selle pluss-klemmist ja jõuab tagasi esimese vooluallika miinus-klemmi. Sellise ringkäigu juures voolutugevus vooluringis hoidub alal mõlema elektromotoorse jõu E_1 ja E_2 toimel ja me võiksime lugeda, et skeemis on ainult üks vooluallikas elektromotoorse jõuga ΣE:

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

Üldiselt, vooluallikate järjestikku-lülituses kogu elektromotoorne jõud võrdub üksikute skeemi lülitud vooluallikate elektromotoorsete jõudude summaga.



Joon. 2.

Järjestikku-lülituses tuleb tähele panna vooluallikate positiivsete ja negatiivsete klemmide õiget järjekorda. Ebaõige järjekorra puhul on nimelt üksikud elektromotoorsed jõud suunatud üksteisele vastu ning kogu elektromotoorse jõu arvutamisel tuleks teostada elektromotoorsete jõudude lahutamist, mitte aga liitmist. Joonisel 2 on näidatud vooluallikate õige ja ebaõige järjestikku-lülitus.

Joonisel 1 toodud lülituse voolutugevuse määramiseks tuleks kasutada Ohmi seadust kogu vooluringile:

$$I = \frac{E_1 + E_2}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} .$$

Lihtsa ümbermoodustamise teel saame:

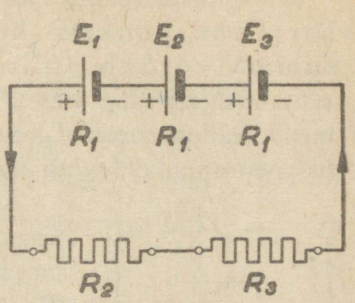
$$E_1 + E_2 = I \cdot R_1 + I \cdot R_2 + I \cdot R_3 + I \cdot R_4 .$$

Antud juhul on küll kaks vooluallikat ja neli takistust, kuid samasugune vahekord jääb kehtima ka vooluallikate ja takistuste mistahes arvu puhul. Seda vahekorda nimetatakse elektrilise tasakaalu võrrandiks (teiseks Kirchhoff'i seaduseks); sõnaliselt võib seda väljendada järgmiselt:

elektromotoorsete jõudude algebraline summa võrdub pingelanguste $(I \cdot R)$ summaga vooluringi kõigil osadel. Lühendatult saadakse järgmine matemaatiline avaldis:

$$\Sigma E = \Sigma I \cdot R.$$

Näide 8. Joonisel 3 on näidatud järjestikku-lülitus kolmest võrdsete elektromotoorsete jõududega ja võrdsete sisetakistustega $(R_1 = 0{,}2\ \Omega)$ vooluallikast ning kahest välistakistusest $R_2 = 1{,}4\ \Omega$ ja $R_3 = 3\ \Omega$. Leida iga vooluallika elektromotoorne jõud $E_1 = E_2 = E_3$, kui on teada voolutugevus $I = 1{,}2$ A.



Joon. 3.

Koostame elektrilise tasakaalu võrrandi:

$$\Sigma E = \Sigma I \cdot R,$$

või kohandatult antud juhule:

$$E_1 + E_2 + E_3 = I \cdot R_1 + I \cdot R_1 + I \cdot R_1 + I \cdot R_2 + I \cdot R_3;$$

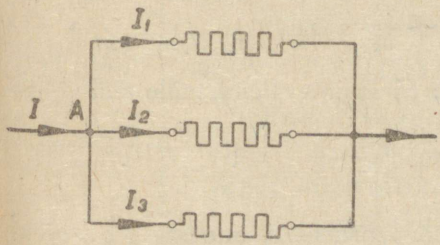
või sisse asetades arvulised väärtused:

$$3 \cdot E_1 = 3 \cdot 1{,}2 \cdot 0{,}2 + 1{,}2 \cdot 1{,}4 + 1{,}2 \cdot 3;$$

$$3 \cdot E_1 = 6;\quad E_1 = 2\ \text{V}.$$

6. Takistuste ja vooluallikate paralleel-lülitus.

Paralleelseks nimetatakse säärast takistuste lülitust milles üksikutes takistustes voolavad koguvoolu osad, nn haruvoolud.



Joon. 4.

Joonisel 4 on näidatud kolme takistuse paralleel-lülitus; sealjuures punktis A toimub koguvoolu hargnemine üksikutele takistustele. Haruvoolud ja koguvool on seotud omavahel kindlakujulise vahekorraga. See vahekord on formuleeritud Kirchhoff'i poolt ja kannab Kirchhoff'i esimese seaduse nime.

Kirchhoff'i esimene seadus ütleb järgmist: hargnemispunkti juurdevoolavate voolude summa võrdub äravoolavate voolude summaga.

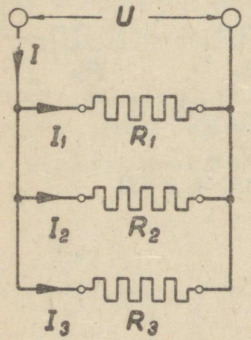
Ehk matemaatiliselt:

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

Üle tuues voolutugevused võrrandi vasakule poolele ning kasutades algebralise summa lühendtähist, võime kirjutada:

$$\Sigma I = 0. \tag{8}$$

Ühenduses sellega kasutatakse vahel ka teistsugust sõnalist väljendust: hargnemispunktis kokkujooksvate voolude algebraline summa võrdub nulliga. Sealjuures märgitakse juurdevoolavad voolud pluss-märgiga ning äravoolavad voolud — miinus-märgiga. Kirchhoff'i esimene seadus annab keeruliste lülituste puhul nii mitu võrrandit, kui mitu hargnemispunkti leidub lülituses.



Joon. 5.

Määrame mitme paralleelselt lülitud takistuse kogutakistuse (joon. 5). Klemmidega, millede vaheline pinge on U, on paralleelselt ühendatud kolm takistust: R_1, R_2 ja R_3.

Koostame Ohmi seaduse igale harule:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2}; \quad I_3 = \frac{U}{R_3}$$

ja kogu vooluringile, kus leidubki otsitav kogutakistus ΣR:

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

Joon. 5 kohaselt on meil siin tegemist koguvooluga I ja haruvooludega I_1, I_2 ja I_3.

Rakendades nendele Kirchhoff'i esimest seadust, saame:

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

Asendades need voolude väärtused pingega ja vastava takistusega:

$$\frac{U}{\Sigma R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3}$$

ning koondades selles valemis ühise pinge U, saame valemi, mille abil võime leida ΣR:

$$\frac{1}{\Sigma R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}. \tag{9}$$

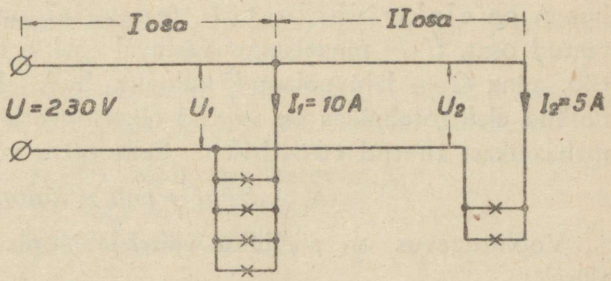
Selles valemis esinevad takistustele pöördvõrdelised suurused $\frac{1}{R}$. Neid suurusi nimetatakse juhtivusteks. Sõnaliselt võib viimast valemit väljendada järgmiselt: takistuste paralleel-lülitamise puhul kogujuhtivus võrdub üksikute harude juhtivuste summaga.

Elektrotehnikas esineb kõige sagedamini takistuste nõndanimetatud segalülitus, s. t. järjestikku- ja paralleel-lülituse kombinatsioon ühes ja samas

skeemis. Segalülituse tüüpilise näitena toome järgnevalt läbitöötatud elektrienergia ülekandmise skeemi.

Näide 9. Juhtmete takistus esimesel liiniosal on $R_1 = 1\ \Omega$ (joon. 6), teisel osal $R_2 = 1\ \Omega$. Määrata pinge U_1 esimese lampide rühma ja pinge U_2 teise lampide rühma juures.

Üksikud lambid ja lampide rühmad on lülitud omavahel paralleelselt, esimese liiniosa juhtmete takistus aga — järjestikku mõlemale lampide rühmale, ning teise liiniosa juhtmete takistus — järjestikku teisele lampide rühmale.



Joon. 6.

Voolutugevus liini esimeses osas:

$$I' = I_1 + I_2 = 10 + 5 = 15\ \text{A}.$$

Pingelangus liini esimeses osas:

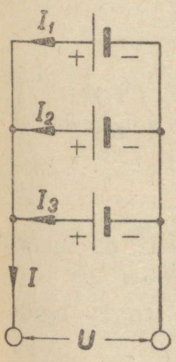
$$U' = I' \cdot R_1 = 15 \cdot 1 = 15\ \text{V}.$$

Pinge esimese lampide rühma juures:

$$U_1 = U - U' = 230 - 15 = 215\ \text{V}.$$

Voolutugevus liini teises osas:

$$I'' = 5\ \text{A}.$$



Joon. 7.

Pingelangus liini teises osas:

$$U'' = I'' \cdot R_2 = 5 \cdot 1 = 5\ \text{V}.$$

Pinge teise lampide rühma juures:

$$U_2 = U_1 - U'' = 215 - 5 = 210\ \text{V}.$$

Vooluallikate paralleel-lülitus on tarvitusel juhtudel, kui ühe vooluallika pinge on meile küllaldane, kuid soovime saada suuremat voolutugevust (joon. 7).

Sel juhul kogupinge on sama suur kui igal üksikul vooluallikal, kuid voolutugevus on võrdne üksikute vooluallikate voolutugevuste summaga:

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

Tuleks veel märkida, et paralleelselt võib ühendada ainult ühesuguste elektromotoorsete jõududega vooluallikaid.

7. Elektrivoolu töö ja võimsus.

Kuna me nimetasime ühe-kulonilise elektrihulga poolt vooluringi antud osas kaotatud energiaosa pingelanguseks vooluringi vastaval osal, siis mitme kuloni poolt kaotatud energiat võime leida järgmiselt:

$$A = U \cdot Q,$$

kus A on elektrivoolu töö (energia), mis on kaotatud vooluringi teatud osas, U — pingelangus vastaval osal, s. t. ühe kuloni poolt kulutatud töö, ning Q — läbivoolanud kulonite hulk. Praktilised voldi ja kuloni ühikud elektrotehnikas on valitud nii, et nende korrutis annaks džauli — mehaanikast tuntud tööühiku. Selle tõttu võime kirjutada:

$$\textit{džaul} = \textit{volt} \times \textit{kulon}.$$

Voolutugevus on ajaühiku vältel läbivoolav elektrihulk, ehk matemaatiliselt:

$$I = \frac{Q}{t}, \quad \text{kust } Q = I \cdot t,$$

ning sellepärast džaulides väljendatud elektrivoolu tööd võib arvutada valemiga:

$$A = U \cdot I \cdot t \textit{ džauli}. \tag{10}$$

Võimsus on töö ajaühiku vältel:

$$N = \frac{A}{t} = \frac{U \cdot I \cdot t}{t};$$

seepärast elektrivoolu võimsust arvutatakse järgmiselt:

$$N = U \cdot I. \tag{11}$$

Võimsuse ühikuks on vatt (W):

$$\textit{vatt} = \textit{volt} \times \textit{amper}.$$

Võrreldes omavahel võimsusevalemit ja töövalemit, jõuame selgusele, et vatt on džaul sekundis, ehk

$$\textit{džaul} = \textit{vatt} \times \textit{sekund}.$$

Vatt on väga väike võimsuse ühik. Küllaldane oleks öelda, et enamtarvitatavad elektrilambid on võimsusega 25—50 W. Seepärast on olemas veel palju suuremaid võimsuse ühikuid, mida kasutatakse tugevvoolutehnikas:

1 hektovatt (hW) = 100 W,
1 kilovatt (kW) = 1 000 W,
1 megavatt (MW) = 1 000 000 W.

Kõige sagedamini tarvitatavaks võimsuse ühikuks on kilovatt.

Ka elektrivoolu töö mõõtmiseks on olemas palju suuremaid ühikuid kui vattsekund (džaul):

1 vatt-tund (Wh) = 3 600 džauli,
1 hektovatt-tund (hWh) = 360 000 džauli,
1 kilovatt-tund (kWh) = 3 600 000 džauli,
1 megavatt-tund (MWh) = 3 600 000 000 džauli.

Praktikas tarvitatakse elektrivoolu töö mõõtmiseks kõige sagedamini kilovatt-tundi.

Arvesse võttes, et džaul on mehaanilise ja elektrilise töö ühine mõõtühik, võib väljendada elektriliste ja teiste töö ja võimsuse ühikute vahekorda:

1 kWh = 367 200 kilogramm-meetrit,
1 kW = 102 kgm/sek. = 1,36 *HJ*,
1 *HJ* = 0,736 kW = 736 W.

Viimast vahekorda tuleks alati kindlalt meeles pidada, kuna kW-de ümberarvutamist HJ-deks esineb praktikas väga sagedasti.

Näide 10. Määrata mootori poolt tarvitatav voolutugevus, kui mootor annab võllil 10 *HJ* ning töötab kasuteguriga $\eta = 0{,}85$; võrgupinge $U = 220$ V.

Väljendades mootori võimsust kW-des, saame:

$$N = 10 \cdot 0{,}736 = 7{,}36 \text{ kW}.$$

Selleks, et leida võrgust tarvitatavat võimsust N_v, tuleb mootori võimsus võllil jagada tema kasuteguriga:

$$N_v = \frac{N}{\eta} = \frac{7{,}36}{0{,}85} = 8{,}66 \text{ kW} = 8660 \text{ W}.$$

Teades nüüd võimsust ja pinget, võime arvutada voolutugevuse:

$$I = \frac{N}{U} = \frac{8660}{220} = 39{,}3 \text{ A}.$$

Näide 11. Määrata 120 V-se pirni takistus, kui tema võimsus on 50 W. Seda ülesannet võib lahendada, leides esiteks antud võimsusest ja pingest voolutugevuse ning arvutades siis otsitava takistuse pingest ja voolutugevusest:

$$I = \frac{N}{U} = \frac{50}{120} = 0{,}417 \text{ A},$$

kust saame takistuse:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{120}{0{,}417} = 288\ \Omega.$$

VOOLU TERMILINE JA KEEMILINE TOIME.

8. Voolu termiline toime.

Juhtmes liikuvad vabad elektronid põrkavad aine molekulide vastu ja panevad neid korrapäratult liikuma. Aine osakeste korrapäratu liikumise suurenemine aga, nagu teada, kaasneb keha temperatuuri suurenemisega. Sel teel juhtmes voolava laengu poolt kaotatud energia muundub täielikult termiliseks (soojuse) energiaks, kui pole olemas vastusuunalist elektromotoorset jõudu. See viimane asjaolu on väga tähtis. Edasises, masinate peatükis selgub, et just elektrimootorites tekib võrguvoolule vastupidiselt suunatud elektromotoorne jõud; sealjuures on teada, et mootorites elektrienergia muundub peamiselt mehaaniliseks energiaks, ning ainult väike osa sellest muundub mootori soojenemiseks kuluvaks termiliseks energiaks. Samasugune nähe esineb ka akumulaatorite laadimisel, ainult selle vahega, et siin suurem osa elektrilisest energiast muundub keemiliseks energiaks.

Katselisel teel on tehtud kindlaks järgmine vahekord vattsekundites väljendatud elektrienergia ja grammkalorites väljendatud soojuse hulga vahel:

$$1 \text{ vattsekund} = 0{,}24 \text{ kalorit.}^{1}$$

Kuna elektrienergia, arvutatult valemi järgi:

$$A = U \cdot I \cdot t,$$

saadakse vattsekundites, siis eraldatud soojuse hulga arvutamiseks kalorites võib kasutada valemit:

$$Q = 0{,}24 \cdot U \cdot I \cdot t \text{ (kalorit).} \qquad (12)$$

Vahekord soojuse hulga ja elektrienergia vahel leiti esmakordselt inglise teadlase Joule'i ja vene teadlase Lenz'i poolt järgmisel kujul:

$$Q = 0{,}24 \cdot I^2 \cdot R \cdot t \text{ (kalorit).} \qquad (13)$$

Joule'i ja Lenz'i seaduse järgi elektrivoolu poolt eraldatud soojuse hulk on võrdeline voolutugevuse ruuduga, juhtme takistusega ja voolu voolamise ajaga.

Sealjuures tuleb märkida, et eraldatud soojuse hulga määramiseks on valem (12) kasutatav ainult juhtudel, kus on teada, et elektrienergia muundub ainult soojuseks (näiteks mingis soojendusriistas: ahi, teekann, pliit jne.).

[1] Vanaaegne grammkalori nimetus on nüüd asendatud lihtsalt kaloriga (cal), kuna suurt kalorit nimetatakse kilokaloriks (kcal).

Kui aga elektrienergia muundub mingisugusteks teisteks energia liikideks, siis annab meile valem (12) võrgust võetud energia koguhulga, väljendatult kalorites, mis sel juhul on ebakohane. Teiste sõnadega, kasutades seda valemit elektrimootoritele, me leiaksime võrgust saadava koguenergia, millest osa kulub mehaaniliseks tööks, teine osa mootori soojendamiseks.

Joule'i ja Lenz'i poolt antud valem (13) määrab igal juhul eraldatud soojuse hulga; seepärast tuleb teda voolu termiliste toimete vaatlusel lugeda põhivalemiks.

Vastavalt ülaltoodud kahele elektrivoolu töö valemile on võimalik moodustada ka kaks võimsuse valemit:

$$N = U \cdot I \text{ (vatti)},$$
$$N = I^2 \cdot R \text{ (vatti)}. \qquad (14)$$

Esimene valem määrab võrgust saadava koguvõimsuse, kuna teine — soojuse eraldamiseks kulutatud võimsuse. Soojendusriistade juures aga annavad muidugi mõlemad valemid ühesuguse tulemuse.

On kerge tõestada, et üks valem on saadud teisest Ohmi seaduse alusel ümbermoodustamise teel.

$$N = U \cdot I,$$

kuid $U = I \cdot R$; asendades saame:

$$N = I^2 \cdot R.$$

Voolu termiline toime on elektrotehnikas laialt tarvitusel elektrienergia muundamisel termiliseks ja valguse-energiaks.

Hõõglampide töötamine näiteks rajaneb sellele, et metall- või söeniidikest läbiv vool kuumendab viimast kuni helevalge hõõgumiseni. Et niidike seejuures mitte läbi ei põleks, paigutatakse ta õhust tühjaks pumbatud klaaskolbi; nõndanimetatud gaasiga täidetud lampides klaaskolb täidetakse põlemist mittesoodustava gaasi — argooniga.

Kõik majapidamises kasutatavad soojendusriistad — elektri-teekannud, -keedupotid, -pliidid, -ahjud, -jootekolvid ja paljud teised — põhinevad samuti voolu termilisel toimel.

Näide 12. Leida juhtmes 10 minuti vältel eralduv soojuse hulk kui juhtme takistus $R = 22\ \Omega$ ja voolutugevus $I = 5$ A.

Arvutuse teostame Joule'i seaduse järgi, asetades valemisse voolutugevuse amprites, takistuse oomides ja aja sekundites:

$$Q = 0{,}24 \cdot I^2 \cdot R \cdot t \text{ (cal)};$$

$$Q = 0{,}24 \cdot 5^2 \cdot 22 \cdot 600 = 79\ 200 \text{ cal}.$$

Näide 13. Arvutada elektriteekannu küttekeha järgmistel andmetel: 1 liiter vett tuleb soojendada 15 minuti vältel 10° C-lt kuni 100° C; võrgupinge $U = 120$ V. Praktiliste andmete alusel oletame, et 75% soojuse koguhulgast, mida eraldab elektrivool, läheb vee soojendamiseks, kuna 25% hajub ümbruskonda ning osalt kulub kannu enda soojendamiseks (s. t. et kasutegur $\eta = 0{,}75$).

1) Rakendades Joule'i seadust antud juhule sobival kujul ning arvestades kasutegurit, võime kirjutada:

$$Q = 0{,}24 \cdot U \cdot I \cdot t \cdot \eta \quad \text{(cal)};$$

siit leiame voolutugevuse:

$$I = \frac{Q}{0{,}24 \cdot U \cdot t \cdot \eta} \quad \text{(A)}.$$

Ühe liitri (1000 cm^3) vee soojendamiseks 10° C kuni 100° C vajaliku soojuse hulga leiame järgmisel teel:

$$Q = 1000\ (100 - 10) = 90\,000 \text{ cal}.$$

Sisse asetades arvulised väärtused (aeg sekundites), võime leida voolutugevuse:

$$I = \frac{90\,000}{0{,}24 \cdot 120 \cdot 900 \cdot 0{,}75} = 4{,}63 \text{ A}.$$

2) Voolutugevuse ja pinge järgi leiame küttekeha takistuse R:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{120}{4{,}63} = 25{,}9\ \Omega.$$

3) Kui me omame küttekeha valmistamiseks kroomnikkel-traati $\varrho = 1{,}1$ ristlõikega $q = 0{,}25$ mm^2, siis võime leida traadi vajaliku pikkuse l:

$$R = \varrho \frac{l}{q}, \text{ seepärast } l = \frac{R \cdot q}{\varrho},$$

$$l = \frac{25{,}9 \cdot 0{,}25}{1{,}1} = 5{,}88 \text{ m}.$$

4) Määrame teekannu võimsuse N:

$$N = U \cdot I = 120 \cdot 4{,}63 = 556 \text{ W}.$$

5) Leiame ühe soojendusprotsessi maksumuse C, tariifiga c = 20 kop. ühe kWh eest:

$$A = N \cdot t = 556 \cdot 900 = 500\,000 \text{ Wsek}.$$

$$A = \frac{500\,000}{1000 \cdot 3600} = 0{,}139 \text{ kWh}.$$

Maksumus:

$$C = A \cdot c = 0{,}139 \cdot 20 = 2{,}78 \text{ kop}.$$

9. Voolu keemiline toime.

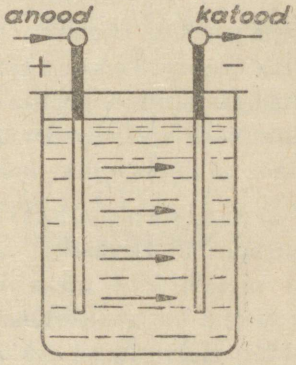
Seni me vaatlesime elektrijuhte, mis elektrivoolu läbimisel keemiliselt ei muutunud. Niisuguseid elektrijuhte nimetatakse esimese liigi juhtideks; nende hulka kuuluvad kõik metallid ja süsi. Esimese liigi juhtides on elektri voolamine võimalik tänu olemasolevatele vabadele elektronidele, mis hakkavad liikuma vooluallika elektromotoorse jõu mõjul.

Kui lahjendada vees hapet, soola või leelist, osutub säärane lahus ka elektrijuhiks, kuid voolu läbimisel ta keemiliselt muutub. Voolu mõjul keemiliselt muutuvaid elektrijuhte nimetatakse teise liigi juhtideks, kusjuures voolu voolamine neis osutub võimalikuks vaatamata sellele, et neil puuduvad vabad elektronid. Asudes nende nähete tundmaõppimisele, tuleb kõigepealt kindlaks määrata mõningad mõisted, mida me kasutame allpool.

Teise liigi elektrijuhte (s. t. soolade, hapete ja leeliste vesilahuseid) nimetatakse elektrolüütideks. Elektrolüüdi lagunemise protsessi nimetatakse elektrolüüsiks.

Anumat, milles toimub elektrolüüs, nimetatakse elektrolüütiliseks vanniks. Elektrolüüti asetatud metallplaate nimetatakse elektroodideks.

Positiivset elektroodi, mille kaudu vool suubub elektrolüüti, nimetatakse anoodiks; negatiivset elektroodi, mille kaudu vool väljub elektrolüüdist, nimetatakse katoodiks (vt. joon. 8).



Joon. 8.

Uurides elektrivoolu keemilisi toimeid, inglise teadlane Faraday märkas, et elektrolüüsi teel eraldatud aine hulk on võrdeline voolutugevusega ja voolu voolamise ajaga. Matemaatiliselt seda võib väljendada järgmisel viisil:

$$Q = k \cdot I \cdot t \text{ (milligrammi)},$$

kus Q on eraldatud aine hulk milligrammides, I — voolutugevus amprites, t — aeg sekundites ja k — võrdelisuse koefitsient, mida nimetatakse aine elektrokeemiliseks ekvivalendiks ning mis näitab, milline aine hulk eraldub 1 sekundi vältel voolutugevusega 1 A.

Mitmesuguste ainete elektrokeemiline ekvivalent on erinev (vt. tabel II).

Tabel II.

Aine	Elektrokeemiline ekvivalent
Alumiinium	0,0936
Hapnik	0,0829
Hõbe	1,118
Tsink	0,3387
Vask	0,329
Vesinik	0,01039

Hõbeda elektrolüüsi hõbenitraadi lahusest kasutatakse voolutugevuse tegeliku mõõtühiku, ampri, määramiseks. Muutumatu 1-ampriline voolutugevus eraldab 1 sekundi vältel hõbenitraadi ($AgNO_3$) lahusest 1,118 mg puhast hõbedat. Eraldatud hõbeda hulka määratakse katoodi täpse kaalumisega enne ja pärast elektrolüüsi; kaalu vahe annab katoodi pinnal sadestunud hõbeda hulga.

Mitmesuguste metallide soolade elektrolüüsimisel eralduvud vastavad metallid alati katoodil, sadestudes ühtlase ja tiheda kihina. See asjaolu annab võimaluse elektrolüüsi kasutada mitmesugusteks tehnilisteks otstar veteks. Meie vaatleme kolme juhust elektrolüüsi kasutamisel tehnikas.

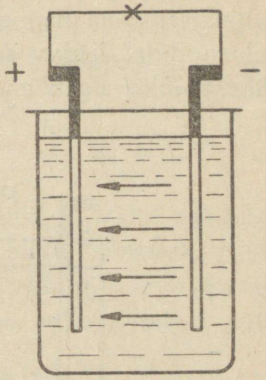
1) Galvanosteegia. Galvanosteegia all mõistetakse ühe metalli teise metalliga katmise protsessi ilusama välimuse saamiseks või mitmesugustele välismõjudele vastupidavuse suurendamiseks. Galvanosteegia üldtuntud aladeks on: hõbetamine, kuldamine, nikeldamine, kroomimine jne.

2) Galvanoplastika. Galvanoplastilise protsessiga taotletakse veidi teistsuguseid eesmärke: sel juhul nimelt soovitakse, et elektrolüüsil eraldatud metalli kiht oleks hõlpsalt eraldatav kaetavalt esemelt. Selleks ese kaetakse enne elektrolüüsi peenima grafiittolmuga, mis hiljem hõlpsalt võimaldab elektrolüüsil tekkinud metallikihi kättesaamist esemelt, mis elektrolüüsi vältel oli katoodiks. Galvanoplastika on kasutusel koopiate ja vormide mahavõtmiseks järgneva valu jaoks (galvanoplastilisel viisil võib näiteks valmistada koopiat grammofoniplaadist).

3) Elektrometallurgia. Elektrometallurgia tegeleb puhtate metallide saamisega mitmesuguste soolade lahustest. Sealjuures muidugi ei huvita meid sugugi katoodi kuju, sest eraldatud metall töötatakse hiljem ümber. Kuivõrd tähtis on selline elektrolüüsi haru, nähtub sellest, et kõik elektrotehnikas kasutatav vask ja alumiinium on eranditult saadud elektrolüütilisel teel.

10. Akumulaatorid.

Elektrivoolu keemilise toimega seotud nähete vaatlusel pole me seni puudutanud küsimust, milliseks energia liigiks muundub vooluallika elektrienergia elektrolüütilises vannis. Elektrivoolu voolamisel ükskõik millises juhtmes eraldub Joule'i seaduse kohaselt soojus. Täpselt samuti muundub ka elektrolüüsi puhul osa elektrienergiast soojusenergiaks, mille tundemärgiks on elektrolüüdi märgatav soojenemine. Kuid lisaks sellele töötab elektrolüüsi juures vooluallika elektromotoorne jõud elektrolüüdi koosseisu kuuluvate elementide keemilisest sugulusest tekkivate jõudude vastu. Kui lahutada elektrolüüt välis-vooluallikast ja moodustada kinnine vooluring anoodi ja katoodi vahel, näiteks hõõgpirni kaudu, siis varemalt eraldatud elementide keemilise suguluse tagajärjel tekib vastupidine reaktsioon ning elektroodidega ühendatud hõõgpirn põleb senikaua, kuni jätkub elektrolüüsi vältel varutud keemilist energiat (joon. 9).



Joon. 9.

Toodud kirjeldusest nähtub, et sellekohaselt valitud elektrolüüdi ja elektroodidega elektrolüütilises vannis on võimalik koguda elektrienergiat ja teda vajaduse korral kasutada, lülides elektroodide vahele mingi kasuliku takistuse. Elektrienergia kogumiseks ettenähtud elektrolüütilist vanni nimetatakse akumulaatoriks. Tehnikas on kasutusel kaks akumulaatorite tüüpi, mis on suutelised suurima kasuteguriga koguma ja tagasi andma elektrienergiat: tina- (happe-) ja raudnikkel- (leelis-) akumulaatorid. Allpool tutvume lühidalt mõlema akumulaatoritüübi ehituse ja töötamisega.

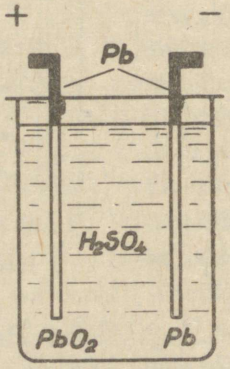
Tina-akumulaatorid. Tina-akumulaatori elektrolüüdiks on destilleeritud veega lahjendatud väävelhape. Akumulaatori täitmisel on tema elektrolüüdi erikaal 1,18 g/cm^3, kangus 22° Baumé (kontsentreeritud — kange — väävelhape omab erikaalu 1,84 g/cm^3). Elektroodideks on puhtast seatinast (Pb) plaadid; akumulaatorisse kogutava elektrienergia hulga suurendamiseks plaadid tehakse võretaolistena ning võrede vahed täidetakse seatinamennikust ja seatinasilust koosneva aktiivmassiga.

Elektrienergia kogumise protsessi akumulaatoris nimetatakse laadimiseks; elektrienergia kasutamise protsessi laetud akumulaatorist nimetatakse tühjendamiseks. Elektrivoolu mõjul laadimisprotsessi vältel positiivne elektrood — anood — muutub tumepruuniks seatinaülihapendiks

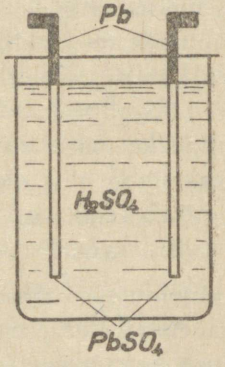
PbO_2, kuna negatiivne elektrood — katood — muutub helehalliks puhtaks seatinaks Pb (joon. 10).

Tühjendamisprotsessi vältel anood ja katood aegamööda muutuvad jälleg seatinasulfaadiks (joon. 11).

Tinaakumulaatorite elektrolüüdis laadimisel suureneb väävelhappe hulk, kuna tühjendamisel seevastu suureneb vee hulk. Selle tõttu akumulaatori töötamisel tema happe kontsentratsioon on muutlik. Pärast seda, kui kõik elektroodidel leiduv seatinasulfaat laadimisel muutub seatinaks ja seatinaülihapendiks, algab energiline hapniku eraldumine anoodil ja vesiniku eral-



Joon. 10.



Joon. 11.

dumine katoodil; selle protsessi kaasnähteks on rohke gaasimullikeste tekkimine elektroodidel või nagu tavaliselt öeldakse — akumulaatori keemine Akumulaatori energiline keemine näitab, et akumulaator on täielikult laetud ning laadimine tuleb lõpetada.

Laadimise vältel ühest purgist koosneva akumulaatori klemmipinge tõuseb kuni 2,7 V. Tühjendamisel on ühe purgi keskmine tööpinge 2 V. Pinge langemisel 1,8 V-le tuleb tühjendamine lõpetada, kuna liigse tühjendamise tagajärjel algavad kõrvalised reaktsioonid, mis muudavad akumulaatori kõlbmatuks.

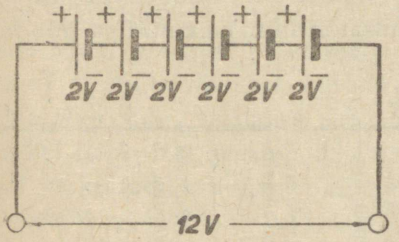
Akumulaatoreid võib iseloomustada mitte ainult nende klemmipingega vaid veel nn. mahutavusega. Akumulaatori mahutavust arvutatakse ampertundides (Ah). Teiste sõnadega, akumulaatori mahutavust määratakse tühjendamise voolutugevuse ja tühjendamise aja korrutisega. Järelikult, mida kauemini vältab akumulaatori tühjendamine teatava püsiva voolutugevusega või mida suurema voolutugevusega teostub akumulaatori tühjendamine teatava aja vältel, seda

suurem on akumulaatori mahutavus. Normaalseks tühjendamisvooluks loetakse tavaliselt säärast voolutugevust, mille puhul akumulaator 10 tunni vältel tühjeneb pingeni 1,8 V ühe purgi kohta.

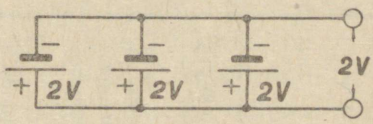
Ühenduses sellega, et akumulaatori laadimisel ja tühjendamisel osa elektrienergiast muundub soojuseks, saame akumulaatorilt tagasi ainult osa temale laadimisel antud energiast. Tühjendamisenergia hulga ja laadimisenergia hulga suhet nimetatakse akumulaatori kasuteguriks (sealjuures väljendatakse energia hulgad tavaliselt vatt-tundides —. Wh). Niisiis, akumulaatori kasutegur:

$$\eta = \frac{\text{tühjendamise Wh}}{\text{laadimise Wh}} \cdot 100\ (\%).$$

Tina-akumulaatori kasutegur on keskmiselt umbes 75%. Vahel aga huvitab meid akumulaatori nn. ampertundide kasutegur, mida arvutatakse tühjendamise ampertundide ja laadimise ampertundide suhtena. Tina-akumulaatori ampertundide kasutegur on keskmiselt 90%. Akumulaatori vatt-



Joon. 12.



Joon. 13.

tundide kasutegur on alati väiksem ampertundide kasutegurist sellepärast, et tühjendamispinge on laadimispingest väiksem; ampertundide kasuteguri määramisel aga pinget arvesse ei võeta, kuna siin arvestatakse ainult ampertundide hulka.

Lõpuks märgime veel, et ühe akumulaatori purgi elektromotoorne jõud on määratud kindlaks anoodi, katoodi ja elektrolüüdi koosseisu kuuluvate ainete keemilise suguluse jõududega ning seetõttu purgi suurus ja elektroodide pindala suurus ei avalda mingit mõju elektromotoorse jõu suurusele.

Suurema kui 2 V pinge saamiseks tuleb ühendada mitu purki järjestikku. Sellist purkide komplekti nimetatakse akumulaatorpatareiks (joon. 12).

Elektroodide pindala suurendamisel või vastavalt mitme purgi paralleelselt lülitamisel patarei kogupinge jääb muutumatuks, kuid kasvab akumulaatori mahutavus. Mahutavuse suurendamiseks teostatud paralleel-lülitus on näidatud joonisel 13.

Aktiivmassi olemasolu tõttu võretaolistes elektroodides, tina-akumulaatorid kardavad põrutusi. Selles suhtes osutub kindlamaks raudnikkel-akumulaator.

Raudnikkel- (leelis-) akumulaatorid. Leelisakumulaatorites on elektrolüüdiks kaaliumhüdroksüüdi — KOH (sööbekaaliumi) vesilahus. Laetud akumulaatori anoodiks on nikkelhüdroksüüd $Ni(OH)_3$, katoodiks — raudhüdroksüüd.

Laadimise vältel elektromotoorne jõud tõuseb 1,7 V-ni; seejuures kui elektrolüüdi „keemine" .muutub väga tugevaks, tuleb laadimine lõpetada Ühe purgi keskmine tööpinge on 1,2 V. Akumulaatori täielik tühjendamine pole ohtlik. Raudnikkelakumulaatori kasutegur nii vatt-tundides kui ka ampertundides on väiksem kui tina-akumulaatoritel. Nende vatt-tundide kasutegur on umbes 60%, ampertundide kasutegur — 75 kuni 80%. Toodud andmetest nähtub, et leelisakumulaator omab võrreldes tina-akumulaatoriga terve rea olulisi puudusi. Kuid selgub siiski, et leelisakumulaator omab ka tervet rida paremusi, tänu millel ◌ tema kasutamine mõningail juhtudel osutub otsarbekohasemaks. Allpool on toodud võrdlustabel mille abil on võimalik hinnata mõlema akumulaatoritüübi paremusi ja puudusi.

Tabel III.

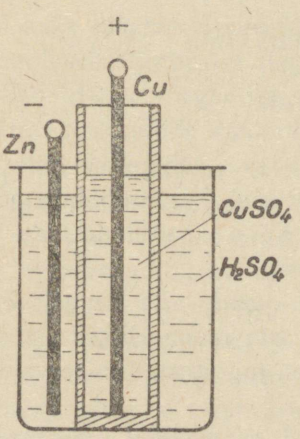
	Tööpinge	Laadimise ja tühjendamise voolutugevus	Vatt-tundide kasutegur	Ampertundide kasutegur	Maksimaalne tühjendamine	Kogutava energia hulk kaalu-ühiku kohta	Iga keskmistes tingimustes	Märkusi
Tina-akumulaatorid . .	2 V	Mitte rohkem kui märgitud akumulaat. sildil (passis)	75%	90%	1,8 V	kuni $35\frac{Wh}{kg}$	umbes kaks aastat	Põrutusest muutub kõlbmatuks
Leelisakumulaatorid .	1,2 V	Pole piiratud	60%	80%	Pole piiratud	kuni $30\frac{Wh}{kg}$	umbes viis aastat	Ei karda põrutusi

Tabelis III toodud andmete alusel järeldame, et tina-akumulaatorit on otstarbekohasem kasutada statsionaarsetes seadmetes, kus on tagatud tema korralik hooldamine. Teistsugustes tingimustes aga, kui ühel või teisel põhjusel pole võimalik teostada reeglikohast hooldamist, leelisakumulaatori pikk iga tasub kõik tema muud puudused.

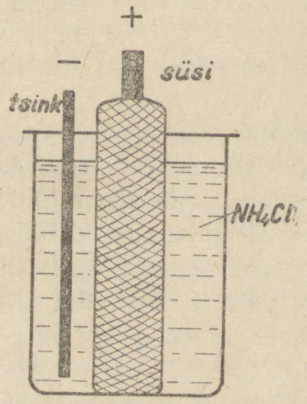
11. Galvaanilised elemendid.

Galvaanilisteks elementideks nimetatakse niisuguseid keemilisi vooluallikaid, milledes elektrolüüdi ja elektroodide koosseisu kuuluvad ained keemilise suguluse jõudude tagajärjel arendavad elektromotoorset jõudu ilma eelneva voolu läbilaskmiseta (laadimiseta). Galvaanilise elemendi tühjendamisel tekivad uued keemilised ühendid, kusjuures tagurpidine voolu läbilaskmine (laadimine) ei taasta esialgselt olemasolnud aineid, ning selle tõttu tuleb äratarvitatud element asendada uuega. Alates esimesest Volta elemendist, milles kasutati tsinki ja vaske hapendatud vees, ning lõpetades praeguse ajaga, on välja töötatud kaunis suur hulk mitmesuguseid elemente, kuid meie võtame lühidale vaatlusele ainult neid, mis omavad suuremat tegelikku tähtsust.

Daniell'i element. See elemendi tüüp tema mitmesugustes konstruktiivsetes ehitusviisides (Meidinger, Kallo) omab väga laialdast kasutamist, peamiselt telegraafitehnikas. Daniell'i elemendi ehitus on järgmine (joon. 14): klaasanumasse paigutatud väävelhappe lahuses asetseb tsinkplaat (Zn), mis on katoodiks (—); samasse anumasse on paigutatud veel teine anum poorsest põletamata sauest, milles asetseb vaskplaat (Cu) vasevitrioli ($CuSO_4$) lahuses, mis on elemendi anoodiks (+). Elemendi anoodi ja katoodi vahel saadakse elektromotoorset jõudu 1,12 V. Elemendi töötamisel tsinkplaat aegamööda kulub; vasevitrioli ($CuSO_4$) lahus on mõeldud vaskplaadil eralduva vesiniku hävitamiseks. Poleks vasevitrioli lahust olemas, siis kattuks vaskplaat lühema aja vältel väikeste vesiniku mullikestega ning element lakkaks töötamast. Seda nähet nimetatakse polarisatsiooniks ning vasevitrioli lahust nimetatakse depolarisaatoriks.



Joon. 14.



Joon. 15.

Leclanché element. Leclanché element osutub meie oludes populaarseimaks galvaaniliseks elemendiks. Kõik kuivelemendid kellasignalisatsiooni, raadio ja taskulampide jaoks on Leclanché elemendi konstruktiivseteks ehituserisusteks. Selle elemendi katoodiks, nagu üldiselt ka enamikul elementidest, on tsink, kuna anoodiks on süsi. Tsink ja süsi asetsevad salmiaagi (NH_4Cl) vesilahuses. Leclanché elemendi depolarisaatoriks on peenendatud mangaandioksüüd, mis on segatud elektrijuhtivuse suurendamiseks peenendatud grafiidiga. Depolarisaatori ülesandeid täitev mass asub söe ümber tavaliselt kas riidekotis või poorses saunõus.

Anoodi ja katoodi vahel saadakse elektromotoorset jõudu umbes 1,5 V. Suuremate pingete saamiseks tuleb mitu elementi ühendada järjestikku nõndanimetatud patareiks. Nagu teada, on taskulambi patarei pinge 4,5 V; seda pinget saadakse kolme elemendi järjestikku lülitamise teel.

Elemendi enda suurus, nagu akumulaatori puhulgi, sugugi ei mõjuta elektromotoorse jõu suurust; elemendi mõõdetest oleneb elemendi mahutavus, s. t. ampertundide ja vatt-tundide hulk, mida element suudab anda tühjendamisel.

Võrreldes omavahel akumulaatoreid ja elemente tuleb märkida, et akumulaatori sisetakistus on tähtsusetult väike, kuna elemendi sisetakistus omab võrdlemisi suurt väärtust. Seetõttu saadakse akumulaatori otsesidestamisel voolutugevust 100—200 A (koguni väikese akumulaatori puhul), kuna galvaaniliselt elemendilt ei õnnestu ka lühikeseks ajaks saada suuremat voolutugevust.

IV peatükk.

ELEKTROMAGNETISM.

12. Magnetism.

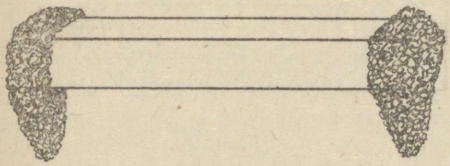
Enne kui asuda elektromagnetismi nähete uurimisele, mis on meile küllaltki olulised, sest elektromagnetismil baseerub kogu elektrimasinate ehitus,— me kordame lühidalt magnetismi põhimõisteid ja seadusi, mis on meile juba tuntud füüsika kursusest.

Magnetiks nimetatakse keha, millel on omadus ka kaugelt enda külge tõmmata väikesi rauatükke. Kui magnet lasta rauapurusse, siis rauatükikesed kleepuvad tema mõlema otsa külge, moodustades terveid kobaraid (joon. 16).

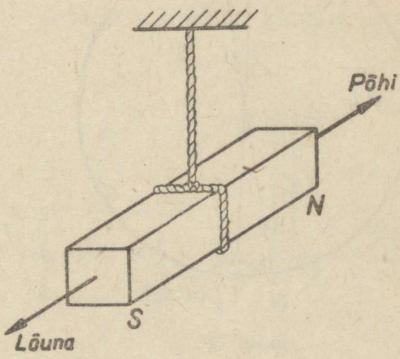
See lihtsaim eksperiment veenab meid, et magneti külgetõmbejõud on eriti suur tema otstel. Sellepärast räägitakse, et magneti otstel asuvad

poolused, milledesse nagu oleks koondatud magneti magnetism. Me veendume hiljem, et tegelikult magnetism on enam-vähem ühtlaselt jaotatud magneti kogu massis, otstel aga avaldub ainult magnetismi väline mõju. Kuid kahe magneti vaheliste jõudude määramisel me ei eksi kuigi palju, kui eeldame, et kõik magnetiline jõud on koondatud poolustesse, tingimusel, et magnetid mõjutavad üksteist küllalt kauge vahemaa pealt.

On juba vanast ajast teada, et niidiga keskelt üles riputatud magnet pärast kaua kestnud võnkumisi asetub oma otstega suunas põhi — lõuna. Seejuures üks tema otstest on alati suunatud põhja, teine — lõunasse. See



Joon. 16.

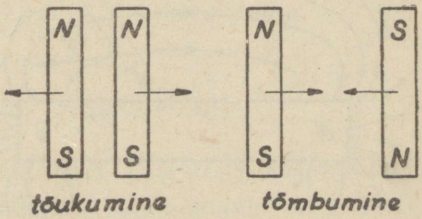


Joon. 17.

asjaolu vihjab sellele, et poolused magneti otstel evivad vastupidiseid omadusi. Selle põhjal nimetati põhjasse suunatud magneti poolus — põhjapooluseks ning lõunasse suunatud poolus — lõunapooluseks (joon. 17). Põhjapoolust märgitakse alati tähega N (Nord), lõunapoolust tähega S (Süd).

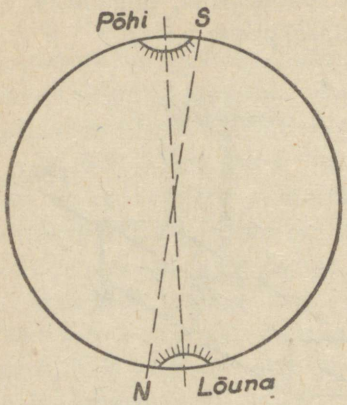
Uurides kahe magneti vastastikuseid toimeid, me veendume selles, et isenimelised poolused tõmbuvad ligi, aga ühenimelised tõukuvad eemale. Joonisel 18 on näidatud magnetite vastastikuse mõju kaks juhtu ja on märgitud tegutsevate jõudude suunad.

Tagasi tulles niidi külge riputatud magneti juurde, võime tõendada, et meie maakera omab põhjas ja lõunas magnetilist poolust ning tänu nende pooluste ja magneti pooluste vastastikusele mõjule viimane asetub põhja — lõuna suunas. Niivõrd kui isenimelised poolused tõmbuvad ligi ning põhjasuunatud poolus nimetati põhjapooluseks, tuleb arvata, et maakera põhjaosa on koondatud lõunamagnetism ja ümberpöördult, lõunaosa —



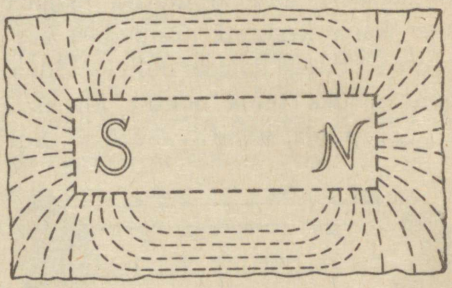
Joon. 18.

põhjamagnetism. Maakera magnetismi tundmaõppimine näitas seejuures, et magnetiline lõunapoolus ja geograafiline põhjapoolus, samuti ka magnetiline põhjapoolus ja geograafiline lõunapoolus ei lange omavahel täiesti ühte. Maakera magnetiliste pooluste paigutus on näidatud joonisel 19.



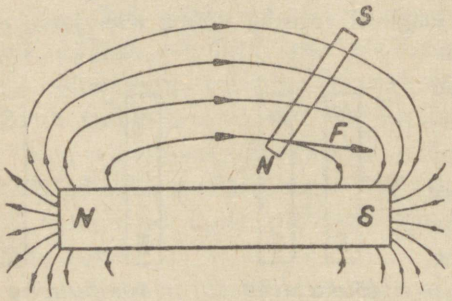
Joon. 19.

Jätkates magneti ja tema ümbruse omaduste vaatlust, katame magneti papitükiga ja raputame sellele rauapuru. Rauapuru tü-



Joon. 20.

kikesed moodustavad joonisel 20 näidatud nn. magnetilise spektri. Magneti pooluste vahel asetsevaid jooni, mis on selgesti nähtavad magnetiliselt spektrilt, nimetatakse magnetilisteks jõujoonteks. Leppeliselt loetakse, et õhus magnetilised jõujooned on suunatud põhjapooluselt lõunapooluse poole. Ruumala, milles ilmnevad magnetilised jõud ehk, mis on seesama, magnetiliste jõujoontega täidetud ruumala, nimetatakse magnetväljaks. Seejuures magnetilise jõu suund magnetvälja igas punktis on määratud jõujoonte suunaga. Kuna aga jõujooned loetakse suunatuks põhjapooluselt lõunapooluse poole, siis jõu suunaks magnetväljas loetakse jõu suunda, mis mõjub magnetvälja asetatud põhjapoolusele. Magnetvälja jõujooned ja magnetiline jõud F on näidatud joonisel 21.



Joon. 21.

Suuruselt magnetvälja iseloomustatakse nn. väljatugevusega. Selleks, et selgitada seda uut mõistet, tuleb meelde tuletada Coulomb'i (loe: kulooni) seadust, millele allub magnetiliste pooluste koostöö.

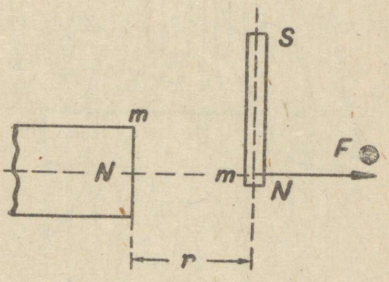
Coulomb'i poolt toimepandud rohkearvulised katsed andsid talle

võimaluse avastada järgmise seaduse: kahe pooluse vahel mõjuv jõud on võrdeline nende poolustesse koondatud magnetismi hulgaga ning pöördvõrdeline pooluste kauguse ruuduga. Matemaatiliselt võib seda seadust esitada järgmiselt:

$$F = \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \text{ (düüni)},$$

kus F on pooluste vahel mõjuv jõud düünides, m_1 ja m_2 — poolustesse koondatud magnetismi ühikute hulk, r — poolustevaheline kaugus sentimeetrites (joon. 22).

Ühikuks valis Coulomb niisuguse magnetismi hulga, mis mõjutab endaga võrdset magnetismi hulka kaugusel 1 cm jõuga 1 düün.



Joon. 22.

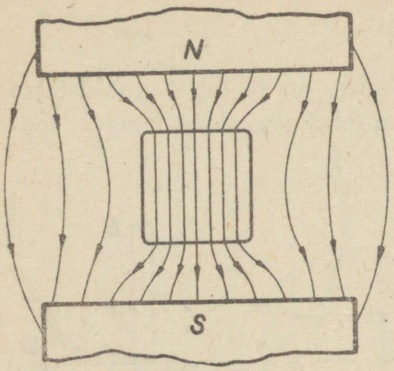
Magnetismi hulga ühikute kasutamine praktikas osutus kaunis ebamugavaks, mille tõttu kõik tehnilised arvutused tehakse magnetilise väljatugevuse — H järgi. Magnetilist väljatugevust antud punktis määrab suuruselt ja suunalt jõud, mis mõjutab põhjamagnetismi ühikut. Väljatugevuse ühikuks on valitud örsted. Seejuures väljatugevuse ühik on sidestatud jõuga magnetväljas järgmiselt: kui magnetiline väljatugevus on 1 örsted, siis selles väljas magnetismi ühikule mõjuv jõud on võrdne 1 düüniga.

Kõikide tehniliste arvutuste lihtsustamiseks lepiti kokku, et tühjuses asuvas magnetväljas väljatugevusega 1 örsted igale väljasuunale risti asetsevale ruutsentimeetrile langeb 1 magnetiline jõujoon; seega loodi side magnetvälja väljatugevuse ja jõujoonte tiheduse vahel. Sealjuures ei tarvitse sugugi oletada, et magnetvälja igas ruutsentimeetris on tegelikult nii mitu jõujoont, kui mitme örstedi suurune on väljatugevus. Märgime veelkord, et seesugune arvuline võrdsus on võetud tarvitusele ainult leppeliselt, kuna tegelikult jõujoonte arv magnetväljas on lõpmatult suur.

13. Magnetiline induktsioon. Magnetvoog.

Nagu teada, magnetiseerub rauatükk, kui teda paigutada magnetvälja. Sealjuures rauatüki enda magnetväli tema külgedel on suunatud vastupidiselt põhimagnetväljale, kuid raua sees liitub viimasega. Tulemuseks on, et

jõujoonte tihedus rauatüki külgedel väheneb, kuna ta raua sees kaunis tugevasti suureneb (joon. 23). Niisugune magnetiliste jõujoonte ümberpaiknemine laseb seletada, et raud on palju paremaks magnetiliste jõujoonte juhiks, kui seda on näiteks õhk.



Joon. 23.

Jõujoonte arvu mingi keha sees ühe ruutsentimeetri kohta nimetatakse magnetiliseks induktsiooniks *(B)*. Magnetilise induktsiooni ühikuks on gauss. Magnetväljas induktsiooniga 1 gauss langeb igale cm^2 üks jõujoon.

Magnetilise induktsiooni *(B)* ja väljatugevuse *(H)* suhet magnetvälja antud punktis nimetatakse magnetiliseks juhtivuseks (μ). Magnetiline juhtivus iseloomustab aine omadust magnetiseeruda välise magnetvälja mõjul; ta näitab, mitmekordselt suureneb jõujoonte tihedus raua paigutamisel magnetvälja. Viimast vahekorda võib esitada valemiga

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

Sõltuvalt magnetilise induktsiooni μ suurusest kõik ained jagatakse kolme liiki:

1) Aineid, millede μ on ühest tunduvalt suurem, nimetatakse ferromagnetilisteks aineteks. Siia kuuluvad: raud, teras, malm ning vähemal määral koobalt ja nikkel (raua μ ulatub kuni 2000 — 2250).

2) Aineid, millede μ on ainult vähe suurem ühest, nimetatakse paramagnetilisteks. Siia kuulub suurem osa aineid, näiteks: õhk, gaasid, puu, vask ja mitmed teised.

3) Aineid, millede μ on veidi väiksem ühest, s. t. aineid, mis ei soodusta, vaid takistavad magnetiliste jõujoonte läbimist, nimetatakse diamagnetilisteks aineteks. Selle liigi iseloomustavad esindajad on vismut ja tsink.

Tühjuses, s. t. ruumis, milles puuduvad ükskõik millised ained, loetakse magnetilist juhtivust võrdseks ühega. See tähendab, et tühjuses

$$\frac{B}{H} = \mu = 1, \text{ või } B = H.$$

Tegelikult see viimane valem on alati tarvitusel mitte ainult tühjuse, vaid ka kõikide paramagnetiliste ja diamagnetiliste ainete kohta, millede magnetiline juhtivus väga vähe erineb ühest.

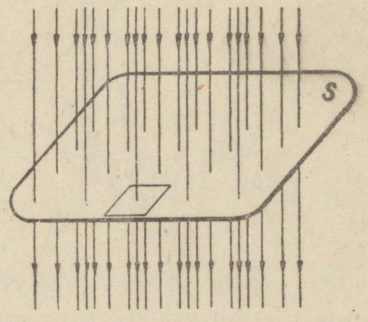
Seetõttu edaspidi me räägime sagedasti, et õhus magnetiline induktsioon on võrdne väljatugevusega, ning kasutame magnetilist juhtivust ainult ferromagnetiliste ainete jaoks.

Oma magnetiliste omaduste suhtes üksteisest erineva kolme ainete liigi vaatlusel me järeldame, et kõik ained evivad ühel või teisel määral magnetilisi omadusi, kuid tegelikult märgatavad on need omadused ainult ferromagnetiliste ainete juures.

Magnetvälja iseloomustavad ruumala antud punktis magnetiline induktsioon ja väljatugevus. Selleks, et iseloomustada magnetvälja tervikuna, tuleb tarvitusele võtta veel üks suurus, nn. magnetvoog (Φ). Magnetvoog kujutab endast jõujoonte koguhulka, mis läbistavad jõujoontele risti asetsevat ükskõik kui suurt pinda (joon. 24).

Kuna magnetiliseks induktsiooniks on 1 cm^2-le langev jõujoonte arv, siis oletusel, et jõujooned asetsevad ühtlaselt, pinda läbistavat jõujoonte koguarvu võiks nähtavasti saada magnetilise induktsiooni korrutamisel pinna ruutsentimeetrite arvuga:

$$\Phi = B \cdot S. \qquad (15)$$



Joon. 24.

Magnetvoogu mõõdetakse maksvellides, kusjuures 1 maksvell on 1 magnetiline jõujoon.

Näide 14. Magnetvälja väljatugevusega $H = 20$ örstedi on paigutatud rauatükk, mille jõujoontele risti suunatud lõikepind $S = 16$ cm^2. Leida raua magnetiline juhtivus, kui magnetvoog rauas $\Phi = 160\,000$ maksvelli.

Määrame raua magnetilise induktsiooni valemist $\Phi = B \cdot S$:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{160\,000}{16} = 10\,000 \text{ gaussi.}$$

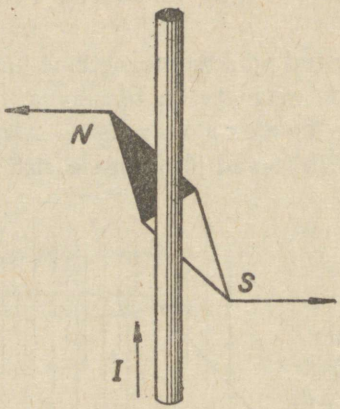
Siis leiame magnetilise juhtivuse järgmiselt:

$$\mu = \frac{B}{H} = \frac{10\,000}{20} = 500.$$

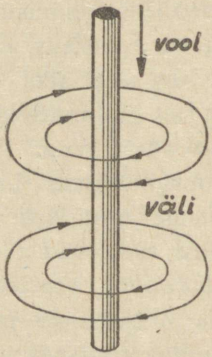
14. Magnetväli voolu ümber.

Tutvumisel elektrivooluga me seni vaatlesime juhtme sisemuses toimuvaid protsesse. Nüüd tutvume nähetega, mis toimuvad voolu all oleva juhtme ümbruses.

Voolu all oleva juhtme mõju kompassi magnetnõelale veenab meid selles, et juhtmes voolav elektrivool põhjustab juhtme ümbruses magnetilisi jõudusid. Teiste sõnadega, voolu all olevat juhet ümbritsevas ruumalas tekib magnetväli, mille mõjul kompassi nõel püüab asetuda perpendikulaarselt juhtme teljega, umbes nagu näidatud joonisel 25.



Joon. 25.

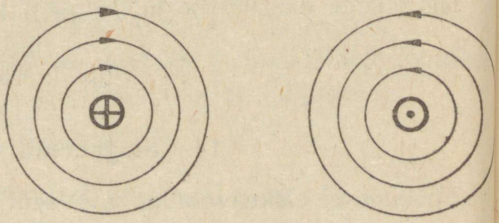


Joon. 26.

Kui voolu all olev juhe torgata läbi papist, millele on raputatud rauapuru, siis rauatükikesed paiknevad kontsentriliste ringidena. See annab meile õiguse tõendada, et voolu all oleva juhtme ümber magnetilised jõujooned asetsevad kontsentriliste ringide näol. Magnetnõela abil võib määrata nende jõujoonte suunda, meeles pidades, et põhjapoolus pöördub magnetvälja jõujoonte suunas. Väga oluline on seejuures silmas pidada, et voolu suuna muutumisel muutub ka jõujoonte suund.

Magnetiliste jõujoonte suuna määramiseks antud voolu suuna alusel kasutatakse nn. korgivinna-reeglit, mida väljendatakse järgmiselt: kui korgivinna sisse keerata voolu suunas, siis korgivinna käepideme pöörlemise suund näitab jõujoonte suunda (joon. 26).

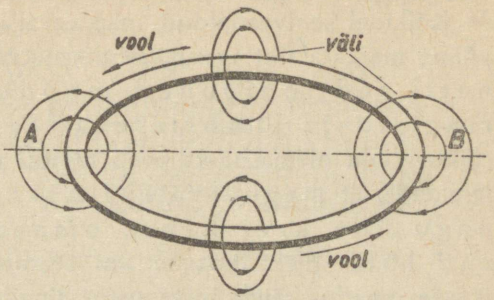
Elektrilistes skeemides tuleb väga sagedasti kujutada joonise pinnale perpendikulaarselt asetseva juhtme ristlõiget; sellisel juhul, kui vool voolab meilt joonise suunas, märgitakse juhtme ristlõikele rist (⊕), kui aga vool voolab joo-



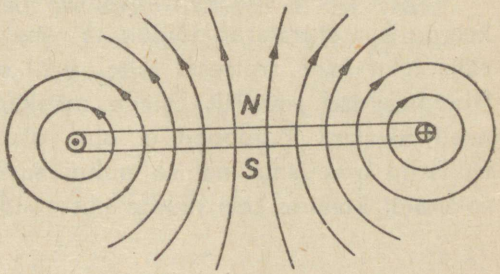
Joon. 27.

nise pinnalt meie poole, siis märgitakse punkt (·). Joonisel 27 on näidatud meilt ja meie poole voolavate voolude magnetväljad. On kerge veenduda, et magnetvälja ja voolu suunad on kooskõlas korgivinna-reegliga.

Kui voolu all olevale juhtmele anda mitte sirge, vaid mingi teine kuju, siis muutub ka juhet ümbritsev magnetväli vastavaks juhtme kujule. Joonisel 28 on näidatud rõngasse keeratud juhtme ehk nn. ringvoolu magnetväli. Kui juhe mõtteliselt läbi lõigata pinnas $A - B$ ning sel teel saadud juhtme ristlõigetele märkida voolusuuna leppelised tähised, siis sama juhust võib kujutada suurema selgusega viisil, nagu me seda näeme joonisel 29. Rõnga sees on kõik jõujooned suunatud ühele poolele. Sealjuures jõujoonte magnetvoog väljub rõnga ühest küljest, teeb ringi väljaspool rõngast ning suubub rõngasse teisest küljest.

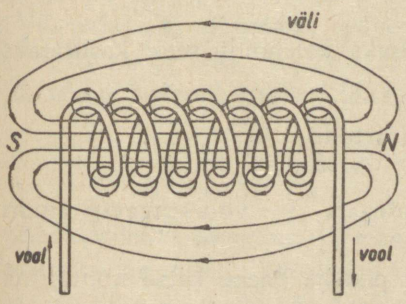


Joon. 28.



Joon. 29.

Elektrotehnikas osutub kõige olulisemaks küsimuseks voolu all oleva spiraali-keritud juhtme magnetväli. Sellekujulisi juhtmeid nimetatakse solenoidideks ehk katsadeks (ka poolideks). Me vaatleme solenoidi magnetvälja veidi üksikasjalisemalt, tähele pannes ka seost voolutugevuse ja väljatugevuse suuruste vahel.



Joon. 30.

Voolu läbilaskmisel kruvijoone järgi keritud juhtmest esialgsed magnetilised jõujooned tekivad üksikute keerdude ümber üksikute rõngaste näol; viimased sulavad kokku solenoidi kõiki keerdusid haaravateks üldjoonteks, mille tulemusena solenoidi magnetväli omandab joonisel 30 näidatud kuju. Üksikute rõngaste suund, samuti ka kõiki keerdusid haaravate jõujoonte suund kooskõlastub voolu suunaga meile juba tuntud korgi-

vinnareegli alusel. Solenoidi sees kõik jõujooned on suunatud ühele poole piki solenoidi telge; väljudes solenoidist nad teevad väljaspool solenoidi ringi ning suubuvad temasse teisest otsast. Voolu all olev solenoid evib kõiki magneti omadusi ja omab oma otstel põhja- ja lõunapoolust.

Kõikidel senivaadeldud magnetvälja tekkimise ja paiknemise juhtudel võime märgata üht igasuguse magnetvälja kohta kehtivat omadust: magnetilised jõujooned moodustavad igal juhul kinnisi ringisid ja ümbritsevad voolu juhtivat juhet. Kuna elektrivoolu olemasoluks peab samuti olema kinnine ring (ahel), siis võime järeldada, et magnetväli ja elektrivool moodustavad endast nagu ühe keti kahte omavahel kindlakujuliselt seotud lüli. Elektromagnetismi seaduste põhjalik tundmaõppimine näitab, et see omadus säilib igasugustes tingimustes, s. t. esineb üldise omadusena mistahes-kujulistele juhtmetele ja magnetväljadele.

Tagasi tulles solenoidi magnetvälja juurde märgime veel, et üksikute keerdudega sidestatud jõujoonte rõngad ei esine mitte ainult üldise magnetvälja tekitamise protsessi vältel, vaid osalt jäävad püsima hiljemalgi voolu läbivoolamisel. Küllalt tiheda mähkimise puhul — keerd keeru vastu — need üksikud jõujooned ei oma olulist tähtsust, kuid näiteks joonisel 30 näidatud hõredama mähise puhul tuleb tingimata võtta arvesse üksikuid, solenoidi kõikide keerdudega mitte sidestatud jõujooni.

15. Magnetringi seadused.

Teoreetilisest seisukohast on õiged kõik elektromagnetismi valemid, mis arvuliselt seovad antudkujulise juhtme voolutugevust ja juhet ümbritsevat magnetvälja, kuid praktikas kunagi ei õnnestu võtta arvesse kõiki lisatingimusi, mille tagajärjel elektrotehnika sellesse valdkonda kuuluvad arvutused osutuvad veidi ebatäpseteks ja mõningail juhtudel koguni ainult ligikaudseteks.

Magnetilise väljatugevuse *(H)* määramiseks solenoidi sees kasutatakse järgmist valemit:

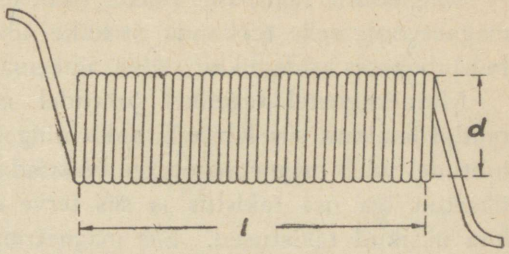
$$H = \frac{0{,}4\ \pi \cdot w \cdot I}{l} \text{ (örstedi).}$$

Selles valemis on w — solenoidi keerdude arv, I — voolutugevus ampritres, l — solenoidi pikkus sentimeetrites.

See valem annab küllalt täpse tulemuse pika ja peene katsa kohta, millel pikkuse l ja läbimõõdu d suhe on vähemalt $5 - 10$ $\left(\frac{l}{d} = 5 - 10\right)$

(joon. 31). Üldiselt katsa magnetväli, mille südamikuks on õhk või mõni teine mittemagnetiline aine, osutub tähtsusetuks; magnetvälja tugevdamiseks paigutatakse katsa sisse raudsüdamik, mis magnetiseerudes mitmekordselt suurendab magnetvälja. Kasutades meile tuntud sõltuvust väljatugevuse ja magnetilise induktsiooni vahel võib määrata magnetilist induktsiooni raudsüdamikuga solenoidi sees järgmiselt:

$$B = \mu \cdot H = \frac{0{,}4 \cdot \pi \cdot w \cdot I \cdot \mu}{l}.$$



Joon. 31.

Me näeme, et induktsioon tõttu raudsüdamikuga katsa magnetväli on μ korda suurem; arvesse võttes, et raua μ on kuni 2 000, me saame kaunis olulise vahe.

Võib küllaldase täpsusega lugeda, et magnetiline induktsioon on südamiku ristlõike mitmesugustes punktides ühesugune.

See annab võimaluse määrata voolu all oleva katsa poolt raudsüdamikus tekitatavat magnetvoogu:

$$\Phi = B \cdot S = \frac{0{,}4 \cdot \pi \cdot w \cdot I \cdot S \cdot \mu}{l},$$

kus S on katsa südamiku ristlõige cm^2-tes.

Saadud valemi võib veidi ümber kujundada selleks, et selgitada temas esinevate suuruste füüsikalist olemust:

$$\Phi = \frac{0{,}4 \cdot \pi \cdot w \cdot I}{\frac{l}{\mu \cdot S}}. \qquad (16)$$

Selle valemi lugejas esinevat suurust nimetatakse magnetomotoorseks jõuks, nimetajas esinevat suurust aga — magnetiliseks takistuseks ehk tõkestuseks. Kasutusele võttes vastavaid tähiseid, võime valemit tublisti lihtsustada:

$$\Phi = \frac{F}{R_m}, \text{ kus } F = 0{,}4 \cdot \pi \cdot w \cdot I;\ R_m = \frac{l}{\mu \cdot S}.$$

Seda valemit nimetatakse magnetringi Ohmi seaduseks ja väljendatakse sõnaliselt järgmiselt: magnetvoog on võrdeline magnetomotoorse jõuga ja pöördvõrdeline magnetilise takistusega.

Magnetomotoorse jõu valem sisaldab voolutugevuse ja katsa keerdude arvu korrutist $w \cdot I$; seda korrutist nimetatakse katsa amperkeerdudeks. Katsa magnetvoo suurendamiseks tuleb kas suurendada voolutugevust või suurendada keerdude arvu.

Magnetilise takistuse valem sisaldab teekonna pikkuse, milles voolab magnetvoog, selle teekonna ristlõike ning samuti ka teguri μ, mis iseloomustab katsa südamikku täitva aine magnetilisi omadusi.

Mitmesugustel tegelikel juhtudel magnetvoog väga sagedasti voolab raudsüdamikus, siis läbistab õhku ning suubub jällegi raudsüdamikku. Neil juhtudel tuleb magnetvoo terve teekond jaotada üksikuteks osadeks, arvutada üksikult iga osa takistus ja siis terve magnetringi kogutakistuse saamiseks liita üksikud takistused. Siis magnetringi Ohmi seadus omandab järgmise kuju:

$$\Phi = \frac{0{,}4 \cdot \pi \cdot w \cdot I}{R_{m1} + R_{m2} + R_{m3}}.$$

Selles valemis R_{m1}, R_{m2} ja R_{m3} on magnetringi kolme järjestikku asetseva osa magnetilised takistused.

Selle valemi ümbermoodustamisega võib saada väga olulise vahekorra, mida kasutatakse tehnilistes arvutustes:

$$\Phi \cdot R_{m1} + \Phi \cdot R_{m2} + \Phi \cdot R_{m3} = 0{,}4 \cdot \pi \cdot w \cdot I.$$

Valemi vasakpoolse osa liikmed kujutavad endast magnetomotoorseid jõudusid, mida tuleb tekitada magnetvoo juhtimiseks läbi üksikute osade.

Tähistades:

$$\Phi \cdot R_{m1} = F_1,$$
$$\Phi \cdot R_{m2} = F_2,$$
$$\Phi \cdot R_{m3} = F_3,$$

võime kirjutada järgmise lühendatud avaldise:

$$F_1 + F_2 + F_3 = F,$$

mis ütleb, et kogu magnetomotoorne jõud peab võrduma magnetomotoorsete jõudude summaga, mida on vaja vooluringi üksikute osade magnetiliste takistuste ületamiseks.

Meeles pidades, et iga magnetomotoorse jõu valem sisaldas alalist tegurit $0{,}4 \cdot \pi$, võime koondada kogu eelneva avaldise selle teguriga; siis saame lõpliku amperkeerdusid sidestava valemi:

$$(w \cdot I)_1 + (w \cdot I)_2 + (w \cdot I)_3 = w \cdot I.$$

Selle valemi vasakpoolses osas esineb amperkeerdude summa, mida tuleb tekitada magnetringi üksikute osade magnetiliste takistuste ületamiseks, parempoolses osas — amperkeerud, mida vajatakse soovitava magnetvoo tekitamiseks kogu ringis. Seda, tehnilisest seisukohast väga tähtsat vahekorda sõnastatakse järgmiselt: antud magnetringi amperkeerdude koguarv võrdub üksikute osade magnetiliste takistuste ületamiseks vajalikkude amperkeerdude summaga.

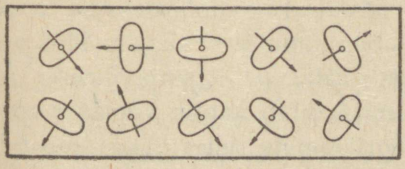
Me veendume edaspidiste näidete lahendamisel, et see vahekord annab meile kõige lihtsama tee tegelike küsimuste lahendamiseks.

16. Raua magneetimine.

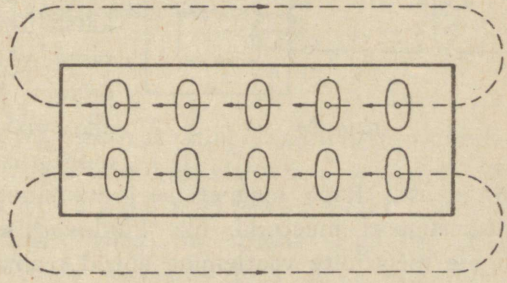
Olles vaadelnud mitmeid elektromagnetismiga seotud nähteid, selgitame veelkordselt terasest valmistatud püsiva magneti füüsikalisi omadusi.

Seame üles küsimuse: kas ei võiks püsiva magneti magnetismi seletada mingisuguste vaatlejale varjatud magneti kehas olevate vooludega?

Vastuse saamiseks sellele küsimusele süveneme aine aatomi ehitusse. Üsna alguses oli juba öeldud, et aatom koosneb tuumast ning selle ümber pöörlevatest elektronidest. Kuna elektronide liikumine moodustab elektrivoolu, siis tuuma ümber pöörlevat elektroni võiks võrrelda ringvooluga ning, nagu teada, niisugune ringvool tekitab voolu pinnale perpendikulaarselt suunatud magnetvälja. Sel põhjusel võime arvata, et iga aine aatom peab omama iseseisvat magnetvälja. Miks siis muutub magnetiks terase tükk pärast seda, kui oleme teda magneetinud teise magnetiga või elektrivooluga? See seletub sellega, et magneetimata raua või terase tüki üksikute



Joon. 32.



Joon. 33.

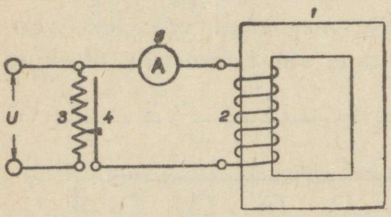
aatomite magnetväljad on suunatud korrapäratult igale poole (joon. 32). Kui aga sellist terase tükki mõjutada väljastpoolt mingi magnetväljaga, siis aato-

mite magnetväljad pöörduvad magneetiva välja suunas ning tulemusena me saame joonisel 33 kujutatud olukorra. Me näeme, et terase tükk omandab seejuures iseseisva magnetvälja, s. t. muutub magnetiks. Kui magneetivat mõjutamist katkestada, siis termilise liikumise tagajärjel aatomid võivad pöörduda endisse korrapäratusse asendisse, mida ongi märgata pehme terase juures, milles teatavasti magnetilised omadused ei püsi kuigi kaua. Kuid kõvema struktuuriga teras omab palju suuremat kinnipidavat jõudu, mis on suuteline kaunis kaua hoidma aatomeid teatavas asendis. Tänu sellele omadusele võib terasest valmistada püsivmagneteid, mis ükskord magneeditult hoiavad oma magnetismi alal niikaua, kuni aatomid liigse soojenemise või tugeva põrutamise tagajärjel ei lähe tagasi korrapäratusse asendisse.

Raua magnetiliste omaduste tundmaõppimiseks teostatakse katseid, millede abil selgitatakse suhet magnetilise induktsiooni *(B)* ja väljatugevuse *(H)* või rauas jõujoonte teekonna igale cm-le langevate amperkeerdude arvu vahel. Tehnikas on viimane suhe palju soodsam, kuna siis on võimalik teostada arvutusi ilma väljatugevuse ümberarvutamiseta amperkeerdudeks ühe cm kohta. Meelde tuletades väljatugevuse valemit:

$$H = \frac{0{,}4 \ \pi \ w \cdot I}{l},$$

me veendume, et amperkeerud ühe cm kohta $\left(\frac{w}{l} \ I\right)$ erinevad väljatugevusest alalise korrutaja $0{,}4 \cdot \pi$ $(= 1{,}256)$ võrra. Sisuliselt on seepärast ükskõik, millise suuruse suhtes määratakse magnetilist induktsiooni rauas. Skeem, mille abil võib nimetatud suhet katseliselt leida, on näidatud joonisel 34.

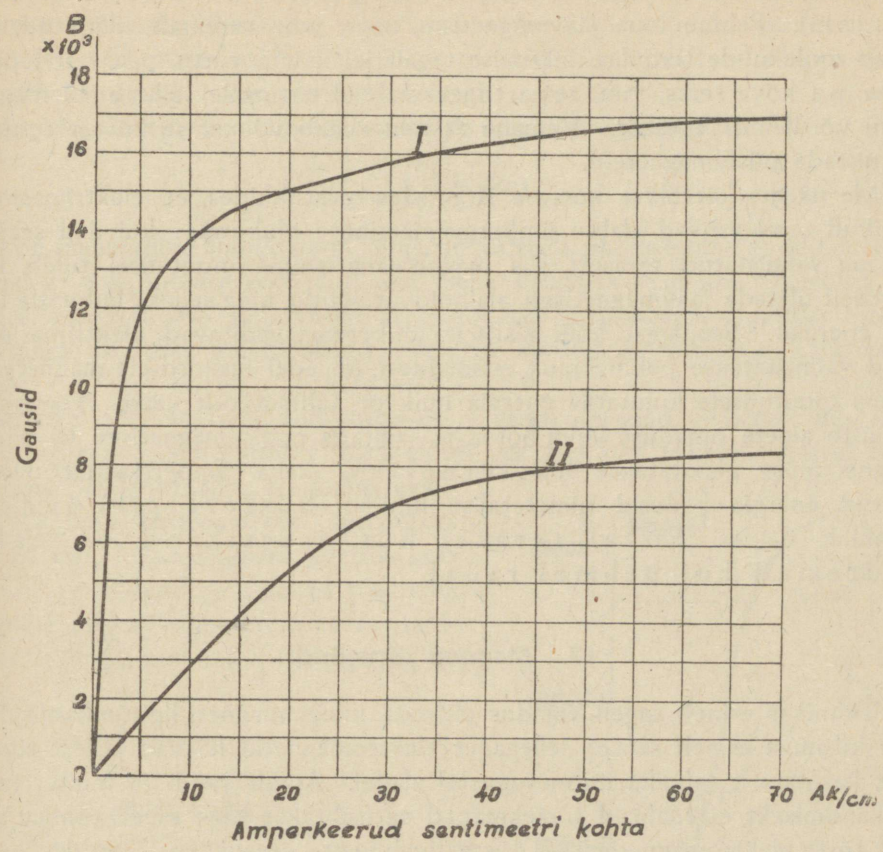


Joon. 34.

Sellel joonisel on: *1* — katsetatav raudsüdamik, *2* — *w* keerdu omav magneetiv katsa (mähis), *3* — reostaat (takistus); katsasse võib soovitavat voolutugevust anda liugleja *4* abil, nihutades viimast üles või alla piki reostaati; *5* — ampermeeter — mõõteriist, mis näitab katsas voolavat voolutugevust. Raua magnetilise induktsiooni määramine selles katses teostub mitmesugusel meetodil, mis kuuluvad magnetiliste mõõtmiste valdkonda. Nende meetodite vaatlemine antud raamatus pole võimalik.

Katse tulemused koondatakse tabelisse ning kujutatakse diagrammi näol, mille abstsisside teljele kantakse magneetivad amperkeerud ning ordinaatide teljele — gaussides väljendatud magnetiline induktsioon raudsüdamikus. Joonisel 35 on näidatud terase (I) ja malmi (II) magneetimise kõverad. Me

näeme, et kuni 10 000 — 12 000 gausini terase magnetiline induktsioon kasvab võrdlemisi järsult, s. t. et teras magnetiseerub väga intensiivselt; 12000 ja 14000 gausi vahel tõus aegamööda väheneb, pärast 14 000 kõver muu-



Joon. 35.

tub üsna lamedaks ning edaspidine magneetivate amperkeerdude suurendamine väga vähe suurendab terase magnetilist induktsiooni. Sel juhul räägitakse, et teras on magneeditud kuni küllastuseni. Meelde tuletades raua magneetimise füüsikalist alust, on hõlpus selgitada, miks teataval magnetilisel induktsioonil tekib küllastus ning miks edaspidine magneetimine muutub võimatuks. Raud magnetiseerub tegelikult tänu sellele, et raua aatomid magneetiva jõu mõjul pöörduvad ühte suunda. Kui aga kõik aatomid asetuvad nii, et nende magnetväljad langevalt suunaliselt magneetiva väljaga ühte, on raua magnetiseerumise võime täielikult ära kasuta-

tud ning me oleme õigustatud ütlema, et raud magnetiseerus kuni küllastuseni.

Kui pärast raua magneetimist välja lülitada magneetiv vool, siis katsetatavasse südamikku jääb järele nn. j ä ä v m a g n e t i s m (r e m a n e n t m a g n e t i s m). Pehme raua jäävmagnetism, nagu juba varemalt märgitud, hävineb molekulide termilise liikumise tagajärjel kaunis ruttu peaaegu lõpuni, kuna aga kõva teras, tänu tema tugevamale struktuurile, säilitab jäävmagnetismi võrdlemisi kindlalt. Viimane asjaolu annab võimaluse kõvast terasest valmistada püsivmagneteid.

Me näeme käesoleva kursuse järgmistes peatükkides, et elektrimasinate üksikud osad asuvad alalise ümbermagneetimise olukorras: kui nad seejuures on valmistatud terasest, siis magnetvälja suuna muutmisel tuleb igakordselt ületada jäävmagnetismi alalhoidvat jõudu ning selleks kulutada liigset energiat. Seepärast kõik alaliselt ümbermagneeditavad elektrimasinate osad valmistatakse pehme raua erisortidest, milledel igakordsele magnetvälja suuna muutmisele kulutatav energia hulk on tähtsusetult väike. Ferromagnetiliste ainete omadust kinni hoida ja säilitada endas magnetismi ka pärast magneetimist nimetatakse h ü s t e r e e s i k s. Raua ümbermagneetimisega seotud energia kadusid nimetatakse lühidalt h ü s t e r e e s i k a d u d e k s Lühidalt öeldes, k õ v a l t e r a s e l h ü s t e r e e s i k a o d o n p a l j u s u u r e m a d k u i p e h m e l r a u a l.

17. Magneti tõstejõud.

Tehnikas esineb sageli vajadus määrata mingi magneti ligitõmbamisjõud. See küsimus esineb seoses sellega, et elektromagnetid leiavad järjest suuremat kasutamist tehnika mitmesugustel aladel. Ainult raud- ja terasesemete ülekandmiseks ettenähtud tõstekraanad varustatakse väga sageli konksu asemel tõste elektromagnetiga. Tööstustingimustes seesugune täiendus kiirendab mitmekordselt esemete transportimist, eriti kui need oma kuju tõttu on raskesti kinnitatavad konksule. Iga tõstekraana on varustatud pidurdamisseadmega, mis voolu väljalülitamisel silmapilkselt paneb seisma kõik pöörlevad mehhanismid. Need pidurdamisseadmed ehitatakse nii mehaanilise kui ka elektrilise käitamisega. Viimasel juhul kraana mootorit toitev vool läbib elektromagneti mähise, mis selle voolu mõjul tõmbab ligi tõstekraana mehhanismi vabastava raudsüdamiku; voolu väljalülitamisel aga raudsüdamik, tagasi tõmbudes algseisundisse, teostab mehhanismi pidurdamist.

Umbes sarnane elektromagnetiline pidurdamine on kasutusel ka tänavraudtee haakvagunites; pidurdamist teostavat voolu antakse sel juhul mootorvagunist erijuhtmete kaudu.

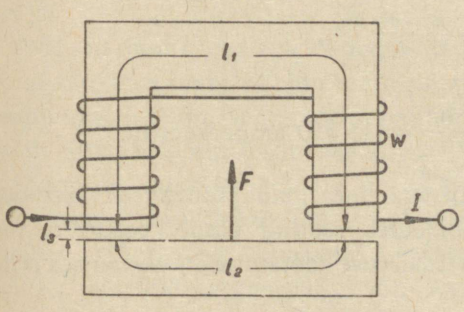
Seeriatootmise protsessis metallitööstuses on väga ratsionaalselt kasutatav töödeldavate esemete elektromagnetiline kinnitamine tööpinkidele. Selleks varustatakse tööpink nõndanimetatud elektromagnetilise töölauaga, millele paigutatakse väljalülitatud voolu puhul töödeldavad esemed. Pärast esemete asetamist töölauale lülitatakse sisse magneetiv vool, töödeldavad esemed kinnituvad väga tugevasti töölaua külge ja neid ei saa sealt eemaldada niikaua, kuni magneetiv vool on sisse lülitud.

Magneti tõstejõudu võidakse arvutada järgmise valemi abil:

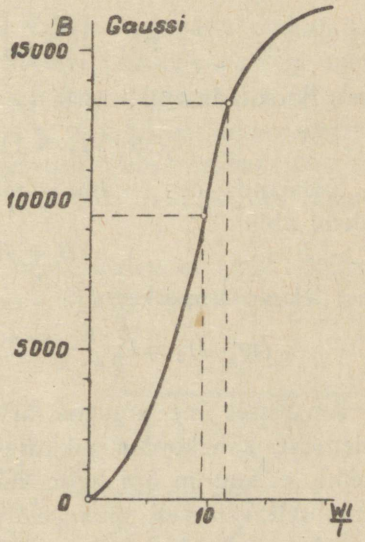
$$F = \left[\frac{B}{5000}\right]^2 \cdot S \text{ (kg)}. \qquad (17)$$

B on magnetiline induktsioon õhus, mõõdetult pooluse otseses läheduses, gaussides; S — pooluse pind cm^2-tes. Selle valemiga saadakse tõstejõud F (kg-des) magneti ühe pooluse kohta; juhul, kui ligitõmmatav rauatükk asetseb kahel poolusel, tuleb antud valemiga arvutatud tõstejõud kahekordistada.

Näide 15. Määrata voolutugevus I elektromagneti mähises, mis on vajalik, et raudklotsile mõjuv tõmbejõud võrduks ühe tonniga. Antud on (vt. joon. 36): jõujoonte teekonna keskmine pikkus elektromagneti südamikus $l_1 = 80$ cm, kogu pikkuses ühtlane ristlõige $S_1 = 140$ cm^2; jõujoonte teekonna keskmine pikkus külgetõmmatavas raudklotsis $l_2 = 30$ cm, tema ristlõige $S_2 =$



Joon. 36.



Joon. 37.

100 cm^2; elektromagneti ja raudklotsi vahel on õhuvahed (pilud) à 0,1 cm kummaltki poolt (tavaliselt võetakse õhuvahed arvesse mittetiheda liibumise juhuks); mähise keerdude arv $w = 400$; elektromagneti südamiku ja raudklotsi magnetilised omadused on nähtavad magneetimise kõveralt joonisel 37.

Alustame arvutust õhuvahede magnetilise induktsiooni suuruse määramisega, eeldusel, et mõlemad poolused kokku peavad tekitama tõmbejõudu 1 tonni:

$$F = \left[\frac{B}{5000}\right]^2 \cdot S;$$

$$B = 5000 \sqrt{\frac{F}{2 \cdot S}} = 5000 \sqrt{\frac{1000}{2 \cdot 140}},$$

$$B = 9450 \text{ gaussi.}$$

Magneetimiskõverast (joon. 37) leiame, et induktsiooni puhul 9450 gaussi esimese osa jaoks $\left(\frac{w \cdot I}{l}\right)_1 = 9$; korrutades seda esimese osa pikkusega, leiame amperkeerdude arvu $(w \cdot I)_1 = 9 \cdot 80 = 720$ amperkeerdu. Määrame raudklotsis magnetvoo juhtimiseks vajalikud amperkeerud, arvesse võttes, et raudklotsi ristlõige — S_2 — on elektromagneti südamiku omast väiksem, ning seetõttu induktsioon, s. t. jõujoonte tihedus temas on suurem:

$$B_2 = B_1 \cdot \frac{S_1}{S_2} = 9450 \frac{140}{100} = 13\,200 \text{ gaussi.}$$

Magneetimiskõverast leiame teise osa jaoks amperkeerud ühe cm kohta:

$$\left(\frac{w \cdot I}{l}\right)_2 = 11{,}5,$$

kust, korrutades pikkusega l_2, leiame teise osa amperkeerud:

$$(w \cdot I)_2 = 11{,}5 \cdot 30 = 345 \text{ amperkeerdu.}$$

Kolmanda osa — õhuvahede — jaoks arvutame amperkeerud järgmise valemi abil:

$$B = H = \frac{0{,}4 \ \pi \cdot (w \cdot I)_3}{2 \ l_3},$$

kust leiame amperkeerud:

$$(w \cdot I)_3 = \frac{B \cdot 2 \cdot l_3}{0{,}4 \cdot \pi} = \frac{9450 \cdot 2 \ 0{,}1}{0{,}4 \cdot \pi} = 15\,050 \text{ amperkeerdu.}$$

Arvutuses me võtsime arvesse korraga mõlemad õhuvahed, asetades valemisse kahekordse pikkuse l_3. Võrreldes saadud amperkeerdusid, me näeme, et suurim osa neist kulub õhu takistuse ületamiseks, vaatamata selle suhteliselt väikesele pikkusele l_3.

Amperkeerdude koguarvu leiame summeerides üksikute osade amperkeerud:

$$w \cdot I = 720 + 345 + 15\,050 = 16\,115 \text{ amperkeerdu.}$$

Siit määrame otsitava voolutugevuse:

$$I = \frac{16\,115}{w} = \frac{16\,115}{400} = 40{,}3 \text{ A}.$$

18. Elektromagnetiline jõud.

Elektromagnetilise jõu all mõistetakse jõudu, mis tekib voolu all oleva juhtme ja magnetvälja vahel, milles antud juhe asub.

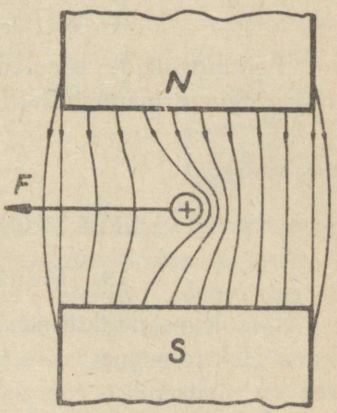
Nagu eelmisest juba teada, tekib sirgjoonelise voolu all oleva juhtme ümber magnetväli, mille jõujooned ümbritsevad juhet kontsentriliste ringidena. Kui paigutada niisugune juhe magneti poolustevahelisse magnetvälja, siis, olenevalt voolu suunast, juhtme poolt tekitatud jõujooned ühel pool juhet liituvad põhimagnetväljaga, teisel pool juhet nad on aga suunatud põhimagnetväljale vastupidiselt ja neid tuleb sellest lahutada. Pärast mõlema magnetvälja liitmist me saame uue moonutatud magnetvälja, milles jõujoonte tihedus juhtme külgedel pole enam ühesugune.

Joonisel 38 on näidatud resulteeriv magnetväli antud pooluste asendi ja voolu suuna jaoks.

Et veenduda selle joonise vastavuses tegelikkusele, kasutame meilt joonise pinna suunas voolava voolu kohta korgivinnareeglit; jõujooned on siis suunatud kellaosuti suunas — ning tulemusena paremal pool juhet nad liituvad pooluste magnetvälja jõujoontega, kuna vasakul pool — töötavad sellele vastu. Sel juhul me saame paremal pool juhet jõujoonte tihenemise, vasakul pool aga hõrenemise.

Kui seejuures jõujooni võrrelda pooluste vahele tugevasti pingutatud kumminiitidega, selgub meile, et juhe püüab liikuda vasakule noolega märgitud suunas ja seda nimelt moonutatud jõujoonte surve mõjul. Katsed tõendavad sellise oletuse vastavust tegelikkusele, sest küllalt suure magnetilise väljatugevuse ja küllalt suure voolutugevuse puhul saadav jõud on niivõrd tugev, et osutub võimalikuks teda kasutada praktilisteks otstarveteks.

Me näeme käesoleva kursuse järgmistes peatükkides, et kõigi elektrimootorite töötamise põhimõte on rajatud elektromagnetilisele jõule; see märkus veelkordselt kriipsutab alla tema määratut tähtsust.

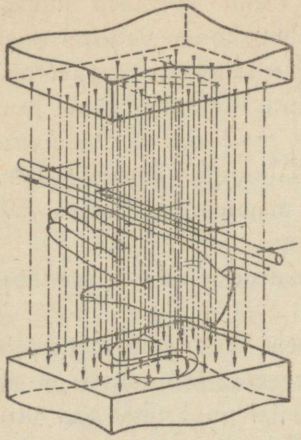


Joon. 38.

Joonisel 38 on kujutatud pooluste asetuse ja voolusuuna üksikjuhus, mille puhul elektromagnetiline jõud on suunatud vasakule poole. Selleks, et elektromagnetilise jõu suunda võiks kiiresti määrata ka igasuguse teise pooluste asetuse ja voolusuuna puhul, kasutatakse vasaku käe reeglit.

Kui vasak käsi asetada nii, et põhjapoolusest väljuvad magnetvoo jõujooned langevad peopessa ning väl-

ja sirutatud sõrmed on suunatud juhtmes voolava voolu suunas, siis peopesa pinnas väljapööratud pöial näitab meile elektromagnetilise jõu suunda.



Joon. 39.

Vasaku käe reegli kasutamine on näidatud joonisel 39.

Magnetväljasse asetatud juhtmele mõjuva jõu suurus oleneb magnetilisest induktsioonist, juhtme pikkusest ning juhtmes voolava voolu tugevusest.

Kui induktsioon B on väljendatud gaussides, voolutugevus amprites ja juhtme pikkus cm-tes, võime määrata otsitava jõu valemiga

$$F = \frac{B \cdot I \cdot l}{9\,810\,000} \text{ (kg)}. \qquad (18)$$

Nimetajas esinev tegur on siin selleks, et valitud ühikutega leida jõudu otse kilogrammides.

Sagedasti jääb mulje, et jõud ei või osutuda kuigi suureks, kuna nimetajas on õige suur tegur; kuid ei tule unustada, et elektrimootoris on meil tegemist mitte ainult ühe juhtmega, vaid kogu mähisega, mille tõttu juhtme kogupikkus on kaunis suur. Üeldu tõenduseks võtame tegeliku näite:

Näide 16. Määrata magnetväljas asuvale juhtmete rühmale mõjuva jõu suurus järgmistel andmetel: juhtmete arv — 100, iga juhtme pikkus — 60 cm, voolutugevus igas juhtmes — 20 A, induktsioon 10 000 gaussi.

Jõu suuruse määramiseks kasutame valemit

$$F = \frac{B \cdot I \cdot l}{9\,810\,000} = \frac{10\,000 \cdot 20 \cdot 100 \cdot 60}{9\,810\,000} = 122{,}5 \text{ kg}.$$

Toodud näide tõendab elektromagnetilise jõu kasutamise otstarbekust mõnesuguste mehhanismide käitamiseks.

V peatükk.

ELEKTROMAGNETILINE INDUKTSIOON.

19. Indutseeritud elektromotoorne jõud.

Käesolevas punktis käsitletakse keerulisi ja ühtlasi väga tähtsaid küsimusi, kuna elektromagnetilisele induktsioonile on rajatud kõigi elektrigeneraatorite, see on mehaanilist energiat elektrienergiaks muundajate vooluallikate töötamise põhimõte.

Elektromagnetilise induktsiooni nähte avastamine ja samuti selle igakülgne eksperimentaalne uurimine toimus umbes sada aastat tagasi Faraday poolt.

Teostades mitmesuguseid katseid elektromagnetiliste nähete valdkonnas, Faraday märkas, et mingit juhet ümbritseva magnetvälja muutumisel juhtmes tekib elektromotoorne jõud ja kestab selles niikaua, kui muutub magnetväli. Magnetvälja muutumisega tekitatud elektromotoorset jõudu nimetatakse indutseeritud elektromotoorseks jõuks, ning selleviisilist voolutekitamise protsessi — elektromagnetiliseks induktsiooniks. Edasi märkas Faraday, et juhtme ja magnetvälja vastastikusel nihkumisel indutseeritud elektromotoorne jõud ei esine mitte igasugustes tingimustes, vaid ainult teatava kindlakujulise vastastikuse nihkumise puhul. Tingimusi, milledel esineb elektromagnetilise induktsiooni nähe, on kõige hõlpsam selgitada, kui kasutada kujutlust magnetilistest jõujoontest.

Siis elektromagnetilise induktsiooni seadust võiks formuleerida järgmiselt (Faraday formuleering): kui magnetvälja liikumisel juhtme suhtes või juhtme liikumisel magnetvälja suhtes juhe lõikab magnetilisi jõujooni, indutseerub temas elektromotoorne jõud.

Indutseeritud elektromotoorse jõu saamiseks on seetõttu tingimata vajalik juhtme lõikumine magnetvälja jõujoontega. Kuna juhtme või magnetvälja liikumist on võimalik tekitada mehaanilise jõu rakendamisel ja mehaanilise energia kulutamisel ning selle tulemusena saadakse elektrivoolu, siis on silmanähtav, et elektromagnetilise induktsiooni avastamisega me saime võimaluse mehaanilise energia muundamiseks elektriliseks energiaks.

Veendunud vaadeldava küsimuse erakordses tähtsuses, asume elektromagnetilise induktsiooni üksikute juhtude üksikasjalisele vaatlusele.

Elektromagnetilise induktsiooni teel saadud elektromotoorse jõu suurus oleneb juhtme poolt ühe sekundi vältel lõigatavate jõujoonte arvust, ehk nagu räägitakse, lõikamise kiirusest. Tähistades aja t vältel lõigatud jõujoonte arvu tähega Φ, võime moodustada valemi indutseeritud elektromotoorse jõu suuruse määramiseks

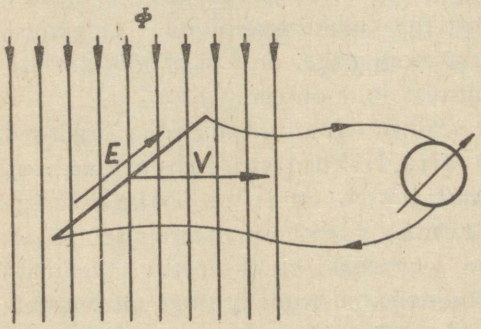
$$E = \frac{\Phi}{t};$$

Ex bibl. univ. ...

kui Φ — jõujoonte arv, t — aeg sekundites, siis selle valemiga arvutatud elektromotoorne jõud saadakse absoluutsetes elektromagnetilistes ühikutes (CGS süsteemis). Tegeliku ühiku — voldi saamiseks tulemust tuleb vähendada 100 miljonit korda. Väljendades seda matemaatiliselt, saame lõpliku valemi indutseeritud elektromotoorse jõu arvutamiseks voltides:

$$E = \frac{\Phi}{t} 10^{-8} \text{(volti)}.$$

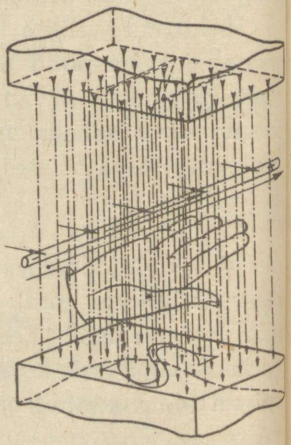
See valem näitab, et ühe voldi saamiseks elektromagnetilise induktsiooni teel tuleb ühes sekundis lõigata 100 miljonit jõujoont. Esimesel pilgul tundub see arv niivõrd suurena, et näib täiesti võimatuna saada sel teel kas või ühte volti. Kuid see arvamine on ekslik, sest magnetilise induktsiooni puhul 10 000 jõujoont ühele cm^2 ning küllaldase juhtme liikumise kiiruse puhul ühes sekundis lõigatavate jõujoonte arv on niivõrd suur, et on tagatud kümnetesse ja koguni sadadesse tuhandetesse voltidesse tõusva elektromotoorse jõu saamine. Suurte elektrijaamade võimsatest generaatoritest saadakse tavaliselt elektromotoorset jõudu kuni 11 000 volti.



Joon. 40.

Vaatleme nüüd lihtsaima ja ühtlasi suurt praktilist tähtsust omava elektromotoorse jõu saamise juhusena sirgjoonelise juhtme liikumist ühtlases, s. o. ühtlase jõujoonte tihedusega magnetväljas.

Joonisel 40 juhe liigub paremale poole, magnetväli on suunatud ülalt alla, s. t. nagu oleks ülal põhjapoolus ning all — lõunapoolus; seejuures elektromotoorne jõud juhtmes on suunatud, nagu joonisel näidatud, meilt joonise suunas. Katsed näitavad, et juhtme liikumise suuna muutmisel või jõujoonte suuna muutmisel, muutub ka indutseeritud elektromotoorse jõu suund. Selleks, et igasugusel juhul võiks hõlpsalt ja eksimatult määrata elektromotoorse jõu suunda, kasutatakse nn. parema käe reeglit (joon. 41). See reegel on kasutatav järgmisel kujul: kui parema käe peopesa asetada põhjapooluse suunas ning kõrvale pööratud pöial — juhtme liikumise suunas, siis ülejäänud neli väljasirutatud sõrme näitavad meile indutseeritud elektromotoorse jõu suunda.


Joon. 41.

Eeltoodud valem indutseeritud elektromotoorse jõu suuruse määramiseks on üldine kõikidele elektromagnetilise induktsiooni juhtudele; kuid antud juhul võiks temale anda tegelikust seisukohast käepärasema kuju.

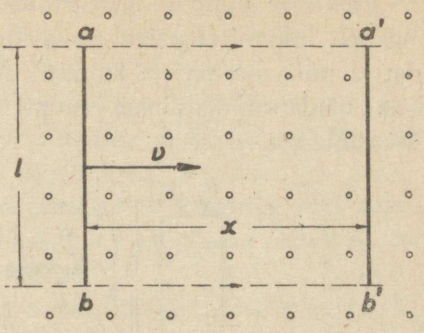
Joonisel 42 on kujutatud sirgjooneline juhe ab pikkusega l cm, mis liigub paremale poole kii-

rusega v (cm/sek.). Liikugu juhe t sekundi vältel kaugusele x ja jõudku asendisse $a'b'$; siis ta lõikab kõik magnetilised jõujooned, mis on piiratud pindalaga:

$$S = x \cdot l \ (\text{cm}^2).$$

Joonisel on jõujooned märgitud punktidega, kuna oletuse kohaselt magnetväli on suunatud joonisele perpendikulaarselt. Kui magnetiline induktsioon on B gaussi, s. t. igale cm^2-le langeb B jõujoont, siis juhtme liikumisel kaugusele x lõigatud jõujoonte koguarvuks on:

$$\Phi = B \cdot S = B \cdot x \cdot l \ (\text{jõujoont}).$$



Joon. 42.

Elektromotoorset jõudu võib siis määrata üldise valemiga:

$$E = \frac{\Phi}{t} 10^{-8} = \frac{B \cdot x \cdot l}{t} 10^{-8} \ (\text{volti});$$

ehk

$$E = B \cdot \frac{x}{t} \cdot l \cdot 10^{-8} \ (\text{volti});$$

selles valemis suurus $\frac{x}{t}$ on juhtme poolt ajaühiku vältel läbitud teekond, s. t. teiste sõnadega, juhtme liikumise kiirus:

$$\frac{x}{t} = v.$$

Nüüd siis saame praktilisteks arvutusteks kohase lõpliku valemi:

$$E = B \cdot v \cdot l \cdot 10^{-8} \ (\text{volti}). \qquad (19)$$

Toodud valem näitab, et sirgjoonelise juhtme ühtlasel liikumisel ühtlases (homogeenses) magnetväljas indutseeritud elektromotoorne jõud on võrdeline magnetilise induktsiooni, juhtme liikumise kiiruse ja juhtme pikkusega.

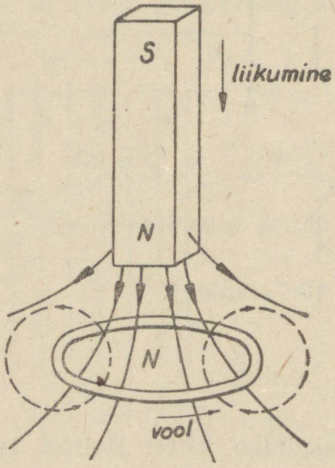
Näide 17. Kolmsada järjestikku ühendatud juhet kogupikkusega 150 m liiguvad kiirusega 50 m/sek. ühtlases magnetväljas induktsiooniga $B = 10\,000$ gaussi. Määrata indutseeritud elektromotoorse jõu suurus.

Seda ülesannet võib lahendada, asetades kõik antud väärtused viimsena tuletatud valemisse, meeles pidades seejuures, et pikkus ja kiirus tuleb võtta cm-tes ja cm/sek-tes:

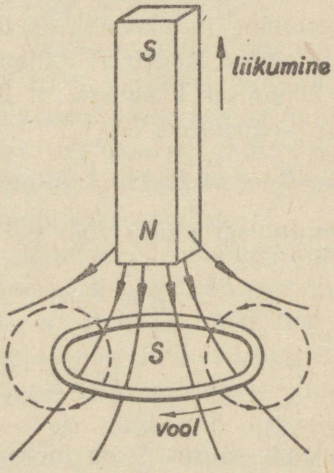
$$E = 10\,000 \cdot 50 \cdot 100 \cdot 150 \cdot 100 \cdot 10^{-8} = 7500 \ \text{V}.$$

Saadud tulemus näitab, et elektromagnetilise induktsiooni teel me saame suuruselt praktiliseks kasutamiseks küllaldase elektromotoorse jõu.

Vaatleme nüüd indutseeritud elektromotoorse jõu saamise juhust püsivmagneti liikumisel paigalseisva kinnise juhtme suhtes. Joonisel 43 on näidatud püsivmagneti ja kinnise juhtme vastastikune asetus, samuti on noolega näidatud liikumise suund, millise puhul magneti põhjapoolus (N) sisendub rõngasse.



Joon. 43.



Joon. 44.

Nool piki rõngast näitab indutseeritud elektromotoorse jõu suunda. Indutseeritud elektromotoorse jõu tagajärjel rõngas tekkiv vool tekitab omaltpoolt magnetvälja, mille kuju on näidatud punktiir-ringjoontega. Sealjuures magnetipoolsel rõnga küljel tekkiv poolus on samanimeline sellega, mida me rõngale lähendame.

Nihutades magnetit vastupidises suunas, s. t. eemaldades teda rõngast, kujundame jällegi indutseeritud elektromotoorse jõu tekkimiseks vajaliku olukorra. Kuid nüüd tekib rõngas vool vastupidises suunas ning rõnga magnetipoolsel küljel tekib seekord teisenimeline poolus, võrreldes rõngast eemaldatava magneti poolusega.

Joonisel 44 on näidatud see teine juhus, kusjuures on märgitud ka voolu suund rõngas.

Indutseeritud voolu suuna määramiseks mõlemal toodud juhul on väga soodne kasutada Lenz'i reeglit, mis seisneb järgmises:

Indutseeritud voolu suund on alati niisugune, et ta töötab voolu tekitanud nähtele vastu.

Vaatleme esimest juhust: me tekitame indutseeritud voolu, lähendades magneti põhjapoolust; tuginedes Lenz'i reeglile me peaksime sealjuures tundma teatavat vastuseisu. See vastuseis tekib ühenimeliste pooluste eemaletõukumisest. Üheks nendest on magneti poolus, teiseks — indutseeritud voolu poolt tekitatud poolus.

Teisel juhul me indutseerime voolu, eemaldades põhjapoolust; siis rõnga magnetipoolsel küljel tekib teisenimeline poolus ning ligitõmbumisjõud isenimeliste pooluste vahel takistab magneti eemaldamist.

Tuleb märkida, et mõlemal juhul indutseerub vooluringis elektromotoorne jõud, mis tekitabki voolu, kui vooluring on suletud. Selles mõttes tulebki mõista väljendust „indutseeritud vool".

Indutseeritud voolu suuna määramiseks võiks kasutada ka parema käe reeglit; kuid antud juhul Lenz'i reegel annab tulemuse kiiremini ning peale selle parema käe reegel on puht leppeline, kuna Lenz'i reegel avastab elektromagnetilise induktsiooni füüsikalise olemuse. Tõepoolest, indutseeritud voolu saamiseks on vajalik kulutada teatud energiahulka, mis on võrdne selle voolu poolt vooluringis kulutatud energiaga. Lükates magnetit rõngasse, me peame kulutama mehaanilist energiat ühenimeliste pooluste tõukejõudude ületamiseks, ning tõmmates magnetit rõnga seest, me peame kulutama energiat isenimeliste pooluste tõmbejõudude ületamiseks.

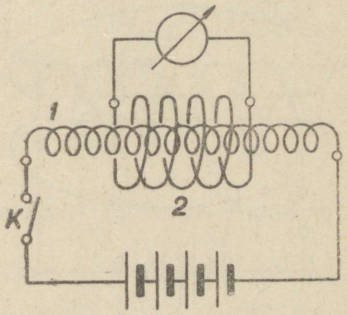
Me näeme seega, et Lenz'i reegel osutub füüsikaliseks seaduseks, millist võib kasutada indutseeritud voolude suundade määramiseks.

Elektromotoorse jõu indutseerimisel lahtises vooluringis mingisugust energiat ei kulutata, kuna sel juhul ei teki voolu ja järelikult ei saa tekkida ka vastutöötavat magnetvälja.

20. Vastastikune induktsioon. Omainduktsioon.

Nüüd vaatleme kahe elektrilise vooluringi nn. vastastikuse induktsiooni juhust.

Joonisel 45 on kujutatud kaks üksteisele mähitud, kuid üksteisest isoleeritud mähist. Esimese mähisega on ühendatud vooluallikas ja lüliti, teisega — mõõteriist, mis näitab indutseeritud voolu. Lüliti abil esimeses mähises voolu lülitamisel ja katkestamisel tekkiv ja kaduv magnetväli indutseerib teises mähises voolu.



Joon. 45.

Varemalt oli juba selgitatud, et indutseeritud voolu saamiseks on üldiselt vajalik juhtme ja magnetvälja suhteline nihkumine; eelmistel juh-

tudel saavutati seda kas juhtme liikumisega magneti suhtes või magneti liikumisega juhtme suhtes. Käesolev juhus on aga huvitav selle poolest, et nähtavat liikumist siin üldse pole olemas, kuna me sunnime liikuma magnetilisi jõujooni, suurendades või vähendades voolu esimeses mähises.

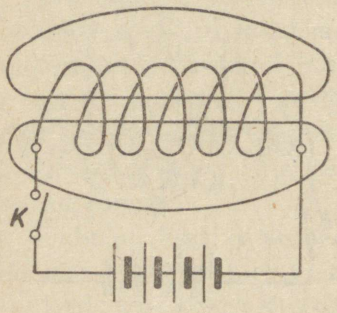
Kui vool esimeses mähises jääb teatava aja vältel muutmatuks, siis ka magnetilised jõujooned asetsevad selle aja vältel liikumatult; sealjuures me ei avasta teises mähises mingit voolu. Märgime veelkord, et indutseeritud vool tekib ainult lüliti sisse- ja väljalülitamise momendil.

Teise mähisega ühendatud mõõteriist lüliti sisse- ja väljalülitamisel annab väljalöögi isesuguses suunas; see vihjab sellele, et indutseeritud voolud lülitamisel ja katkestamisel on suunatud vastupidiselt, mida võikski oletada, kuna nende suund allub Lenz'i reeglile.

Vastastikuse induktsiooni nähe voolu lülitamisel ja katkestamisel on kasutusel nn. Ruhmkorff'i induktoris, mille põhimõtteline lülitusskeem millegagi ei erine joon. 45 toodud skeemist. Kui sealjuures teine mähis omab suurt keerdude arvu ning voolu sissse- ja väljalülitamine esimeses mähises toimub väga ruttu, siis vastastikuse induktsiooni elektromotoorne jõud võib saavutada kümned ja isegi sajad tuhanded voldid. Ruhmkorff'i induktorid on tarvitusel füüsika-laboratooriumides elektrisädemete demonstreerimiseks ja mitmesuguste, kõrget pinget ja väikest võimsust vajavate katsete jaoks.

Väga huvitavaks ja elektrotehnikas ühtlasi väga oluliseks on *omainduktsiooni nähe*, s. t. *indutseeritud elektromotoorse jõu tekkimine sellessamas vooluringis, milles toimub voolu lülitamine ja katkestamine*.

Eriti teravalt esineb omainduktsiooni nähe suure keerdude arvuga mähises ja eriti siis, kui mähis on keritud raudsüdamikule. Antud juhul omainduktsiooni elektromotoorne jõud tekib voolu lülitamisel ja katkestamisel selle tõttu, et tekkiva ja kaduva magnetvälja jõujooned lõikavad sellesama mähise keerdusid, milles voolab vool (joon. 46). Lenz'i reegli kohaselt omainduktsiooni elektromotoorne jõud sisselülitamise momendil on suunatud kasvavale voolule vastu ja püüab takistada tema kasvamist; voolu vähenemisel on ta suunatud samas suunas nagu vähenev voolgi s. t. püüab takistada tema vähenemist.



Joon. 46.

Tulemusena, voolu sisselülitamisel suure keerdude arvuga mähisesse, vool ei saavuta oma normaalväärtust mitte momentaanselt, vaid kasvab aegamööda, samuti ka voolu väljalülitamisel vool väheneb aegamööda; kuna aga

lüliti katkestab vooluringi silmapilkselt, siis, püüdes alal hoida vähenevat voolu, omainduktsiooni elektromotoorne jõud tekitab elektrivooluringi katkestamise kohas sädet. Niisugused omainduktsiooni elektromotoorse jõu poolt tekitatud sädemed esinevad vinnak-lülitite lahutamisel ja rikuvad viimaseid, sulatades nende kontakte.

Arvestades omainduktsiooni elektromotoorse jõu kahjulikku mõju voolu katkestavale aparatuurile, tuleb ettevaatlikult katkestada mähiseid sisaldavaid vooluringe, kusjuures on tarvitusel terve rida abinõusid võitluseks pikaajalise sädeme tekkimise vastu. Üheks selliseks abinõuks on kogu lüliti paigutamine õlipaaki; sel juhul õlis tekkiv säde kustub ruttu, kahjustamata lülitit.

21. Elektromagnetilise induktsiooni seaduse üldkuju.

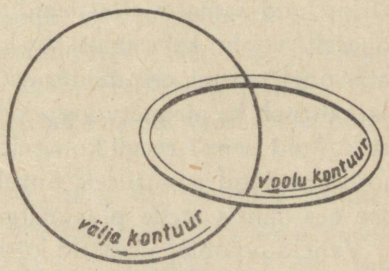
Nagu eelmisest juba teada, on indutseeritud elektromotoorse jõu suuruse määramiseks Faraday poolt esitatud järgmine valem:

$$E = \frac{\Phi}{t} 10^{-8} \text{ (volti)}.$$

Sellest valemist nähtub, et indutseeritud elektromotoorne jõud on võrdeline igas sekundis juhtme poolt lõigatud jõujoonte arvuga.

Vähe hiljem pärast Faraday'd, inglise õpetlane Maxwell, tuginedes magnetiliste jõujoonte ja elektrivoolu mõningatele omadustele, soovitas sama seaduse teistsugust formuleeringut, mis on enamatel juhtudel käepärasem, kuna ta võimaldab arvutustes kasutada kõrgema matemaatika meetodeid.

Maxwelli lähtepunktiks valitud magnetvälja ja elektrivoolu põhiomadused seisnevad selles, et magnetilised jõujooned on alati kinnised ja samuti peab olema kinnine ka elektriline vooluring. Järelikult, elektrilist vooluringi ja mingisugust magnetilist jõujoont võib endale kujutada kahe üksteisest läbipistetud ketilülina (joon. 47). On selge, et sellisel juhtme ja magnetiliste jõujoonte vastastikusel asetsemisel on võimatu voolukontuurist eemaldada magnetilist jõujoont, ilma et tekiks nende vastastikku-lõikumine; ning ümberpöördult, kui me oleme juhet lõiganud jõujoonega, siis olenevalt liikumise suunast, me kas suurendame voolukontuuri läbivate jõujoonte arvu, või vähendame seda.



Joon. 47.

Niivõrd, kui seega jõujoonte lõikumine juhtmega on samaväärne juhtme kontuuri läbivate jõujoonte arvu muutumisega, võib elektromagnetilise induktsiooni seaduse formuleeringut muuta järgmiseks:

Indutseeritud elektromotoorne jõud tekib igakord, kui muutub juhtme kontuuri läbistavate jõujoonte arv. Suuruselt indutseeritud elektromotoorne jõud on võrdeline kontuuri läbistavate jõujoonte üldhulga muutumise kiirusega või võrdeline kontuuri läbistava magnetvoo muutumise kiirusega.

Nagu teada mehaanikast, määratakse mingi liikumise kiirust teekonna esimese tuletisega aja suhtes:

$$v = \frac{ds}{dt}.$$

Seepärast magnetvoo muutmise kiirust võib väljendada magnetvoo esimese tuletisega aja suhtes:

$$\frac{d\Phi}{dt}.$$

Siis saame indutseeritud elektromotoorse jõu valemi tema kõige üldisemal kujul:

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} 10^{-8} \text{ (volti)}. \qquad (20)$$

Miinusmärk selles valemis tuletise ette asetatakse juhuks, kui me peale elektromotoorse jõu suuruse soovime teada ka tema suunda. Seda võib selgitada järgmiselt.

Kui mähises voolav voolutugevus kasvab, siis suureneb ka selle voolu poolt tekitatud magnetvoog.

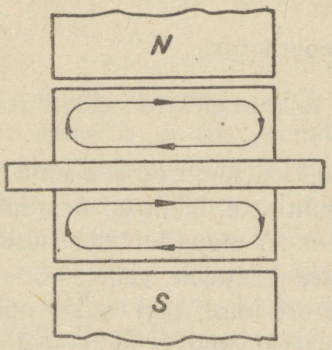
Matemaatikast on teada, et kasvava funktsiooni tuletis omab positiivset märki; kuid samal ajal omainduktsiooni elektromotoorne jõud Lenz'i reegli kohaselt voolu kasvamisel on suunatud temale vastupidiselt; et seda näidata, ongi valemi ees miinusmärk. Vastupidiselt: kui voolutugevus kahaneb, siis kahaneb ka magnetvoog; kahaneva funktsiooni tuletis omab negatiivset märki, kuid Lenz'i reegli kohaselt voolu kahanemisel omainduktsiooni elektromotoorne jõud suunaliselt ühtub voolu suunaga; siis miinus negatiivse suuruse ees annab meile plussmärgi, mida oligi tarvis saavutada teisel juhul.

Vahelduvvooluga seotud küsimuste vaatlemisel praegused arutlused osutuvad meile väga väärtuslikeks.

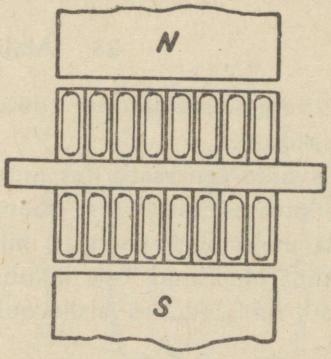
22. Pöörisvoolud.

Mitmesugustes elektririistades, eriti aga elektrimasinates esinevad väga sageli juhud, et nimetamisväärsed metallmassid asuvad vahelduvas magnetvoos. Siis, Maxwelli formuleeringu kohaselt, on olemas indutseeritud elektromotoorse jõu tekkimiseks vajalikud tingimused; juhtme kontuuri

läbistav magnetvoog nimelt muutub suuruselt. Kuna siin meil on tegemist nimetamisväärsetes mõõtudes metallitükiga, siis viimases võib alati mõtteliselt eraldada kinnist voolujuhtivat kontuuri, milles indutseeritud elektromotoorse jõu mõjul hakkab voolama vool. Selline vool omab pöörise ise-



Joon. 48.



Joon. 49.

loomu ning tema suuna võib kergesti määrata Lenz'i reegli abil; kuid selle voolu tugevust ja temaga seotud juhi soojenemist võib teoreetiliselt arvutada ainult enam või vähem lihtsakujulistes metallitükkides (silinder, täisnurkne keha jne.). Sääraseid magnetvoo muutumisega indutseeritud pöörisetaolisi voolusid metallitükkides nimetatakse pöörisvooludeks — ka Foucault (loe: fukoo) vooludeks — (joon. 48).

Nagu igasugused voolud, nii ka needki pöörisvoolud põhjustavad soojenemist kehades, milledes nad voolavad; järelikult tuleb neid lugeda kahjulikeks vooludeks neis aparaatides, milledes soojuse eraldamine osutub kõrvaliseks või koguni kahjulikuks nähteks. Seepärast enamal juhul tuleb pöörisvooludega pidada võitlust.

Indutseeritud elektromotoorse jõu hävitamine on muidugi võimatu, kuid kui kogu metallimass jaotada pöörisvooludele perpendikulaarses suunas üksikuteks üksteisest isoleeritud lehtedeks — plekkideks, siis me saame üksikutes plekkides tunduvalt nõrgendatud pöörisvoolusid, sest pöörisvoolud ei saa enam tekkida kogu metallimassis (vt. joon. 49). Sellist viisi kasutatakse kõikides elektrimasinates ja aparaatides, kus suuremad metallimassid asuvad vahelduva magnetvoo mõju all.

Kõik need arutlused on kehtivad igasugustele metallimassidele, kuid kõige suuremad pöörisvoolud esinevad rauamassides, kuna sinna koonduvad tänu suurele magnetilisele juhtivusele tugevad magnetvood. Katselised

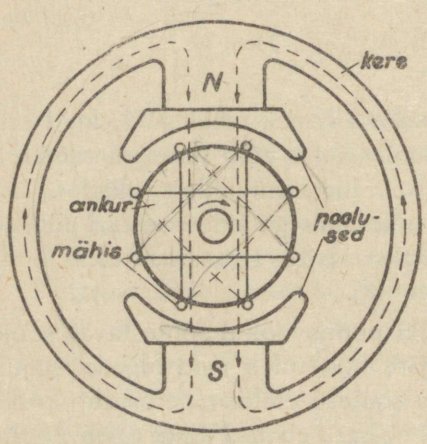
uurimused on näidanud, et räni lisandamine rauale tunduvalt suurendab tema oomilist takistust, mis omakorda vähendab pöörisvoolusid.

Pöörisvoolude vältimiseks magnetilised vooluringid tehakse seepärast üksikutest räni sisaldusega raudplekkidest, paksusega 0,3—0,5 mm, mis on üksteisest isoleeritud õhukese siidpaberiga, laki- või oksüüdikihiga.

23. Alalisvoolu-generaator.

Alalisvoolu-generaatorite töötamine on rajatud elektromagnetilise induktsiooni seadusele.

Alalisvoolu-generaatorites indutseeruvad elektromotoorsed jõud magnetväljas liikuvates juhtmetes. Generaatori juhtmete liikumapanemiseks tuleb kulutada mehaanilist energiat, millest suurem osa muundub elektriliseks energiaks, kuna ülejäänud osa kulub kahjulikele kadudele generaatoris eneses. Joon. 50 on näidatud alalisvoolu-generaatori lõige risti tema pöörlemise teljega, kusjuures mõningad detailid on siin meelega välja jäetud, et võimalikult selgesti näidata elektromotoorse jõu tekkimise protsessi liikuvates juhtmetes. Nagu nähtub toodud joonisest, sisaldab alalisvoolu-generaator järgmisi põhiosi: malmist või terasest kere magnetvoo juhtimiseks pooluselt pooluse juurde ja ühtlasi pooluste hoidmiseks; poolused ise on varustatud poolusekingadega, et suurendada pindala, mida läbistab magnetvoog õhupiludes; ja lõpuks, mähisega varustatud ankur, mis kujutab endast joonisele perpendikulaarselt asuva telje ümber pöörlevat raudsilindrit.



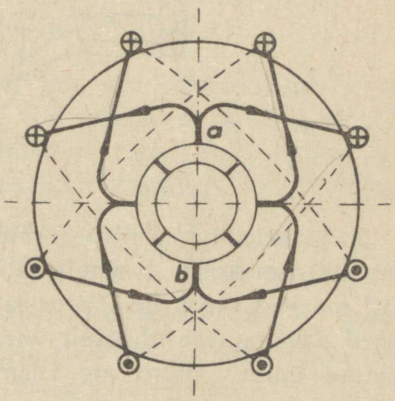
Joon. 50.

Ankru pöörlemisel tema mähise juhtmed lõikavad poolustekingadest väljuvaid magnetilisi jõujooni; selle tagajärjel indutseerub ankru mähises elektromotoorne jõud.

Kasutades parema käe reeglit, määrame joonisel 50 toodud ankrumähises indutseeritud elektromotoorse jõu suuna, arvesse võttes et ankur pöörleb kellaosuti liikumise suunas. Rakendades parema käe reeglit joonisele 50, veendume, et vaadeldaval momendil põhjapooluse all liikuvates juhtmetes elektromotoorne jõud on suunatud meilt joonise suunas, kuid lõunapooluse all liikuvates juhtmetes — jooniselt meie suunas. Need suunad on

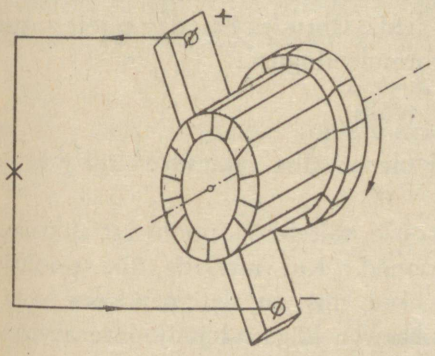
märgitud joonisele 51, kus sama ankur on kujutatud suuremas mõõdus. Mähise igas juhtmes muudab elektromotoorne jõud ühe pöörde vältel sel viisil oma suunda; kui juhe otseselt ühendada välisvõrguga, näiteks ühe lambiga, siis viimases voolaks kogu aeg oma suunda muutev ehk nõndanimetatud vahelduvvool. Selleks, et selliselt generaatorilt saada alalise suunaga voolu, tuleb teda varustada erilise ümberlülitamis-seadisega, mida nimetatakse kollektoriks.

Joonisel 51 on näidatud ankrumähis ühes tema külge ühendatud kollektoriga. Kollektor kujutab endast trumlit, mis koosneb üksikutest, üksteisest vilgukiviga isoleeritud vasklamellidest — plaatidest. Nagu nähtub skeemist, iga kollektori lamell on ühendatud ankrumähise kahe juhtmega. Kollektor ise asub ankruga ühisel võllil ja pöörleb koos viimasega.



Joon. 51.

Vaadeldes ankru elektromotoorse jõu suunda joonisel 51, veendume, et ankru pöörlemisel on tema mähisel kaks erilist punkti *a* ja *b*, kusjuures ankru pöörlemisel need punktid jäävad liikumatuks. Punktis *a* mähises indutseeritud elektromotoorsed jõud suunduvad laiali, kuna punktis *b* nad koonduvad ühte. Kui kollektori pinnale punktide *a* ja *b* kohale asetada kaks söeplaati, mida nimetatakse harjadeks, ja nende vahele väljaspool generaatorit ühendada elektripirn, siis viimases voolab vool punktist *b* punkti *a* poole, s. t. alumiselt harjalt ülemise harja poole. Ankrumähise sisemuses voolab aga vool ülemiselt harjalt alumise harja poole kahes harus, nagu see on näidatud nooltega joonisel 51.

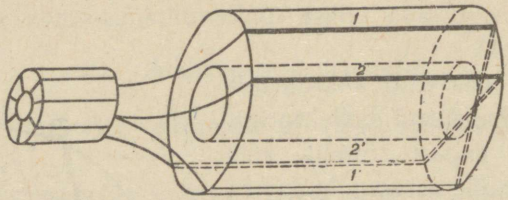


Joon. 52.

Kollektori pilt ühes harjadega (eraldatult ankrust) on näidatud joonisel 52. Tänu sellele, et ankru pöörlemisel paigalseisvate harjade alla kogu aeg tulevad need kollektori lamellid, milledest ühes ankrumähise voolud jooksevad kokku ning teises — laiali, saame välisvooluringis voolu alalise suunaga.

Ankrumähise juhtmed jaotatakse ankru pinnale ja kindlama paigutamise mõttes asetatakse uuretesse raudhammaste vahele.

Selleks et üksikutes juhtmetes indutseeritud elektromotoorsed jõud omavahel liituksid, tuleb paigutada juhtmed kordamööda põhjapooluse ja lõunapooluse alla, nagu näidatud joonistel 50 ja 51. Joonisel 53 on kujutatud ankur koos mõningate, kollektori lamellidega ühendatud juhtmetega.



Joon. 53.

Senivaadeldud mähiste puhul oli tegemist generaatoriga, mille magnetiline süsteem koosneb ainult kahest poolusest; praktikas kasutatavad masinad omavad sageli neli, kuus ja veelgi rohkem pooluseid. Sealjuures poolused paigutatakse ühtlaselt ümber ankru ja nende polariteet vaheldub, s. t. minnes ümber ankru me leiame põhjapooluse, siis lõunapooluse, siis jälle põhjapooluse jne.

Mitmepooluselistele generaatoritele, olenevalt ankrumähise ehitusviisist, peame asetama kas kaks harja või nii mitu harja, kui mitu poolust on generaatoril.

Mitme harjaga generaatoritel harjad kollektori pinnal vahelduvad: positiivne, negatiivne, positiivne, negatiivne ja nii edasi. Kõik positiivsed harjad ühendatakse kokku, samuti ka negatiivsed; tulemusena väljub mitme harjaga generaatorist ainult kaks juhet, nagu ka kaheharjalisest.

Mitmepooluselise generaatori elektromotoorse jõu arvutamiseks peab olema terve rida andmeid, sealhulgas ka andmed tema mähise kohta.

Selle elektromotoorse jõu suuruse võib leida, lähtudes Faraday poolt antud elektromagnetilise induktsiooni seaduse formuleeringust:

$$E = \frac{\Phi}{t}\ 10^{-8}\ \text{(volti)},$$

s. t., indutseeritud elektromotoorne jõud oleneb ühe sekundi vältel juhtme poolt lõigatud jõujoonte arvust.

Ankrule paigutatud juhe lõikab ühe pöörde vältel kõik poolusest ankrusse väljuvad ja sinna tagasi minevad jõujooned. Kui märkida ühe pooluse magnetvoogu tähega Φ ning pooluste arvu, mis on alati paarisarv — tähega $2p$, siis ankru ühe pöörde vältel juhtmega lõigatud jõujoonte arv on

$$2 \cdot p \cdot \Phi.$$

Kui ankur teeb n pööret minutis ehk $\frac{n}{60}$ pööret sekundis, siis ühe sekundi vältel ühe juhtme poolt lõigatud jõujoonte arv oleks:

$$2 \cdot p \cdot \Phi \cdot \frac{n}{60},$$

ankrumähise ühes juhtmes indutseeritud keskmine elektromotoorne jõud aga oleks:

$$E = 2 \cdot p \cdot \Phi \cdot \frac{n}{60} \cdot 10^{-8} \text{ (volti)}.$$

Meid aga huvitab elektromotoorne jõud, mis on indutseeritud kogu mähises, mis koosneb, oletame, z juhtmest. Kui sealjuures kõik juhtmed oleksid ühendatud järjestikku, siis saadud tulemust tuleks korrutada z-ga. Kuid kunagi ei ühendata kõiki juhtmeid järjestikku; äärmisel juhul mähis jaguneb kahte paralleelharru — siis järjestikku ühendatud juhtmete arv on $\frac{z}{2}$.

Paralleelharude arv on alati paarisarv (2, 4, 6, 8 jne.); seda märgitakse tavaliselt tähega 2a. Siis järjestikku ühendatud juhtmete arv on $\frac{z}{2a}$. Selle arvuga tulebki korrutada ühe juhtme keskmist elektromotoorset jõudu, et saada meid huvitavat kogu generaatori elektromotoorset jõudu:

$$E = 2 \cdot p \cdot \Phi \cdot \frac{n}{60} \cdot \frac{z}{2a} \cdot 10^{-8} \text{ (volti)}.$$

Koondades arvu 2, saame lõpliku valemi:

$$E = \Phi \cdot \frac{pn}{60} \cdot \frac{z}{a} \cdot 10^{-8} \text{ (volti)}. \qquad (21)$$

Me näeme, et generaatori elektromotoorne jõud on võrdeline magnetvooga ja ankru pöörete arvuga, millest oleneb juhtmete liikumise kiirus.

Märkides kõik teised püsivad tegurid tähega K ning võttes viimast võrdelisuse koefitsiendiks, saame kaunis tähtsa valemi:

$$E = K \cdot n \cdot \Phi, \qquad (22)$$

kus K — antud masina konstruktsioonist olenev võrdelisuse koefitsient, n — ankru pöörete arv ja Φ — magnetvoog.

24. Generaatorite ergutus.

Me näeme, et generaatori elektromotoorset jõudu võib muuta ankru pöörete arvu või magnetvoo muutmisega, ilma generaatori konstruktsiooni muutmata. Esimesel pilgul võib näida, et generaatori magnetvoogu ei saa

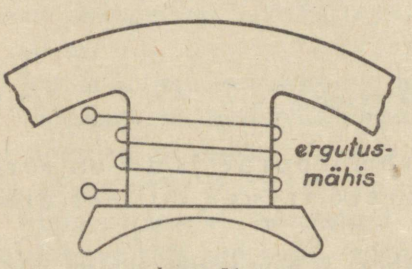
muuta; kuid just nüüd asume küsimuse juurde, kuidas tekitatakse magnetvoogu, ja veendume, et selle muutmine teatud piirides on saavutatav päris lihtsate abinõudega.

Magnetvoo tekitamiseks elektrigeneraatorid mõnikord varustatakse püsivate terasmagnetitega. Niisugused magnet-elektrilised generaatorid on kasutusel nõrkvoolutehnikas nõndanimetatud induktorite näol. Induktoreid leidub näiteks kohaliku patareiga telefoniapraatides kutsesignaali saatmiseks keskjaama. Kuid tugevvolutehnikas püsivate terasmagnetitega generaatoreid pole kasutusel, kuna nad omavad kahte väga olulist puudust: esiteks on nad liiga suurte mõõdetega, teiseks nad ei võimalda magnetvoo lihtsat reguleerimist.

Seepärast tugevvoolutehnikas kõik generaatorid on varustatud elektromagnetitega, milledel mõlemad mainitud puudused esinevad ainult vähesel määral.

Magnetvoo tekitamiseks alalisvoolu-generatoorites paigutatakse nende poolustele eriline mähis, mida toidetakse ühel või teisel viisil elektrivooluga. Joonisel 50 on näha, et masina kere ja poolustekingade vahel on kitsam koht, mis ongi ette nähtud nimetatud mähise paigutamiseks.

Magnetvoo tekitamise protsessi generaatoris nimetatakse ergutamiseks, ning seepärast poolustele paigutatud mähist nimetatakse ergutusmähiseks.



Joon. 54.

Joonisel 54 on kujutatud üks generaatori poolustest ühes temale paigutatud ergutusmähisega. Üksikutele poolustele paigutatud poolid on generaatorites tavaliselt ühendatud omavahel järjestikku, moodustades seega terve mähise.

Generaatori ergutusmähise vooluga toitmiseks võiks kasutada mõnd alalisvoolu allikat, näiteks akumulaatorpatareisid. Esimesel pilgul tunduks, et generaatori toitmine akumulaatorpatareiga poleks kasulik, kuna lihtsam oleks akumulaatorpatareid otseselt kasutada valgustuse otstarbeks. Kuid generaatori ergutamisele kulutatav võimsus moodustab kõigest umbes 3% generaatori poolt toodetavast võimsusest, ning sellepärast, kasutades väikest patareid generaatori ergutamiseks, me saame temalt palju suuremat võimsust.

Erilise ergutusvoolu allikaga generaatorit nimetatakse võõrergutusega generaatoriks. Niisugused generaatorid esinevad võrdlemisi harva ja peamiselt võimsates seadmetes.

Asjaolu, et generaatori ergutamiseks vajalik võimsus moodustab ainult väikese osa tema koguvõimsusest, viis mõttele toita ergutusmähist samalt generaatorilt. Raskus esineb käivitamise algmomendil, kui pole veel magnetvoogu ja pooluste vahel pöörlev ankur ei lõika magnetilisi jõujooni. Kuid abiks tuleb siin jäävmagnetism, mis jääb järele pärast esmakordset magneetimist igas ferromagnetilises aines. Järelikult äsjavalmistatud generaatori väljalaskmisel tehasest tuleb tema poolused magneetida, mille tagajärjel nendes säilib pikemaks või lühemaks ajaks jäävmagnetismi, mis võimaldab generaatori ergutamist ilma välisvooluallikaid kasutamata.

Kui generaator omab teatavat, kas või nõrka jäävmagnetismi, siis selles nõrgas magnetväljas pöörlevas ankrumähises indutseerub suuruselt tähtsusetu elektromotoorne jõud, mis ometi on küllaldane selleks, et tekitada ergutusmähises teatavat voolu. See vool suurendab generaatori magnetvoogu, seetõttu aga kasvab ankrumähises indutseeruv elektromotoorne jõud. Suurem elektromotoorne jõud tekitab aga suuremat voolu ergutusmähises; järelikult veelgi rohkem kasvab magnetvoog ja veelgi suuremaks muutub ankrus indutseeruv elektromotoorne jõud. Kui seejuures generaatori magnetilisel süsteemil puuduks magneetimise piir, siis generaatori elektromotoorne jõud võiks kasvada lõpmatult suureks. Kuid raua küllastumine paneb elektromotoorse jõu kasvamisele piiri ning elektromotoorne jõud, kasvades väga ruttu teatava väärtuseni, jääb edaspidi püsivaks suuruseks.

On vajalik märkida, et praktikas piiratakse ergutuse kasvu tavaliselt mitte magnetilise süsteemi küllastumisega, vaid erilise, generaatori ergutusvooluringi lülitatud reostaadiga. Seda reostaati nimetatakse ergutuse regulaatoriks ehk pinge regulaatoriks; generaatori töötamise ajal ta võimaldab vajaduse piirides muuta tema elektromotoorset jõudu, muutes selleks pooluste magnetvoo suurust.

Praktikas siiski esinevad sageli juhud, kus alalisvoolu-generaator, vaatamata tema mähiste, harjade ja kollektori täielisele korrasolekule, ei ergutu, s. t. ankru normaalse pöörete arvu juures generaatoril puudub elektromotoorne jõud. Sel juhul tuleb kõigepealt muuta voolusuunda ergutusmähises, mida saavutatakse tema otste vahetamisega generaatori harjade suhtes; tõesti, võib ju juhtuda, et ergutusmähises voolav vool ei suurenda, vaid just vastupidi, vähendab jäävmagnetismi. Kui pärast ergutusmähise otste vahetamist generaator ikkagi ei ergutu, siis tuleb ergutusmähis lühikeseks ajaks ühendada võõra vooluallikaga, sest on silmanähtav, et jäävmagnetism on liiga nõrk generaatori endaergutuseks. Niisugust järelmagneetimist tuleb kõige sagedamini teostada generaatoritega, mis pole kaua aega töötanud või mida veetakse kohalt kohale ühes sealjuures vältimatute tõugete ja põrutustega.

Generaatoreid, mis ise toidavad oma ergutusmähist, nimetatakse endaergutusega generaatoriteks.

Sõltuvalt ergutusmähise ühendusviisist ankru harjadega, endaergutusega generaatorid jagunevad kolme tüüpi:

1) Peavoolu- (series-) generaatorid, milledel ergutusmähis on lülitatud järjestikku tarvitajaga; nendes generaatorites ergutusvoolu tugevus oleneb otseselt tarvitajast ning seetõttu generaatori elektromotoorne jõud muutub tugevasti. Praktikas peavoolu-generaatoreid ei tarvitata.

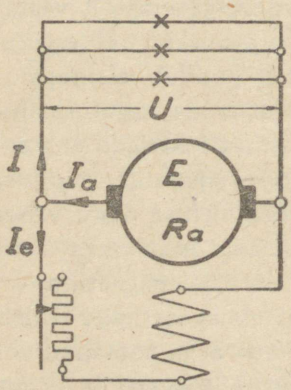
2) Haruvoolu- (šunt-) generaatorid. Ergutusmähis ühendatakse sõltumatult tarvitajast otse ankru harjadega. Nendes generaatorites ergutusvoolu tugevus oleneb tarvitajast ainult kaudselt ja väga vähesel määral ning seetõttu generaatori elektromotoorne jõud muutub mitte väga palju. Praktikas esinevad haruvoolu-generaatorid sagedamini kui teised.

3) Kompaund-generaatorid omavad kahte ergutusmähist: üks nendest lülitatakse nagu peavoolu-generaatoril, järjestikku, kuna teine, nagu haruvoolu-generaatoril — paralleelselt.

Kahe mähise ühisel mõjul jääb kompaund-generaatori klemmipinge ligikaudselt püsivaks sõltumatult koormuse muutumisest. Kompaund-generaatoreid esineb harvemini kui haruvoolu-generaatoreid, esimeste suurema konstruktiivse keerulisuse tõttu. Neid on kasutusel seadmetes, kus püsiva pinge alalhoidmine osutub tähtsaimaks ülesandeks.

25. Haruvoolu-generaator.

Kolmest endaergutusega generaatori tüübist peatume lähemalt ainult haruvoolu-, kui suurt tegelikku tähtsust omavatel generaatoritel. Vaatleme nende skeeme ja tutvume nende töötamise omadustega.



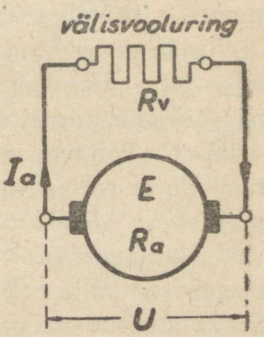
Joon. 55.

Joonisel 55 on näidatud haruvoolu-generaatori skeem ühes ergutusregulaatoriga ergutusvooluringis ja tarvitajaid kujutavate lampidega. Skeemis nooled näitavad, et ankruvool hargneb kahte ossa: osa voolust läheb välisahelasse; teine, väiksem osa, toidab ergutusregulaatori kaudu ergutusmähist. Vaatleme nüüd küsimust, millisel määral ja millistest põhjustest oleneb generaatori klemmipinge.

Antud peatüki teises punktis me tutvusime mõistega, et pinge moodustab selle osa vooluallika kogu elektromotoorsest jõust, mis on vajalik

antud takistuse ületamiseks. Seepärast võib haruvoolu-generaatori klemmipinget vaadelda ankrus indutseeruva elektromotoorse jõu osana, mis on vajalik välistakistuste (tarvitaja ja ergutusmähis) ületamiseks. Sealjuures ankru kogu elektromotoorne jõud kulutatakse kinnise vooluringi kogutakistuse (koosneb ankrumähisest ja välistakistusest) ületamiseks. Me näeme seetõttu, et generaatori klemmipinge on elektromotoorsest jõust alati väiksem pingelanguse võrra ankrumähises. Matemaatilise sõltuvuse koostamiseks vaatleme joonist 56.

Olgu E — ankru elektromotoorne jõud, U — klemmipinge, R_a — ankrumähise takistus, R_v — generaatori klemmidega ühendatud välistakistus (siia kuuluvad tarvitaja ja ergutusmähis ühes ergutusregulaatoriga), I_a — voolutugevus ankrus ja kogu välisvooluringis.



Joon. 56.

Kasutades Ohmi seadust kogu vooluringile, võime kirjutada:

$$I_a = \frac{E}{R_v + R_a};$$

või

$$E = I_a \cdot R_v + I_a \cdot R_a.$$

Korrutis $I_a \cdot R_v$ kujutab endast pingelangust välisvooluringis ehk, mis on sama, generaatori klemmipinget. Seepärast

$$E = U + I_a \cdot R_a;$$

ehk lõplikult saame generaatori klemmipinge jaoks järgmise avalduse:

$$U = E - I_a \cdot R_a. \qquad (23)$$

Viimane valem näitab, et generaatori koormuse muutumisel, s. t. voolu I_a tugevuse muutumisel, generaatori pinge ka muutub, kuigi mitte väga tugevasti, tänu sellele, et ankrumähise takistus on väike — mõned kümnendikud ja koguni sajandikud oomi. Selle valemi järgi määratav generaatori klemmipinge langeks ühte katseliste andmetega, kui generaatori elektromotoorne jõud jääks püsivaks. Kuid selle küsimuse lähem uurimine näitab, et koormuse suurenemisel väheneb generaatori elektromotoorne jõud. Selle tõttu generaatori klemmipinge tegelikult väheneb kiiremini, kui see toimuks viimase valemi järgi.

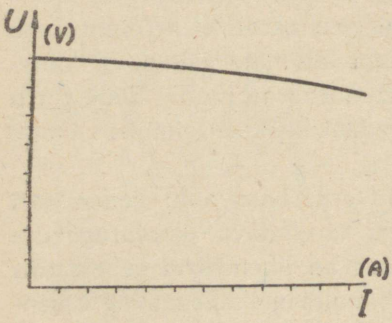
Võiks märkida kahte põhjust, mis kutsuvad esile haruvoolu generaatori elektromotoorse jõu vähenemist generaatorilt tarvitatava voolutugevuse suurenemisel. Magnetvoogu tekitav ergutusmähis on ühendatud generaatori klemmidega; pingelangusega ankrus seotud klemmipinge vähenemine vähendab generaatori ergutust, mille tagajärjel väheneb ankrus indutseeritud

elektromotoorne jõud. See asjaolu määrab haruvoolu-generaatori eri omaduse, mis seisneb selles, et kui generaatori klemmid tema töötamise ajal otsesidestada, siis ergutusmähisesse hargneva voolu tugevus langeb nullini ja otseside-voolutugevus generaatori lahtimagneetimise tagajärjel osutub mitte suureks, kuna sellises olukorras elektromotoorse jõu indutseerimine toimub ainult jäävmagnetismi mõjul. Niisiis, haruvoolu-generaatorile on täiesti ohutud järsud otsesidestamised, ning pärast otseside kõrvaldamist ta ergutub uuesti ja töötab normaalselt.

Teine generaatori elektromotoorse jõu vähenemist tekitav põhjus seisneb selles, et ankrumähist läbiv tarvitaja vool tekitab iseseisvat magnetvoogu, mis on suunatud risti ergutuse magnetvooga, moonutab ja osalt vähendab viimast. Põhimagnetvoo moonutamine mõjub kahjulikult generaatori töötamisele ja selle moonutamise vähendamiseks tarvitatakse lisapooluseid ankru magnetvoo kohalikuks kompenseerimiseks; põhimagnetvoo vähenemine aga vähendab generaatori elektromotoorset jõudu koormuse suurenemisel. Ankru magnetvoo mõju põhimagnetvoole nimetatakse *ankrureaktsiooniks*. Seega muutub haruvoolu-generaatori klemmipinge koormuse mõjul kolmel põhjusel: 1) pingelangus ankru vooluringi takistuses, 2) ergutusmähise toitmise viisiga seotud ergutusvoolu vähenemine ja 3) ankrureaktsioon.

Katseliselt mõõdetavat generaatori klemmipinge muutumist mingisuguse matemaatilise sõltuvusega kindlaks määrata ei saa. Seda muutumist, mis on iseloomustav antud generaatorile, kujutatakse graafiliselt teatava kõveraga. Niisugust graafiliselt kujutatud generaatori klemmipinge olenevust ankru voolutugevusest nimetatakse *generaatori väliskarakteristikuks*.

Ligikaudselt võib väliskarakteristikut ehitada rea teoreetiliste arutluste alusel; kuid päris täpset karakteristikut saadakse ainult antud generaatori katsetamisega. Väliskarakteristiku kõvera katseline võtmine toimub ankru püsiva pöörete arvu ja ergutusregulaatori vända püsiva asendi korral. Olenevuse määramiseks generaatori klemmipinge ja ankru voolutugevuse vahel piisab siis kahest mõõteriistast, millede hälbed tuleb üles märkida, aegamööda suurendades generaatoriga ühendatud lampide arvu.



Joon. 57.

Väliskarakteristiku kõvera ehitamiseks kasutatakse kahte koordinaattelge, kusjuures ordinaatide teljele kantakse teatavas mõõtvahekorras generaatori klemmipinge ning abstsisside teljele kantakse eri mõõtvahekorras ankru voolutugevus.

Sellisel teel ehitatud haruvoolu-generaatori väliskarakteristik on kujutatud joonisel 57.

Kujutatud kõver selgitab väga näitlikult, et ankru voolutugevuse suurenedes generaatori klemmipinge aegamööda väheneb. Ankru voolutugevuse muutumisel minimaalsest kuni antud generaatorile maksimaalse väärtuseni, ehk nagu öeldakse, tühijooksult kuni täiskoormuseni, generaatori klemmipinge langeb, sõltuvalt generaatori võimsusest, 15 — 20% võrra. Suurematel generaatoritel on pinge kõikumine üldiselt väiksem kui väikestel.

Selleks et generaatori klemmipinge tema töötamisel jääks muutumatuks — mis on tingimata vajalik generaatori töötamisel valgustuskoormusele, — tuleb võtta tarvitusele ergutusregulaator, suurendades voolutugevust ergutusmähises vastavalt koormuse suurenemisele. Koormuse järskudel võnkumistel aga ergutusregulaatorit teenindav montöör ei suuda järgneda võnkumistele ja hoida generaatori pinget püsivana; sel juhul osutub kohaseks kompaund-generaator, mis koormuse muutumisel reguleerib end ise.

Näide 18. Määrata haruvoolu-generaatori ankru elektromotoorne jõud järgmistel andmetel: generaatori klemmipinge $U = 120$ V, ergutuse voolutugevus $I_e = 4$ A, tarvitaja voolutugevus $I = 100$ A, ankru takistus $R_a = 0{,}1\ \Omega$.

Kasutades esimest Kirchhoffi seadust võime väita, et ankru voolutugevus on võrdne tarvitaja ja ergutuse voolutugevuste summaga:

$$I_a = I + I_e = 100 + 4 = 104 \text{ A}.$$

Kasutades valemit generaatori klemmipinge määramiseks

$$U = E - I_a \cdot R_a, \text{ saame}$$

$$E = U + I_a \cdot R_a = 120 + 104 \cdot 0{,}1 = 130{,}4 \text{ V}.$$

Sel teel saame, et generaatori ankru elektromotoorne jõud võrdub 130,4 V.

Näide 19. Määrata generaatori klemmipinge järgmistel andmetel: ankru elektromotoorne jõud $E = 130{,}4$ V, ankru takistus $R_a = 0{,}1\ \Omega$, tarvitaja takistus $R = 1{,}2\ \Omega$, ergutusmähise ja ergutusregulaatori takistus $R_e = 30\ \Omega$.

Niivõrd kui haruvoolu-generaatori skeemis tarvitaja ja ergutuse vooluring on omavahel ühendatud paralleelselt, tuleb välisvooluringi kogutakistust arvutada paralleelselt lülitatud takistuste liitmise reegli järgi:

$$\frac{1}{\Sigma R} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R_e},$$

kust saame

$$\Sigma R = \frac{R \cdot R_e}{R + R_e} = \frac{1{,}2 \cdot 30}{1{,}2 + 30} = 1{,}15\ \Omega.$$

Välistakistus ΣR on ühendatud ankruga järjestikku; seepärast, kasutades Ohmi seadust ja liites välistakistuse ankru takistusega, saame:

$$I_a = \frac{E}{\Sigma R + R_a} = \frac{130{,}4}{1{,}15 + 0{,}1} = 104\ \text{A}.$$

Kasutades valemit generaatori klemmipinge määramiseks, saame otsitava vastuse:

$$U = E - I_a \cdot R_a = 130{,}4 - 104 \cdot 0{,}1 = 120\ \text{V}.$$

VI peatükk.

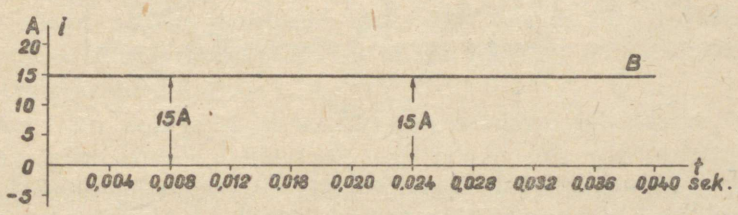
VAHELDUVVOOLU SAAMINE.

26. Põhimõisted.

Vahelduvaks elektrivooluks nimetatakse niisugust voolu, mille suurus ja suund aja vältel muutuvad.

Joonistel 58 — 60 on graafiliselt näidatud mitmesuguste voolude kujutused: horisontaalteljele on kantud aeg sekundi osades, kuna vertikaalteljele — mitmesugustele ajamomentidele vastavad voolud amprites (nõndanimetatud voolude momentväärtused).

Sirglõik B (joon. 58) näitab alalisvoolu graafilist kujutust. Kogu sirg-

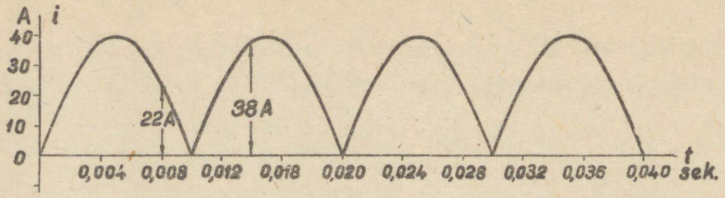


Joon. 58.

lõik asetseb pealpool horisontaaltelge (ja paralleelselt viimasega), s. t. vool on kogu aeg positiivne ja omab igal ajamomendil muutumatut väärtust 15A (kõik momentväärtused on ühesuurused ja võrdsed 15 A-ga).

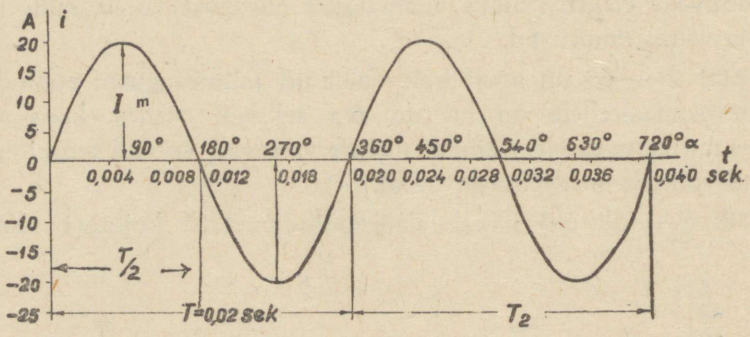
Joonisel 59 on esitatud nõndanimetatud pulseerivvoolu graafiline kujutus; see on niisugune vool, mis muutub ainult suuruselt, kuid säilitab alalist suunda; nii momendil $t = 0{,}008$ sek. vool omab suurust $i = 22$ A, kuna momendil $t = 0{,}014$ sek. — $i = 38$ A.

Joonisel 60 on näidatud vahelduvvoolu graafiline kujutus; siin toimub muutumine mitte ainult suuruselt, vaid ka suunalt.



Joon. 59.

Tõepoolest, mõningatel ajamomentidel vool on positiivne, s. t. voolab ühes suunas, näiteks teatud juhtmes generaatorilt tarvitajale, kuna teistel momentidel ta on negatiivne, s. t. voolab eelmisele vastupidises suunas, näiteks samas juhtmes tarvitajalt generaatorile.



Joon. 60.

Kõikidest võimalikest vahelduvvooludest on tehnikas kasutusel niisugused voolud, millede muutumine toimub kindla seaduspärasuse kohaselt, kusjuures nii vool kui ka pinge kordavad oma muutumusi ühesuguste ajavahemikkude järgi. Niisuguseid voolusid (ja pingeid) nimetatakse perioodilisteks, kuna ajavahemikku, mille vältel vool või pinge teostab ühekordselt kõik oma muutumised ja mille lõppemisel ta alustab neid samas järjekorras, nimetatakse perioodiks. Periood märgitakse tähega T ja mõõdetakse sekundites. Järelikult joonisel 60 graafiliselt kujutatud vahelduvvoolu periood $T = 0{,}02$ sekundit.

Voolu (või mingi teise muutliku suuruse, näiteks pinge) perioodide arvu ühes sekundis nimetatakse sageduseks. Järelikult joonisel 60 kujutatud

vahelduvvoolul, mille periood $T = 0{,}02$ sekundit, sagedus (mida tähistatakse tähega f) oleks:

$$f = \frac{1}{0{,}02} = 50 \text{ perioodi sekundis,}$$

ning üldiselt igasugusele voolule

$$f = \frac{1}{T},$$

see tähendab, sagedus on perioodiga pöördvõrdeline suurus. Sageduse ühikut nimetatakse herz'iks (Hz).

Üks herz on selline sagedus, kus ühes sekundis esineb üks periood. Igasugusele vahelduvvoolule on sagedus väga iseloomustavaks suuruseks ja ta omab tehnikas suurt tähtsust.

Tõepoolest, oletame, et vahelduvvool muutub nii, nagu näidatud joonisel 60, kuid väga väikese sagedusega $f = 1$ Hz, s. t. et ühes sekundis ta omab üht perioodi. Toitku säärane vahelduvvool hõõglampidest koosnevat valgustusseadet; siis enama aja vältel voolutugevuse väärtus on lähedane nullile, s. t. on nii väike, et ei suuda küllaldaselt soojendada hõõgniite ja nendeks ajavahemikkudeks lambid kustuvad; järgmistel momentidel aga, kui vool omab nimetamisväärseid suurusi (kuni $\pm$ 30 A), lambid hõõguvad heledalt; lambid seega vilguvad kogu aja. Niisugune valgustus on silmadele äärmiselt väsitav ja sellega on väga raske töötada. Seepärast on soovitav, et valgustus-seadmeid toitva vahelduvvoolu sagedus oleks suur; siis ajavahemikud, milledel vool omab väikest suurust, osutuvad sedavõrd lühikesteks, et lampide hõõgniidid ei jõua jahtuda ja vilkumine muutub märkamatuks. Järelikult hõõglampide jaoks on soovitav suurem sagedus, kuid teiste voolutarvitajate, näiteks mootorite jaoks sagedus ei tohiks olla liiga suur, kuna sageduse suurenemisel suurenevad ka mootori võimsuskaod ja järelikult ka tema kasutegur.

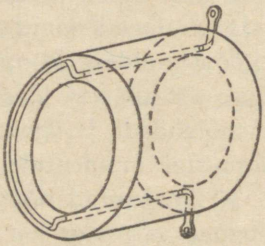
Seepärast on vajalik, et generaatoritelt saadava vahelduvvoolu sagedus omaks niisugust keskmist väärtust, mis rahuldavalt sobiks kõigile elektri tarvitajaile. Niisuguseks, NSV Liidus üldiselt ja ka suuremas osas Euroopa riikides kasutatavaks sageduseks on standardsagedus $f = 50$ Hz. Ameerika Ühendriikides on kasutusel 50-perioodilise sageduse kõrval ka sagedus 60 Hz; neil juhtudel aga, kui jõujaam on ette nähtud erivoolutarvitajate, näiteks vahelduvvooluga töötavate elektriraudteede toitmiseks, alandatakse sagedust õige tunduvalt, näiteks kuni 25 ja $16^2/_3$ perioodini.

Mitte ainult sagedus, vaid ka voolu (või pinge) muutumise kõvera kuju võib olla väga mitmesugune ja omab tehnikas suurt tähtsust.

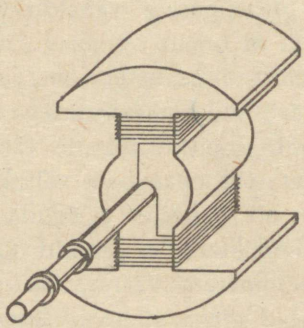
Käesolevas raamatus vaadeldakse ainult nn. sinusoidaalset voolu, s. o. niisugust voolu (või pinget), mille muutumise kõver kujutab endast sinusoidi (joon. 60).

27. Sinusoidaalse elektromotoorse jõu saamine.

Vahelduvat elektromotoorset jõudu saadakse, nagu alalist elektromotoorset jõudugi elektromagnetilise induktsiooni põhimõttel töötavates generaatorites, s. t. juhtmete lõikamise teel magnetiliste jõujoontega. Erinevalt alalisvoolu-generaatoritest on vahelduvvoolu-generaatorite magnetiline süsteem konstruktiivsetel põhjustel paigutatud masina pöörlevale osale — rootorile, kuna juhtmed, milledes indutseeritakse elektromotoorset jõudu, on asetatud paigalseisvale osale — staatorile.



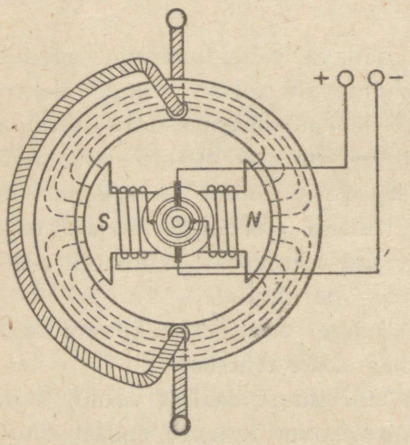
Joon. 61.



Joon. 62.

Staator on koostatud raudplekkidest ning mähis paigutatakse staatori sisepinnal asuvatesse uuretesse. Joonisel 61 on skemaatiliselt näidatud staator ühe mähisekeeruga.

Lihtsaim rootor on näidatud joonisel 62.



Joon. 63.

Rootori poolustele on paigutatud alalisvooluga toidetavad mähised, kusjuures alalisvoolu juhitakse nendesse mingist võõrast vooluallikast, näiteks väikesest alalisvoolu-generaatorist, kontaktrõngaste ja harjade kaudu.

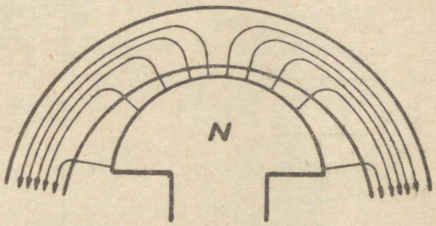
Joonisel 63 on näidatud vahelduvvoolu-generaatori skeem. Kui mingi jõuallika abil ajada rootorit ringi, siis rootori poolustega tekitatav magnetvoog lõikab staatori uuretesse asetatud juhtmeid ja indutseerib neis elektromotoorset jõudu, mille suurus võrdub:

$$e = B \cdot l \cdot v \cdot 10^{-8} \text{ (volti)}.$$

Selles valemis l — juhtme pikkus ja v — juhtme lõikamise kiirus jõujoonte poolt (võrdne rootori pöörlemise ringkiirusega) on püsivad suurused; järelikult juhtme elektromotoorne jõud on võrdeline õhupilu magnetilise induktsiooniga B.

Selleks et juhtmes indutseeruv elektromotoorne jõud muutuks sinusoidaalselt, on vajalik, et õhupilu magnetiline induktsioon oleks jaotatud ka sinusoidaalselt. Seda saavutatakse vastava kuju andmisega pooluste kingadele (joon. 64).

Niisuguse masina juures õhupilu laius pole ühesugune, vaid ta väheneb pidevalt pooluse otsalt pooluse keskkoha suunas. Vastavalt sellele suureneb täiesti pidevalt magnetiline induktsioon nullilt masina neutraaljoonel kuni maksimaalse väärtuseni pooluste keskkohal.



Joon. 64.

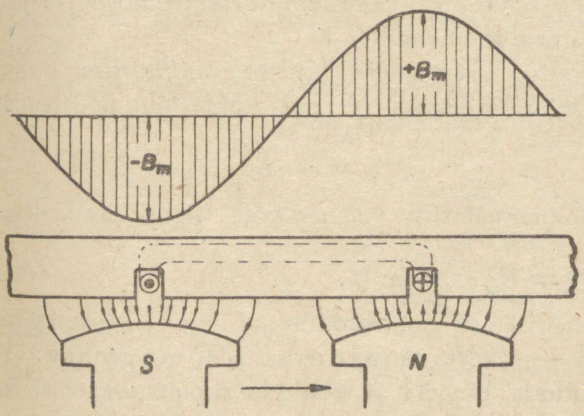
Joonisel 65 silindrilise staatori pind on näidatud laotatult.

Magnetilise induktsiooni jaotus õhupilus on näidatud joonise ülemises osas. Kõvera B ordinaadid on võrdelised pooluste vastavate punktide induktsiooniga. Maksimaalne ordinaat B_m asub pooluse keskkohal.

Neutraaljoonel induktsioon on võrdne nulliga.

Magnetiliste jõujoonte suund lõunapooluse kohal on vastupidine magnetiliste jõujoonte suunaga põhjapooluse kohal. See on näidatud sümboolselt kõvera B ordinaatide paigutamisega kahele poolele horisontaaljoonest.

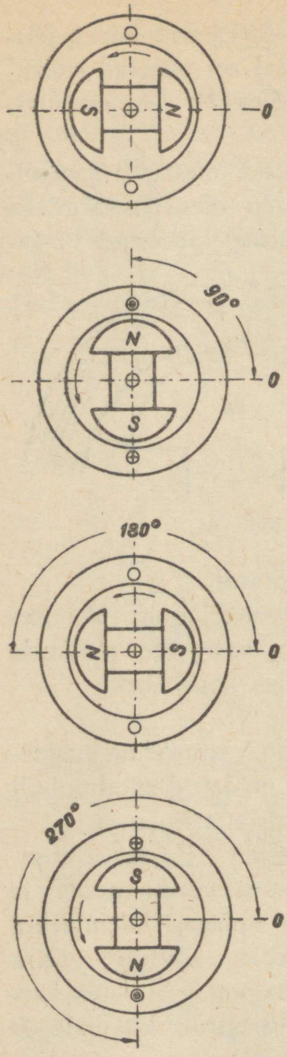
Joonisel 66 on näidatud generaatori rootori neli asendit. Esimeses asendis asuvad juhtmed neutraaljoonel, induktsioon nendes on võrdne nulliga ja seega ka elektromotoorne jõud juhtmetes on võrdne nulliga. Üleminekul esimesest asendist teise induktsioon juhtmetes kasvab vastavalt kõverale B (joon. 65).



Joon. 65.

Sellega ühenduses kasvab ka elektromotoorne jõud juhtmes ja saavutab rootori teises asendis oma maksimumi.

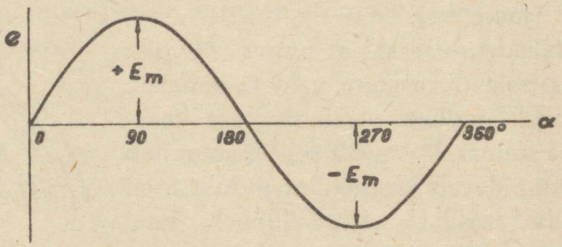
Pole raske jälgida elektromotoorse jõu edasist muutumist rootori pöörlemisel. Need muutumised on



Joon. 66.

näidatud graafiliselt joonisel 67 sõltuvalt rootori pöördenurgast α, kusjuures algasendiks on valitud esimene asend joonisel 66.

Elektromotoorse jõu suuna muutumine pärast rootori pöördumist 180° võrra on sümboolselt näidatud elektromotoorse jõu ordinaatide paigutamisega allapoole horisontaalteljest joonisel 67.



Joon. 67.

Sinusoidaalse elektromotoorse jõu väärtus mingil ajamomendil ehk elektromotoorse jõu momentväärtus on järgmises sõltuvuses maksimaalsest väärtusest E_m:

$$e = E_m \cdot \sin \alpha; \qquad (24)$$

siin

$$E_m = B_m \cdot l \cdot v \cdot 10^{-8} \text{ (volti)}$$

on elektromotoorse jõu maksimaalne väärtus, mis indutseerub juhtmes momendil, kui temast möödub pooluse keskkoht (teine ja neljas asend joonisel 66), kuna α on rootori pöördenurk elektromotoorse jõu määramise momendil.

Rootori pöörlemise ühtlase nurkkiiruse puhul rootori pöördenurk α on võrdeline pöörlemise ajaga

$$\alpha = \omega \cdot t,$$

ning elektromotoorse jõu momentväärtuse valemit võib siis kirjutada järgmiselt:

$$e = E_m \cdot \sin \omega \cdot t. \qquad (25)$$

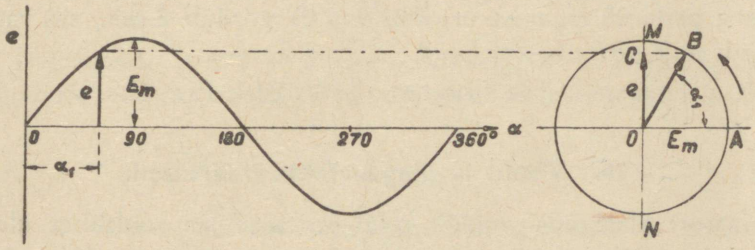
Saadud avaldus võimaldab määrata elektromotoorse jõu väärtust igasugusel ajamomendil ehk teisiti — elektromotoorse jõu momentväärtust. Elektromotoorsete jõudude, pingete ja voolude momentväärtusi tähistatakse tavaliselt väikeste tähtedega: e, u, i.

Valemiga (25) määratavat suurimat momentväärtust nimetatakse amplituudiks ja märgitakse suurte tähtedega indeksiga $_m$: E_m, U_m, I_m.

28. Vektordiagramm.

Perioodiliselt muutuva väärtuse, näiteks vahelduva elektromotoorse jõu kujutamine täisnurksetes koordinaatides pole alati sobiv. Mitmed ülesanded lahenduvad tunduvalt lihtsamini nõndanimetatud vektordiagrammi abil.

Joonisel 68 on näidatud sinusoidaalselt muutuva elektromotoorse jõu graafik täisnurksetes koordinaatides ning selle kõrval vastav vektordiagramm.



Joon. 68.

Täisnurksetel telgedel ehitatakse ring, mille raadius võrdub mingis mõõtvahekorras elektromotoorse jõu maksimaalväärtusega.

Olgu elektromotoorse jõu momentväärtus mingil ajamomendil t_1

$$e = E_m \cdot \sin \alpha_1,$$

kus $\alpha_1 = \omega \cdot t_1$.

Ehitame lähteasendiks valitud raadiusele OA nurga α_1 all vektori OB. Lepime kokku lugeda nurgad algraadiuselt OA ajanäitaja osutile vastupidises suunas.

Vektori OB projektsioon vertikaalsele läbimõõdule MN on võrdne elektromotoorse jõu momentväärtusega diagrammi ehitamiseks valitud mõõtvahekorras.

Tõepoolest kolmnurgast OBC järgneb, et

$$OC = OB \cdot \sin \alpha_1;$$

kuid

$$OB = E_{\cong},$$

järelikult

$$OC = E_m \cdot \sin \alpha_1,$$

see tähendab

$$OC = e.$$

Vektori ühe pöörde vältel tema projektsioon vertikaalsel läbimõõdul omab kõiki väärtusi, mis vastavad elektromotoorse jõu väärtustele ühe perioodi vältel.

Määrame vektori pöörlemise nurkkiiruse eeldusel, et ühe perioodi vältel diagrammi vektor teeb ühe täispöörde.

Sel juhul vektori nurkkiirus ω oleneb ainuüksi sagedusest f. Tõepoolest, ühe pöörde vältel vektori pöördenurk võrdub 2π, kuid kuna vektori pöörete arv sekundis võrdub perioodide arvuga sekundis, s. t. sagedusega, siis sellest järgneb, et

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f.$$

Suurust ω nimetatakse vahelduvvoolu nurksageduseks.

Kui aeg perioodi algusest ($\alpha = 0$, $e = 0$) võrdub t sek., siis vastav vektori pöördenurk võrdub $\alpha = \omega \cdot t$.

Nurka $\omega \cdot t$ nimetatakse faasinurgaks ehk faasiks.

29. Voolu ja pinge efektiivväärtused.

Generaatori klemmidel, milles indutseeritakse sinusoidaalset elektromotoorset jõudu, tekib samuti sinusoidaalselt muutuv pinge. Kui generaatori klemmidega ühendada takistus R, siis selles voolab sinusoidaalne vool.

Voolu momentväärtus määratakse avaldusest

$$i = I_m \cdot \sin \omega \cdot t,$$

kus t on perioodi algusest möödunud ajavahemik.

Arvutuste ja mõõtmiste lihtsustamiseks vahelduvvoolu ringides me kasutame voolutugevuse teatavat ekvivalentset väärtust, millist me allutame järgmisele tingimusele. Olgu mingi aja T vältel vahelduvvoolu i poolt takistuses eraldatud energia hulk võrdne A džauliga. Valime voolutugevuse niisuguse muutumatu väärtuse I, mis eraldab takistuses sama aja T vältel sama suure energia hulga A. Niisugusel tingimusel saadud voolutugevuse I väärtust nimetame vahelduvvoolu efektiivseks väärtuseks.

Niisugune tingimus muutumatu keskmise väärtuse valikul seatakse üles seepärast, et praktikas on olulise tähtsusega just energia hulk, millist saadakse voolu läbimisel mingist tarvitajast.

Lähtudes ülesseatud tingimusest määrame vahekorra voolutugevuse efektiivse ja maksimaalse väärtuse vahel,

Selleks arvutame voolu tööd takistuses R, kui teda läbistab vahelduvvool ühe perioodi vältel.

Voolu tööd takistuses R lõpmatult väikese ajavahemiku dt vältel, millal võiks lugeda, et vool ei muutu ja omab sel ajavahemikul muutumatut

väärtust i, võiks väljendada alalisvoolu teooriast tuntud valemi alusel järgmiselt:

$$dA = i^2 \cdot R \cdot dt.$$

Selleks et leida voolu tööd terve perioodi T vältel, tuleb summeerida tööd kõikide lõpmatult väikeste ajavahemikkude dt vältel, laiendades seda summeerimist ühe terve perioodi ajale, s. t.

$$A = \int_0^T dA = \int_0^T i^2 \cdot R \cdot dt.$$

Kuid sama suurt tööd peaks tegema ka efektiivväärtusega võrdne vool see tähendab

$$A = I^2 \cdot R \cdot T,$$

kus I — efektiivväärtus ja T — ühe perioodi aeg (valem on õige alalisvoolule, kuid tingimusel, et $I = \text{const.}$, ta on õige ka efektiivväärtusele); seepärast

$$A = I^2 \cdot R \cdot T = \int_0^T i^2 \cdot R \cdot dt;$$

kuid kuna $R = \text{const.}$, siis tuues ta integraali märgi ette ja koondades valemi mõlemad pooled R-ga, saame:

$$I^2 \cdot T = \int_0^T i^2 \cdot dt$$

ehk

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 \cdot dt};$$

kuid $i = I_m \cdot \sin \omega t$, seepärast

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \cdot \sin^2 \omega t \cdot dt} = I_m \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \sin^2 \omega t \cdot dt}.$$

Võtame juure all asuva integraali

$$\int_0^T \sin^2 \omega t \cdot dt = \int_0^T \frac{1 - \cos 2 \omega t}{2} dt = \int_0^T \frac{dt}{2} - \int_0^T \frac{\cos 2 \omega t}{2} dt =$$

$$= \frac{T}{2} + \frac{1}{4\omega} \left[\sin 2 \omega t\right]_0^T = \frac{T}{2},$$

kuna

$$\left[\sin 2 \omega t\right]_0^T = 0.$$

Järelikult

$$I = I_m \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \frac{T}{2}},$$

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \tag{26}$$

see tähendab, voolu efektiivväärtus on $\sqrt{2}$ korda väiksem tema amplituudist ehk

$$I = 0{,}707 \cdot I_m,$$

vastavalt:

$$I_m = \sqrt{2} \cdot I,$$

$$I_m = 1{,}41 \cdot I.$$

Analoogilisel teel võib määrata ka pinge efektiivse ja maksimaalse väärtuse vahekorda

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, \tag{27}$$

$$U = 0{,}707 \cdot U_m$$

ja vastavalt

$$U_m = \sqrt{2} \cdot U,$$

$$U_m = 1{,}41 \cdot U.$$

Voolu ja pinge efektiivväärtuse suurused omavad väga suurt tähtsust enamalt jaolt opereeritakse just nendega vahelduvvoolu ringides esinevate nähete arvutamisel. Ka ampermeetrid ja voltmeetrid näitavad otseselt voolutugevuse ja pinge efektiivväärtusi.

N ä i d e 20. Vahelduvvoolu ringiga ühendatud voltmeeter näitab pinget $U = 220$ V. Voolu sagedus $f = 50$ Hz. Määrata pinge väärtus momendil $t = 1/75$ sekundit pärast perioodi algust.

Otsitav pinge määratakse valemiga

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

kus

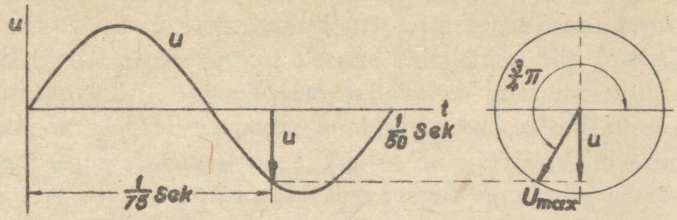
$$U_m = \sqrt{2} \cdot U = 1{,}41 \cdot 220 = 310 \text{ V},$$

$$\omega t = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \frac{1}{75} = \frac{4}{3} \pi,$$

siit

$$u = 310 \cdot \sin \frac{4}{3} \pi = -310 \cdot 0{,}866 = -268 \text{ V}.$$

Joonisel 69 on näidatud vastav pinge ordinaat sinusoidil u ning vektori paigutus antud momendil vektordiagrammil.



Joon. 69.

VII peatükk.

AKTIIVNE JA INDUKTIIVNE TAKISTUS.

30. Vooluring aktiivse takistusega.

Voolutugevust igas kinnises vooluringis võib määrata punkt 5. vaadeldud tasakaalu tingimuse alusel.

See tingimus on määratud teise Kirchhoffi seadusega, mille kohaselt kõikide vooluringis mõjuvate elektromotoorsete jõudude summa on võrdne voolutugevuse ja vooluringi takistuse korrutisega.

Nagu edaspidi näeme, vahelduvvoolu ringides tekivad vooluringi juhtmeid ümbritseva magnetvoo muutumise tagajärjel elektromotoorsed jõud. Kuid enamalt jaolt on need elektromotoorsed jõud võrreldes vooluringiga ühendatud pingega niivõrd väikesed, et nendega ei arvestata.

Sellisel juhul on kõikide vooluringis mõjuvate elektromotoorsete jõudude summa võrdne vooluringis mõjuva pingega ning kasutades Ohmi seadust pinge ja voolutugevuse momentväärtustele, võime kirjutada:

$$u = i \cdot R.$$

Saadud võrrandist järeldub, et vooluringis mõjuv pinge u tasakaalustub pingelangusega takistuses R, millist pingelangust me hakkame nimetama aktiivseks pingelanguseks.

Ta vastab juhtmete takistusega esilekutsutud pingelangusele alalisvoolu ringides. Seda takistust me hakkame nimetama aktiivseks takistuseks.

Juhtme aktiivne takistus on veidi suurem juhtme takistusest alalisvoolule, nõndanimetatud oomilisest takistusest.

Vahe aktiivse takistuse ja oomilise takistuse vahel tekib peamiselt vahelduvvoolu mitteühtlase tiheduse tõttu juhtme ristlõikes. Nimelt, kui voolab juhtmes alalisvool, siis ta täidab ühtlaselt juhtme kogu lõiget, kuna vahelduvvool surub end teatud määral juhtme pinnale nii, et voolutihedus juhtmes kasvab tema keskkohast välispinna suunas. Selline, tehnilise sageduse 50 Hz juures veel mitteoluline nähe tugevneb sageduse suurenemisel ning esineb jämedates juhtmetes tugevamalt kui peentes.

Aktiivset pingelangust tasakaalustavat pinget me märgime tähega u_a; siis

$$u_a = i \cdot R.$$

Sinusoidaalse voolu puhul

$$i = I_m \cdot \sin \omega t,$$

kust

$$u_a = I_m \cdot R \cdot \sin \omega t$$

ehk

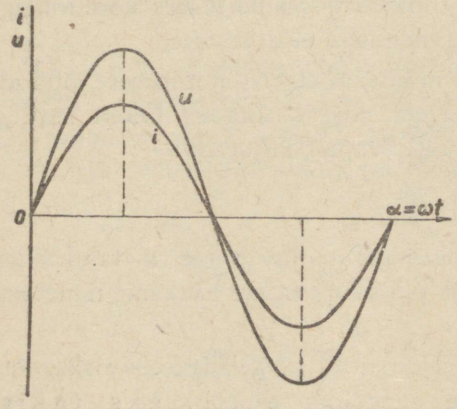
$$u_a = U_{am} \cdot \sin \omega t,$$

see tähendab, et pinge u_a on ka sinusoidaalne.

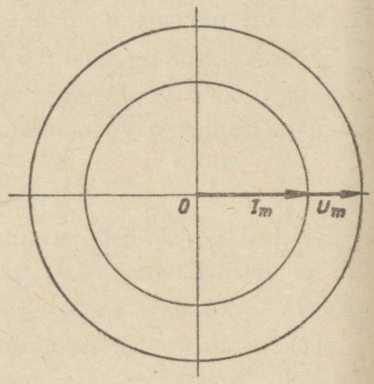
Viimases avalduses

$$U_{am} = I_m \cdot R.$$

Võrreldes voolu i ja pinge u_a momentväärtuste avaldusi, me näeme, et voolu ja pinge faasid on ühesugused, s. t. aktiivset pingelangust tasakaalus-



Joon. 70.



Joon. 71.

tav pinge ja voolutugevus faasiliselt langevad ühte. Joonisel 70 on näidatud sellele juhule vastavad voolu ja pinge sinusoidid ning joonisel 71 — vektordiagramm. Voolu I_m vektor langeb ühte vooluringis mõjuva pinge U_m vektoriga. Tõepoolest, ainult sel tingimusel mõlemad vektorid asuvad üheaegselt algasendis, üheaegselt läbivad vertikaalset läbimõõtu, mis vastab voolutugevuse ja pinge maksimaalsele momendile jne.

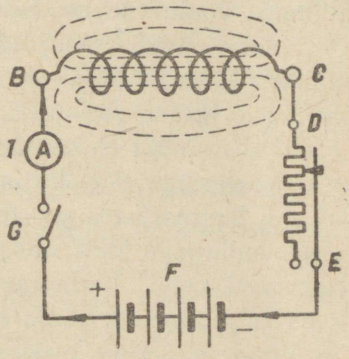
Puhtaktiivset takistust omavateks tarvitajateks loetakse reostaadid, hõõglambid, elektriahjud, majapidamisriistad jne.

31. Omainduktsiooni nähe.

Selleks et jälgida vahelduvvoolu ringides toimuvaid nähteid, tuleb kõigepealt tutvuda omainduktsiooni nähtega.

Olgu antud joonisel 72 kujutatud vooluring. Lüliti G sulgemisel voolab vool patarei F positiivselt pooluselt nooltega näidatud suunas üle ampermeetri, mähise ja liugreostaadi.

Mähises tekib magnetvoog, mille suurus oleneb amperkeerdudest, see tähendab voolutugevusest (kuna keerdude arv on püsiv väärtus), ja järelikult jääb muutumatuks nii kaua, kui vooluringi vool omab samuti muutumatut väärtust. Kuid, kui kiiresti nihutada liugreostaadi DE liuglejat, vähendades takistust, siis vooluringi voolutugevus kasvab, mis omakorda kutsub esile magnetvoo suurenemise mähises BC. Kuid eelmisest osast on teada, et kinnist kontuuri läbistava magnetvoo igasugusel muutumisel tekib kontuuris magnetvoo muutumise kiirusega võrdeline indutseeritud elektromotoorne jõud, see tähendab, mähise igas keerus elektromotoorne jõud omandab väärtuse



Joon. 72.

$$e' = -\frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ (volti)},$$

ning kõigis keerdudes w

$$e = -w \cdot \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ (volti)},$$

kusjuures Lenz'i reegli kohaselt ta on suunatud nii, et töötab teda esilekutsunud põhjusele vastu. Elektromotoorse jõu esilekutsumise põhjuseks

on aga voolutugevuse suurenemine vooluringis; järelikult elektromotoorne jõud püüab vastu töötada voolu kasvamisele, s. t. on suunatud viimasele vastu.

Kuna see elektromotoorne jõud tekib sellessamas juhtmes, kus toimub voolu muutumine (s. o. teda esile kutsuv põhjus), siis teda ei nimetata mitte lihtsalt indutseeritud elektromotoorseks jõuks, vaid omainduktsiooni elektromotoorseks jõuks ning märgitakse tähega e, millele lisatakse indeks $_L$, s. t. e_L.

Niisiis

$$e_L = - w \cdot \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ (volti).} \qquad (28)$$

See elektromotoorne jõud püsib ainult niikaua, kuni vool muutub; kuid kohe kui vool omandab püsiva väärtuse (lakkab muutumast), kaob ka omainduktsiooni elektromotoorne jõud.

Kui liugleja nihutamise abil kiiresti suurendada liugreostaadi takistust, siis voolutugevus vooluringis väheneb, väheneb ka magnetvoog mähises, ning järelikult tekib jälle omainduktsiooni elektromotoorne jõud, kuid nüüd tema suund langeb voolu suunaga ühte, kuna Lenz'i reegli kohaselt ta peab töötama voolu vähenemisele vastu.

Niisiis mähise voolu igasugusel muutumisel mähises tekib omainduktsiooni elektromotoorne jõud, mis töötab neile muudatustele vastu ja on võrdeline magnetvoo, ja järelikult ka voolu muutumise kiirusega, kusjuures voolu kasvamisel elektromotoorne jõud on suunatud voolule vastu, kuna voolu kahanemisel elektromotoorne jõud langeb tema suunaga ühte.

Kui liugreostaadi takistuse muutmise asemel lihtsalt sulgeda ja katkestada vooluringi lüliti abil, siis esinevad samasugused nähted, kuid palju teravamal kujul. Katkestamine on üheväärne voolu kahanemisega nullini, kuna sulgemine — voolu suurenemisega nullilt kuni teatava väärtuseni.

Nüüd ühendame meie vooluringi akumulaatorpatarei asemele vahelduvvoolu-generaatori; siis vool mähises muutub vahetpidamatult ning seepärast ka omainduktsiooni elektromotoorse jõu tekkimine toimub vahetpidamatult. Määrame tema suuruse.

Valemi (28) alusel:

$$e_L = - w \cdot \frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8};$$

kuid

$$\Phi = \frac{0{,}4 \cdot \pi \cdot w \cdot i \cdot S \cdot \mu}{l}$$

(Ohmi seadus magnetringile); lugedes, et magnetiline juhtivus μ = const., saame:

$$e_L = - \frac{0{,}4 \cdot \pi \cdot w^2 \cdot S \cdot \mu}{l} \cdot 10^{-8} \frac{di}{dt}.$$

Märkides $\frac{di}{dt}$ ees seisvat avaldust üheainsa tähega L, s. t.

$$L = \frac{0{,}4 \cdot \pi \cdot w^2 \cdot S \cdot \mu}{l} \cdot 10^{-8} \tag{29}$$

saame:

$$e_L = -L \frac{di}{dt}. \tag{30}$$

Suurus L on teatav tegur (koefitsient), mida võib lugeda püsivaks suuruseks, kui mähisel pole ferromagnetilist südamikku (tõepoolest kõik valemis

$$L = \frac{0{,}4 \cdot \pi \cdot w^2 \cdot S \cdot \mu}{l} \cdot 10^{-8}$$

esinevad suurused on püsivad väärtused, ainult μ on muutlik ferromagnetilise südamiku puhul). Tähega L märgitud suurust nimetatakse induktiivsuseks.

Avaldusest (29) nähtub, et suure keerdude arvuga mähis omab väga suurt induktiivsust, eriti kui tal on rauast või terasest suure magnetilise juhtivusega südamik, kuna avaldus (30) näitab, et sel puhul peab temas tekkima väga suur omainduktsiooni elektromotoorne jõud. Vastupidiselt kui me venitame mähise nii pikaks, et tema keerud tõmbuvad sirgeks, see tähendab, et saame ühekordse sirge juhtme, siis induktiivsus tugevasti väheneb, kuna ühekordne juhe omab väga väikest induktiivsust ja lühikestel pikkustel sellega ei arvestata oletusel, et ta on võrdne nulliga.

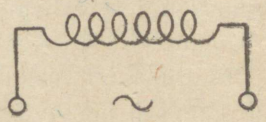
Kuna voolu tuletis aja suhtes $\frac{di}{dt}$ näitab voolu muutumise kiirust, siis järelikult omainduktsiooni elektromotoorne jõud on võrdeline voolu muutumise kiirusega.

Induktiivsuse suurust mõõdetakse erilise mõõtühikuga, mida nimetatakse henriks (H).

Üks henri on niisuguse juhtme induktiivsus, milles voolu muutumise kiirusel üks amper ühes sekundis tekib ühe voldiga võrdne omainduktsiooni elektromotoorne jõud.

32. Induktiivsusega vahelduvvooluring.

Vaatleme nähteid induktiivsust sisaldavas vahelduvvooluringis. Olgu sagedusega f vahelduvvoolu ringi lülitatud mingi mähis induktiivsusega L (joon. 73).



Joon. 73.

Olgu

$$i = I_m \cdot \sin \omega t.$$

Asetades i tähenduse omainduktsiooni elektromotoorse jõu valemisse

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

saame:

$$e_L = -L\frac{d[I_m \cdot \sin \omega t]}{dt} = -L \cdot I_m \cdot \omega \cdot \cos \omega t;$$

kuid

$$-\cos \omega t = -\sin (90° - \omega t) = \sin (\omega t - 90°);$$

saame

$$e_L = \omega \cdot L \cdot I_m \cdot \sin (\omega t - 90°). \tag{31}$$

Niisugune on omainduktsiooni elektromotoorse jõu momentväärtus; tema amplituudi saame, võttes

$$\sin (\omega t - 90°) = 1,$$

see tähendab

$$E_{L_m} = \omega \cdot L \cdot I_m. \tag{32}$$

Kuna aga efektiivväärtus on amplituudist $\sqrt{2}$ korda väiksem,

siis

$$E_L = \frac{E_{L_m}}{\sqrt{2}} = \omega \cdot L \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}},$$

järelikult

$$E_L = \omega \cdot L \cdot I,$$

ehk võttes

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f,$$

saame lõplikult:

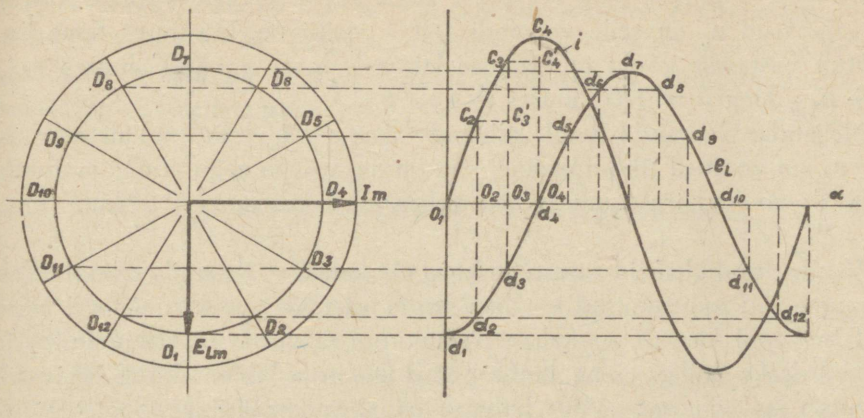
$$E_L = \omega \cdot L \cdot I = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \cdot I. \tag{33}$$

Selleks, et neid põhinähteid paremini selgitada, ehitame selle vooluringi põhisuurusté vektordiagrammid ja sinusoidid. Ehitame kõigepealt voolu diagrammi (joon. 74). Olgu voolu esialgne faas võrdne nulliga, siis järelikult asetseb voolu vektor I_m abstsisside telje positiivses suunas ning voolu sinusoid omandab joonisel 74 toodud kuju (kõver i).

Voolu kõverast on selgesti näha, et vool ei muutu igasugusel ajamomendil ühesuguse kiirusega; nii lõigule O_1O_2 (nurk $\alpha = 30°$) vastava ajavahemiku vältel vool kasvab väärtuse O_2C_2 võrra, mis on suurem, kui teise samasuguse ajavahemiku O_2O_3 vältel, kus vool kasvab väärtuse $C_3C_3 < O_2C_2$ võrra jne.

Suurimaid muutumise kiirusi omab vool nullväärtuste (0°, 180°, 360°) läbistamisel, ning väikseimaid — maksimumväärtuste (90° ja 270°) läbistamisel. Viimastel momentidel voolu muutumise kiirus on võrdne nulliga.

Vahelduvvoolu voolamisel mähises tekib viimases omainduktsiooni elektromotoorne jõud, mis, nagu juba teada, töötab voolu muutumistele vastu. On juba selgitatud, et tema suurus on võrdeline voolu muutumise kiiru-



Joon. 74.

sega, ning kuna viimane on muutlik suurus, siis ka omainduktsiooni elektromotoorne jõud on muutlik suurus. Vaatleme tema muutumist voolu muutumise ühe perioodi vältel.

Perioodi esimese veerandi vältel vool kasvab, seepärast omainduktsiooni elektromotoorne jõud, töötades voolu kasvamisele vastu, on suunatud viimasele vastupidises suunas; kuna selles veerandis vool on positiivne, siis järelikult e_L peab olema negatiivne ja tema kõver paigutub allapoole abstsisside telge. Sealjuures voolu muutumise kiirus algmomendil on maksimaalne (vool läbib nullväärtuse), ning seepärast ka omainduktsiooni elektromotoorne jõud on maksimaalne, kuid negatiivne, s. t. $e_{L_0} = -E_{L_m}$. Nurga liginedes 90°-le vool ligineb maksimumile, kuid tema muutumise kiirus väheneb, järelikult väheneb ka e_L, ning 90° juures vool saavutab maksimumi tema muutumise kiirus sel momendil on võrdne nulliga ning järelikult ka $e_{L_{90°}} = 0$.

Perioodi teise veerandi vältel vool väheneb alates I_m-st kuni nullini, jäädes seejuures positiivseks; töötades tema vähenemisele vastu e_L on vooluga samasuunaline, s. t. on ka positiivne ja tema kõver paigutub pealepoole abstsisside telge, kusjuures nurk $\alpha = 90°$ juures $e_{L_{90°}} = 0$; kuid voolu vähenemisel $+I_m$-st kuni nullini tema muutumise kiirus järjest suureneb ja saavutab maksimaalse väärtuse voolu läbimisel nullpunktist ($\alpha = 180°$). Seepärast selle veerandi vältel e_L kasvab nullist $\alpha = 90°$ juures kuni $+E_{L_m}$ $\alpha = 180°$ juures.

Kolmandal veerandil oma suunda muutnud vool kasvab, saavutades $\alpha = 270°$ juures oma negatiivse maksimumi I_m, ja tema muutumise kiirus aegamööda väheneb, omades maksimaalset väärtust $\alpha = 180°$ ning nullväärtuse $\alpha = 270°$ juures, ning seepärast kogu aeg kasvavale voolule vastupidiselt suunatud e_L on selle veerandi vältel positiivne, kusjuures tema suurus muutub vastavalt voolu muutumise kiirusele, s. t. $\alpha = 180°$ juures $e_{L_{180°}} = +E_{L_m}$ ning $\alpha = 270°$ juures $e_{L_{270°}} = 0$.

Neljandal veerandil vool kahaneb alates $-I_m$ kuni nullini ning järelikult e_L on vooluga ühesuunaline, s. t. on negatiivne nagu voolgi ja muutudes vastavalt voolu kiiruse muutumisele, kasvab alates $e_{L_{270°}} = 0$ kuni $e_{L_{360°}} = -E_{L_m}$.

Vaadeldes mõlemaid sinusoide koos märkame, et omainduktsiooni elektromotoorse jõu muutumised ei ühtu voolu vastavate muutumistega. Momentidel kui vool kasvab, e_L kahaneb; kui vool saavutab maksimume, e_L muutub võrdseks nulliga; ning ümberpöördult, voolu läbimisel nullväärtustest e_L saavutab maksimume. Võib hõlpsalt näha, et omainduktsiooni elektromotoorne jõud oma muutumistega kogu aeg jääb vastavatest voolu muutumistest veerandperioodi võrra maha, kuna tema vektor jääb vooluvektorist 90°-se nurga võrra maha (mis on eriti selgesti näha joonise 74 vasakpoolsel vektordiagrammil). Tõepoolest, perioodi esimese veerandi vältel vool kasvab 0 kuni I_m, kuna omainduktsiooni elektromotoorne jõud kasvab 0 kuni E_{L_m} alles perioodi teisel veerandil, s. t. veerandperioodi võrra hiljem; teisel veerandil vool kahaneb I_m kuni 0, kuna e_L kahaneb E_{L_m} kuni 0 perioodi kolmandal veerandil, s. t. jällegi veerandperioodi võrra hiljem jne.

Niisiis mähist läbistav vahelduvvool i tekitab selles omainduktsiooni elektromotoorse jõu e_L, mis faasiliselt jääb voolust maha veerandperioodi võrra.

Meie poolt ehitatud kõver e_L vastab täiesti saadud avaldusele omainduktsiooni elektromotoorse jõu kohta — valem (31):

$$e_L = \omega \cdot L \cdot I_m \cdot \sin(\omega t - 90°).$$

Asetades sellesse valemisse nurkade väärtusi $\alpha = \omega t$ alates $\alpha = 0$ kuni $\alpha = 360°$, saame täpselt joonisel 74 näidatud kõvera e_L.

Nii näiteks nurga väärtusele $\alpha = 0$ saame:

$$e_L = \omega \cdot L \cdot I_m \cdot \sin(-90°) = -\omega \cdot L \cdot I_m = -E_{L_m};$$

nurga väärtusele $\alpha = 90°$ saame:

$$e_L = \omega \cdot L \cdot I_m \cdot \sin(90° - 90°) = 0 \text{ jne.}$$

Võrreldes avaldust (31) voolutugevuse avaldusega

$$i = I_m \cdot \sin \omega t,$$

näeme, et voolu faasinurk $\alpha_i = \omega t$ ja omainduktsiooni elektromotoorse jõu faasinurk $\alpha_e = \omega t - 90°$ erinevad üksteisest 90° võrra: $\alpha_i - \alpha_e = 90°$, mis aina tõendab graafiliselt juba saadud omainduktsiooni elektromotoorse jõu mahajäämist voolutugevusest.

33. Aktiivse ja induktiivse takistusega vooluring.

Rakendame aktiivset takistust R ja induktiivsust L omavale vooluringile teist Kirchhoff'i seadust, mis määrab elektrilise tasakaalu tingimuse, nagu see on selgitatud punktis 5.

Kuna lõpmatult lühikese ajavahemiku vältel kõiki vahelduvvoolu ringis tegutsevaid suurusi võiks lugeda püsivateks, siis alalisvoolu seadusi võib vahenditult rakendada momentväärtustele. Sellist võtet me kasutame tulevikus väga sagedasti.

Antud juhul tegutsevad vooluringis väljast ühendatud pinge u ja voolu poolt tekitatav omainduktsiooni elektromotoorne jõud e_L. Seepärast Kirchhoff'i teist seadust tuleb kirjutada järgmisel kujul:

$$u + e_L = i \cdot R$$

ehk

$$u = -e_L + i \cdot R.$$

Märgime suurust $-e_L$ suurusena u_L; meeles pidades, et $i \cdot R$ on aktiivne pinge u_a, saame siis:

$$u = u_L + u_a, \tag{34}$$

s. t. vooluringiga ühendatud pinge koosneb kahest liikmest:

$$u_L = -e_L,$$

$$u_a = i \cdot R.$$

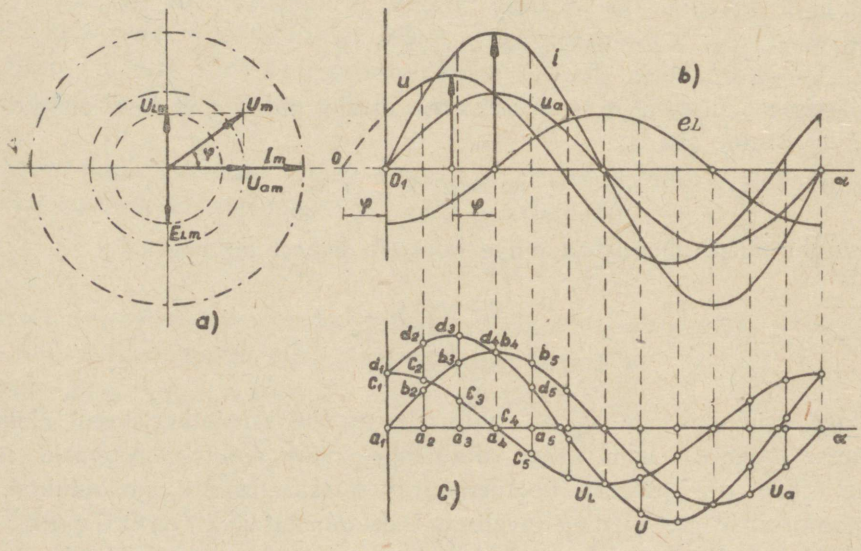
Pinge esimene liige u_L on suuruselt võrdne omainduktsiooni elektromotoorse jõuga e_L, kuid, nagu näitab miinusmärk, suunalt on temale vastupidine. See osa pingest kompenseerib (tasakaalustab) omainduktsiooni elektromotoorse jõu e_L ning tavaliselt teda nimetatakse reaktiivseks (ka induktiivseks) pingeks, niivõrd kui e_L on voolu muutumistele vastutöötav reaktiivne tegur, mis osutab neile muutumistele reaktsiooni.

Pinge teine liige $u_a = i \cdot R$ kulutatakse vooluringi takistuse R ületamiseks ja teda, nagu ülal öeldud, nimetatakse aktiivseks pingeks.

Vahelduvvoolu ringis toimuvatest põhinähetest täieliseks arusaamiseks tuleb endale hästi selgitada võrrandi (34) füüsikalist mõtet. On teada, et soovitud voolu i saamiseks ja tema vabaks voolamiseks vooluringis tuleb viimasele anda niisugune pinge, mis oleks küllaldane takistuse R ületamiseks. Selle pinge suurust määratakse Ohmi seaduse järgi: $u_a = i \cdot R$. See ongi see pinge osa, mida me nimetasime aktiivseks pingeks. Kuid kuna vahelduvvool tekitab enda ümber muutuvat magnetvälja ning selle välja muutumise tagajärjel vooluringis indutseerub voolu muutusi takistav (vastutöötav) omainduktsiooni elektromotoorne jõud, siis soovitud voolu i saamiseks tuleb kõrvaldada see segav tegur, kompenseerides teda igal silmapilgul omainduktsiooni elektromotoorse jõuga võrdsega, kuid suunalt temale vastupidise pingega u_L, s. t. $u_L = -e_L$; seda pinge osa nimetatakse reaktiivseks pingeks.

Niisiis, pinge u on summaarne pinge, mis koosneb kahest komponendist: aktiivsest pingest u_a, mis ületab takistust, ja reaktiivsest pingest u_L, mis ületab omainduktsiooni elektromotoorset jõudu, see tähendab: $u = -u_a + u_L$.

Jätkame meie graafilist arutlust selle vooluringiga ühendatud summaarse pinge leidmiseks, mis arvatavasti nagu voolgi on vahelduva iseloomuga. Kõigepealt vaatleme aktiivset pinget. Nagu oli selgitatud punktis



Joon. 75.

30, langeb ta faasiliselt ühte vooluga, millele vastavalt ongi ehitatud joonisel 75-b kõver u_a.

Nüüd vaatleme reaktiivset pinget u_L. Igal silmapilgul on ta võrdne omainduktsiooni elektromotoorse jõuga e_L, kuid suunalt on temale vastupidine; seepärast vektor U_{L_m} peab võrduma vektoriga E_{L_m}, kuid peab olema vastupidiselt suunatud (vt. joon. 75-a).

Kui on käes sinusoid e_L, on kerge ehitada sinusoidi u_L. Ehitamine on teostatud joonisel 75-c, kus ordinaadid a_1c_1, a_2c_2 jne. on võrdsed kõvera e_L vastavate ordinaatidega, kuid paigutatud teisele poolele abstsisside teljest.

Vooluringiga ühendatud summaarse pinge u kõvera saamiseks on vaja, arvesse võttes märke, liita kõverate u_a ja u_L ordinaadid, sest igal momendil $u = u_a + u_L$, mis ongi teostatud joonisel 75-c, kuhu jooniselt 75-b on üle kantud kõver u_a.

Näiteks otsitava pinge ordinaat

$$a_3d_3 = a_3b_3 + a_3c_3 = a_3b_3 + b_3d_3$$

või

$$a_5d_5 = a_5b_5 - a_5c_5 = a_5b_5 - b_5d_5$$

jne.

Sel teel saadud pinge kõver $(d_1d_2 \ldots\ldots)$ on üle kantud joonisele 75-b.

Nagu nähtub, on pinge kõver ka sinusoidaalne, mis peakski olema, kuna kahe sinusoidi summa on samuti sinusoid.

Nüüd vaatleme voolu i ja ühendatud pinge u sinusoidide suhtelist paigutust (joon. 75-b). Siin me märkame hõlpsalt, et pinge ja vool ei saavuta üheaegselt maksimume, ei muutu üheaegselt nulliks ega muuda üheaegselt oma suunda; need suurused ei lange faasiliselt ühte. On selgesti näha, et voolu muutumised jäävad pinge vastavatest muutumistest veidi maha. Tõepoolest, pinge läbib nullväärtust punktis O, voolutugevus aga — punktis O_1, kusjuures lõik OO_1 vastab vektordiagrammi pöördenurgale φ. Samasuguse nurga võrra jääb maha voolutugevuse maksimaalväärtus pinge maksimaalväärtusest jne., s. t. kogu aeg vool jääb ühendatud pingest faasiliselt maha perioodi teatud osa võrra.

See tähendab, et kõik voolutugevuse väärtused meie vooluringis esinevad võrreldes pinge vastavate väärtustega veidi hiljem, kusjuures voolutugevuse faasi hilinemise aeg pinge vastava faasi suhtes on võrdne $t = \frac{\varphi}{\omega}$ sek.

Ehitame vektordiagrammil vooluringiga ühendatud pinge U_m vektori.

Selleks kasutame pingete momentväärtuste vahekorda

$$u = u_a + u_L$$

ja rakendame teoreemi, mille kohaselt resulteeriva projektsioon on võrdne liidetavate projektsioonide summaga.

Kuna momentväärtused võrduvad vektorite projektsiooniga diagrammi vertikaalsele läbimõõdule, siis järelikult vektor U_m peab võrduma vektorite U_{a_m} ja U_{L_m} resultantvektoriga. Sellega on põhjendatud joonisel 75-a teostatud ehitus.

Vektori U_m leiame kui vastavatel vektoritel U_{a_m} ja U_{L_m} ehitatud parallelogrammi diagonaali.

On selgesti näha, et vektor U_m asub vektorist I_m teatava nurga võrra ees.

Seda faaside nihkenurka pinge ja voolu vahel tavaliselt tähistatakse tähega φ.

Kui voolu momentväärtus määratakse valemiga

$$i = I_m \cdot \sin \omega t,$$

siis nähtavasti pinge momentväärtust tuleb määrata valemiga

$$u = U_m \cdot \sin (\omega t + \varphi).$$

Siinuse märgi all valemis seisvat avaldust, mis seob momentväärtusi ja amplituude, nimetatakse teatavasti vastava suuruse faasiks; antud juhul voolu faas on ωt, kuna pinge faas on $\omega t + \varphi$; vahe pinge ja voolu faasi vahel nähtavasti võrdub

$$\omega t + \varphi - \omega t = \varphi.$$

Nii siis, voolu faas jääb pinge faasist maha perioodi teatud osa võrra, kuna voolu vektor jääb pinge vektorist maha faasi nihkenurga võrra (lühidalt öeldakse: vool jääb maha pingest nurga φ võrra). See tekib vooluringis induktiivsuse olemasolu tagajärjel, kuna voolutugevuse muutumiste tõttu vooluringis tekkiv omainduktsiooni elektromotoorne jõud, takistades voolu muutumisi ja pidurdades neid, sunnib voolu võrgupingest maha jääma.

Meie vooluringi vektordiagrammist (joon. 75-a) järgneb, et

$$U_m^2 = U_{a_m}^2 + U_{L_m}^2;$$

üle minnes efektiivväärtustele, saame:

$$\left(\frac{U_m}{\sqrt{2}}\right)^2 = \left(\frac{U_{a_m}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{U_{L_m}}{\sqrt{2}}\right)^2$$

või

$$U^2 = U_a^2 + U_L^2;$$

kooskõlas eelmisega

$$U_a = I \cdot R, \text{ ja } U_L = -E_L = I \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = I \cdot \omega \cdot L.$$

Võrreldes

$$U_a = I \cdot R \text{ ja } U_L = I \cdot \omega \cdot L,$$

näeme, et avaldus ωL omab takistuse mõistet. Teda nimetatakse vooluringi reaktiivseks takistuseks (ka induktiivseks takistuseks) ja märgitakse tähega x_L:

$$x_L = \omega \cdot L. \tag{35}$$

Viies need suurused valemisse, saame:

$$U^2 = I^2 \cdot R^2 + I^2 \cdot x_L^2,$$

kust

$$U = I \sqrt{R^2 + x_L^2}.$$

Avaldust $\sqrt{R^2 + x_L^2}$ märgitakse tavaliselt ühe tähega z ja nimetatakse näivtakistuseks (ka kogutakistuseks). Siis

$$U = I \cdot z$$

või

$$I = \frac{U}{z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + x_L^2}}. \tag{36}$$

Me saime nüüd Ohmi seaduse valemi induktiivsusega vahelduvvoolu ringile.

Vooluringi voolutugevus on otsevõrdeline vooluringiga ühendatud pingega ja pöördvõrdeline näivtakistusega.

Juhul kui vooluringis puudub induktiivsus, s. t. kui $L = 0$, reaktiivne takistus samuti võrdub nulliga ning näivtakistus

$$z = \sqrt{R^2 + x_L^2} = R,$$

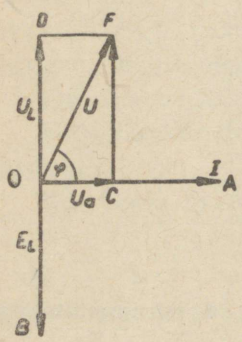
s. t. võrdub aktiivse takistusega, ning Ohmi seadus omandab alalisvoolu teooriast juba tuntud kuju:

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

Sel juhul (s. t. kui $L = 0$) puudub omainduktsiooni elektromotoorne jõud ja kaob ka põhjus, mis sundis voolu maha jääma; seepärast vool ja pinge langevad faasiliselt ühte, nurk φ on võrdne nulliga ning diagramm omab joonisel 71 näidatud kuju.

Seesugune erijuhus esineb praktikas väga sagedasti.

Näide 21. Vahelduvvoolu ringi sagedusega $f = 50$ Hz on lülitatud mähis, mis tarvitab voolu tugevusega 10 A ning mille induktiivsus $L = 0{,}0255$ H ja aktiivne takistus $R = 4\,\Omega$. Ehitada pingete vektordiagramm ja määrata mähisega ühendatud pinge suurus. Vektordiagrammile ehitada mähise poolt tarvitatava voolu vektor.



Joon. 76.

Alustame joonisel 76 näidatud vektordiagrammi ehitamist voolu vektorist, milleks kõigepealt valime amprite mõõtvahekorra. Siis paigutame amprite mõõtvahekorras voolu vektori suuruse $I = 10$ A horisontaalsuunas (lõik $OA = 10$ A valitud mõõtvahekorras). Läbides vooluringi vool tekitab selles omainduktsiooni elektromotoorse jõu, mille efektiivväärtuse E_L määrame valemiga (33):

$$E_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \cdot I = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0{,}0255 \cdot 10 = 80 \text{ V}.$$

Nagu juba selgitatud, jääb omainduktsiooni elektromotoorne jõud voolust maha veerandperioodi võrra, kuna tema vektor jääb voolu vektorist maha 90°-se nurga võrra. Seepärast paigutame teda mahajäämise suunas, s. t. ajanäitaja osuti suunas voolu vektori suhtes. Valime voltide mõõtvahekorra.

Ehitame punktis O alla suunduva perpendikulaari vektorile OA ja saadud suunas paigutame vektori E_L valitud mõõtvahekorras (lõik $OB = 80$ V valitud mõõtvahekorras). Antud voolutugevuse $I = 10$ A saamiseks meie vooluringis on vaja sellele anda pinget, mis, nagu varemalt selgitatud, osalt kulutatakse vooluringis esineva takistuse R ületamiseks, osalt aga omainduktsiooni elektromotoorse jõu kompenseerimiseks. Pinge esimene osa, aktiivne pinge U_a võrdub $U_a = I \cdot R = 10 \cdot 4 = 40$ V ja faasiliselt langeb ühte vooluga, järelikult tema vektor langeb ühte voolu vektori suunaga. Ehitame teda varemalt valitud voltide mõõtvahekorras (lõik $OC = 40$ V). Teine osa pingest, omainduktsiooni elektromotoorset jõudu kompenseeriv reaktiivne pinge U_L on võrdne elektromotoorse jõuga, kuid temale suunalt vastupidine ja kujutatakse seepärast vektoriga $OD = OB$. Siis mähisega ühendatud pinge U leitakse vektorite OC ja OD summana, OC-l ja OD-l kui parallelogrammi külgedel ehitatud diagonaalina OF. Mõõtes viimast voltidele valitud mõõtvahekorras, saame mähisega ühendatud pinge väärtuse $U = 90$ V.

Sama suurust võib leida ka täisnurkse kolmnurga seaduse alusel:

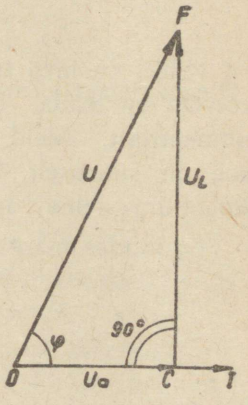
$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2} = \sqrt{40^2 + 80^2} \approx 90 \text{ V}.$$

Nurk AOF on pinge ja voolu vaheline faasi nihkenurk.

34. Iseloomustavad kolmnurgad.

Väga paljude ülesannete lahendamiseks pole vaja ehitada tervet joonisel 76 näidatud diagrammi; piisab küllaldaselt, kui ehitada ainult üks kolmnurk *OCF*, mis sisaldab kõikide pingete suurused (U, U_a, U_L) ja faaside nihkenurga φ. Niisugust kolmnurka nimetatakse pingete kolmnurgaks.

Joonestame selle kolmnurga eraldi (joon. 77). Ta on täisnurkne: nurk *OCF* on täisnurk. Pole muidugi tarvilik teda joonestada just selles asendis, nagu ta on näidatud joonisel 77; teda võib kujutada igas asendis, kuid ainult nii, et vektori U_a suunas asetsev vektor I moodustaks vektoriga U nurga φ ning et nurk φ asuks vektorist U ajanäitaja osuti suunas, kuna vool jääb pingest maha. Tuleb kindlalt teada selle pingete kolmnurga külgede nimetusi ja nende füüsikalist tähendust; seepärast veel kord loetleme neid.



Joon. 77.

Pingete kolmnurga hüpotenuusi nimetatakse kogupingeks (tarvitajaga ühendatud pingeks) ja märgitakse tähega U. Seda, meie vooluringiga ühendatud pinget näitab vooluringi klemmidega ühendatud voltmeeter.

Nurga φ juures asetsevat ja voolu suunaga ühte langevat kaatetit nimetatakse aktiivseks pingeks ja märgitakse tähega U_a. Seda pinget kulutatakse vooluringi takistuse ületamiseks ja tema suurus määratakse valemiga

$$U_a = I \cdot R.$$

Nurgale φ vastasasetsevat kaatetit nimetatakse reaktiivseks (ka induktiivseks) pingeks ja tähistatakse tähega U_L; seda pinget kulutatakse omainduktsiooni elektromotoorse jõu ületamiseks ja seepärast ta on viimasega arvuliselt võrdne, kuid suunalt vastupidine, s. t.

$$U_L = -E_L$$

või

$$U_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \cdot I.$$

Selgitame ühel näitel, kuidas võib pingete kolmnurka kasutada vahelduvvoolu ülesannete lahendamiseks.

Mähis, mille takistus $R = 5\ \Omega$, on ühendatud vahelduvvoolu võrguga, mille pinge $U = 120$ V, ja tarvitab voolu tugevusega $I = 8$ A. Määrata omainduktsiooni elektromotoorse jõu suurus ja faaside nihkenurk.

Joonestame pingete kolmnurga (mitte mõõtvahekorras, vaid vabalt) ja märgime ära ülesandega antud küljed. Antud on võrgu pinge, s: o. mähisega ühendatud pinge U ning seda kujutatakse teatavasti kolmnurga OCF hüpotenuusiga OF.

Edasi on teada andmed, millede najal on kerge määrata aktiivset pinget U_a, mida kujutab nurga φ juures asetsev kaatet (OC), nimelt:

$$U_a = I \cdot R = 8 \cdot 5 = 40 \text{ V}.$$

Nüüd on meil täisnurkne kolmnurk OCF, mille hüpotenuus OF ja kaatet OC on teada. Niisuguste kolmnurkade lahendamine on tuntud trigonomeetriast. Meid huvitab omainduktsiooni elektromotoorne jõud, kuid see on suuruselt võrdne reaktiivse pingega U_L, mille moodustab meie kolmnurga teine kaatet (kaatet CF). Määrame ta Pythagorase valemi abil.

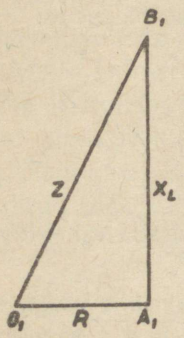
Loobudes märkidest, kirjutame:

$$E_L = U_L = CF = \sqrt{OF^2 - OC^2} = \sqrt{U^2 - U_a^2} =$$

$$= \sqrt{120^2 - 40^2} = 113 \text{ V}.$$

Selleks, et määrata nurka φ, võib kasutada igasugust trigonomeetrilist funktsiooni, näiteks $\sin \varphi = \frac{U_L}{U} = \frac{113}{120} = 0{,}941$, kust $\varphi = 70°$.

Sel viisil vahelduvvoolu ülesannete lahendamine koondub täisnurksete kolmnurkade lahendamisele. Nii pea kui on välja joonestatud pingete kolmnurk ja selgitatud selles ülesandega antud elemendid, astub elektrotehnika kõrvale ja teda asendab puhas matemaatika. Tuleb lahendada täisnurkne kolmnurk. See on suureks eemuseks, sest pole vaja tuupida pähe erilisi elektrotehnilisi valemeid suuruste vahekordade kohta; tuleb ainult kindlalt teada pingete kolmnurga külgede tähendusi ja nende füüsikalist mõtet, kuna nende vahelise vahekorra annab meile matemaatika täisnurkse kolmnurga elementide vahekorra näol.



Joon. 78.

Kuid vaatleme veel meie pingete kolmnurka (joon. 77). Vähendame pingete kolmnurga kõik küljed I korda (s. t. jagame kõik küljed voolutugevusega I); siis saame teise kolmnurga $O_1A_1B_1$ (joonis 78), mis on sarnane kolmnurgaga OCF (sest kõik tema küljed on võrdelised kolmnurga OCF külgedega). Vaatleme seda uut kolmnurka.

Tema nurgad on samasugused nagu pingete kolmnurgas (sarnastes kolmnurkades vastavad nurgad on võrdsed).

Kaatet O_1A_1 on saadud OC jagamisest I-ga, s. t.

$$O_1A_1 = \frac{OC}{I} = \frac{U_a}{I} = \frac{I \cdot R}{I} = R,$$

järelikult see kaatet kujutab endast takistust R.

Teine kaatet A_1B_1 on saadud reaktiivse pinge U_L jagamisest voolutugevusega:

$$A_1B_1 = \frac{CF}{I} = \frac{U_L}{I} = \frac{I \cdot \omega \cdot L}{I} = \omega \cdot L.$$

Nagu ülal märgitud, nimetatakse seda suurust reaktiivseks takistuseks ja märgitakse tähega x_L.

Hüpotenuus O_1B_1 on võrdne

$$O_1B_1 = \frac{OF}{I} = \frac{U}{I}.$$

See suurus on vastavalt avaldisele (36) vooluringi näivtakistuseks ja teda märgitakse tähega z.

Nii siis saadud kolmnurga kõik küljed omavad takistuste tähendust.

Seepärast kolmnurka $O_1A_1B_1$ nimetatakse takistuste kolmnurgaks.

Selgitame ühe näitega, kuidas võib lahendada ülesandeid, kasutades nüüd meile tuntud kolmnurki.

Näide 22. Mähis, mille aktiivne takistus on 10 Ω ja omainduktsiooni tegur 0,02 H, on ühendatud vahelduvvoolu võrguga pingega 110 V ja sagedusega 50 Hz. Leida mähise poolt tarvitatav voolutugevus.

Selguse saamiseks paneme antud olukorra lühidalt kirja.

Antud:

$$R = 10\ \Omega; \qquad U = 110\ \text{V};$$

$$L = 0{,}02\ \text{H}; \qquad f = 50\ \text{Hz}.$$

Leida I.

Ohmi seaduse järgi on $I = \frac{U}{z}$; kuid z pole antud, seepärast joonestame takistuste kolmnurga (joon. 78) ja märkame, et sellest võiks hõlpsalt leida z, kuid enne seda tuleb määrata x_L valemi (35) järgi:

$$x_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0{,}02 = 6{,}28\ \Omega,$$

ning edasi Pythagorase lause alusel

$$z = \sqrt{R^2 + x_L^2} = \sqrt{10^2 + 6{,}28^2} = 12{,}1\ \Omega,$$

kust

$$I = \frac{U}{z} = \frac{110}{12{,}1} = 9{,}1\ \text{A}.$$

VÕIMSUS. TARVITAJATE ÜHENDAMINE.

35. Vahelduvvoolu võimsus.

Olgu mingi induktiivsust ja aktiivset takistust sisaldav tarvitaja ühendatud 110 V vahelduvpingega ja tarvitagu ta selle mõjul vahelduvvoolu tugevusega 8,5 A, mis jääb pingest maha $^1/_6$ perioodi võrra ($\varphi = 60°$). Joonisel 79 on näidatud voolu ja pinge kõverad.

Niivõrd kui vool ja pinge on muutlikud, omab ka võimsus mitmesugustel momentidel mitmesuguseid momentväärtusi, mida võib määrata tuntud valemiga $N = u \cdot i$.

Voolu ja pinge momentväärtusi võib määrata valemitega

$$u = U_m \cdot \sin \alpha$$

$$i = I_m \cdot \sin (\alpha - \varphi),$$

kus

$$U_m = U \cdot \sqrt{2} = 110 \cdot 1{,}41 = 155{,}1 \text{ V}$$

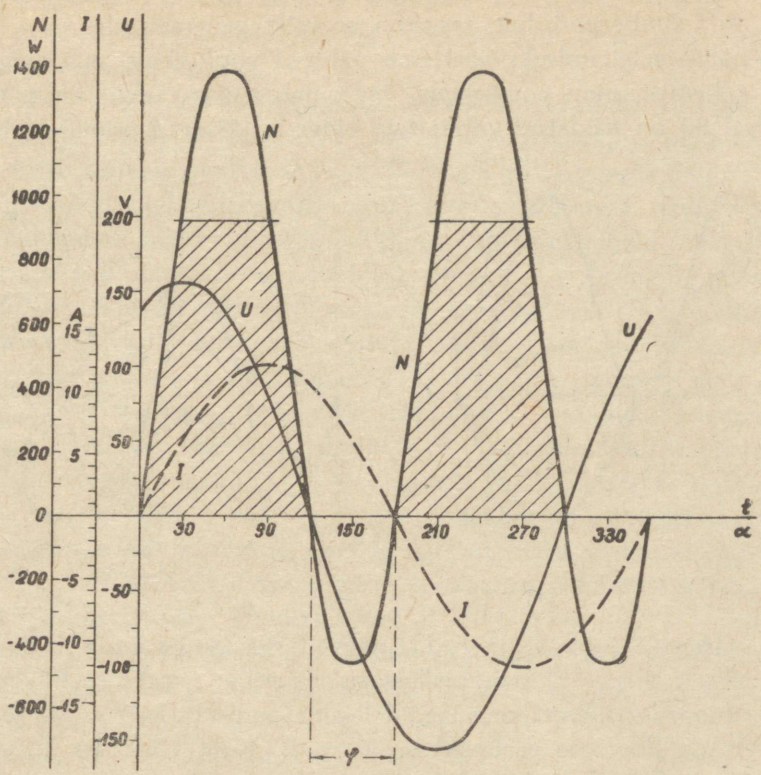
ning

$$I_m = I \cdot \sqrt{2} = 8{,}5 \cdot 1{,}41 = 12 \text{ A}.$$

Need väärtused on toodud alljärgnevas tabelis:

$\alpha = \omega \cdot t$	u	i	$N = u \cdot i$
0	+ 134	0	0
30	+ 155	+ 6,0	+ 930
60	+ 134	+ 10,4	+ 1394
90	+ 77,5	+ 12,0	+ 930
120	0	+ 10,4	0
150	− 77,5	+ 6,0	− 465
180	− 134	0	0
210	− 155	− 6,0	+ 930
240	− 134	− 10,4	+ 1394
270	− 77,5	− 12	+ 930
300	0	− 10,4	0
330	+ 77,5	− 6,0	− 465
360	+ 134	0	0

Tabeli andmete alusel on ehitatud võimsuse kõver joonisel 79.



Joon. 79.

Vaadeldes seda kõverat on kerge järeldada järgmist.

1) Võimsuse kõver on samuti perioodiline kõver.

2) Võimsuse kõver omab kaht tervet perioodi, samal ajal kui vool ja pinge omavad kumbki ainult üht perioodi (tõepoolest, võimsuse kõveral on 2 positiivset maksimumi, 2 negatiivset maksimumi ja 4 nullväärtust), teiste sõnadega — võimsuse muutumise sagedus on kaks korda suurem pinge või voolu muutumise sagedusest.

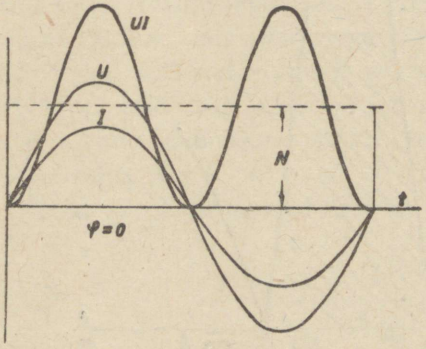
3) Mõningatel ajamomentidel omab võimsus negatiivset väärtust.

Viimane järeldus vajab teatavat selgitust. Tõepoolest, kui vool või pinge omavad negatiivset väärtust, siis seda tuleb mõista nii, et vool voolab positiivseks peetud suunale vastu (ehk et pinge mõjub positiivseks loetud suunale vastupidiselt); kuid võimsus on töö ajaühiku vältel ning väljendus „negatiivne töö" on esimesel pilgul arusaamatu. Kuid see, puht-graafilisest

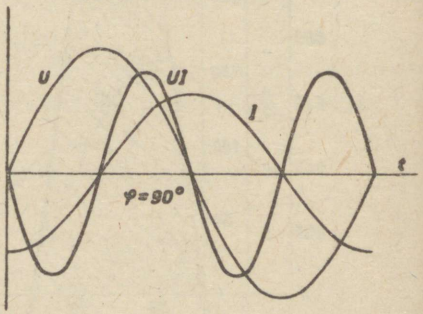
ehitamisest saadud järeldus omab lihtsat füüsikalist tähendust. Momentidel, kui võimsus omab negatiivset väärtust, tarvitaja ei võta generaatorilt antavat energiat, vaid ümberpöördult, tagastab energiat generaatorile.

Selle nähte selgitamiseks vaatleme nähteid vooluringis, mis omab ainult aktiivset takistust, ning vooluringis, mis omab ainult reaktiivset takistust.

Joonisel 80 on näidatud voolu i ja pinge u kõverad esimesele juhule.



Joon. 80.



Joon. 81.

Nagu varemalt juba selgitatud, langevad niisuguses vooluringis vool ja pinge faasiliselt ühte. Ehitame sellele graafikule ka võimsuse kõvera antud juhuks. Võimsuse kõvera ordinaadid leiame endiselt, korrutades omavahel pinge ja voolu kõverate vastavad ordinaadid. Kõik võimsuse kõvera ordinaadid on paigutatud pealepoole horisontaaltelge, kuna võimsuse väärtused on positiivsed kogu perioodi vältel. Tõepoolest, voolu ja pinge ordinaadid on kogu aja ühemärgilised, nad mõlemad on perioodi esimese poole vältel positiivsed ning samuti mõlemad on perioodi teise poole vältel negatiivsed; nii sel kui ka teisel juhul nende korrutis jääb positiivseks. See tähendab, et ainult aktiivse takistusega vooluring kogu aja võtab energiat generaatorist.

Tõepoolest, mingis takistuses R elektri energia muundub termiliseks energiaks ja kiirgub ruumi sõltumatult voolu suunast.

Nüüd vaatleme vooluringi, mis omab ainult induktiivset takistust, näiteks väga suure keerdude arvuga ja suure juhtme ristlõikega mähist.

Sel juhul voolutugevus vooluringis on faasiliselt nihutatud vooluringiga ühendatud pinge suhtes nurga $\varphi = 90°$ võrra mahajäämise suunas.

Vastavad kõverad i ja u on näidatud joonisel 81. Samal joonisel on näidatud ka võimsuse N kõver, mille ordinaadid endiselt on võrdsed pinge u ja voolu i kõverate ordinaatide korrutisega.

Võimsuse kõvera ordinaadid muudavad oma märgi. Nad on positiivsed, kui voolutugevuse ja pinge suunad langevad ühte (teine ja neljas veerand), ning on negatiivsed, kui vool ja pinge on suunatud üksteisele vastupidiselt (esimene ja kolmas veerand).

Vaatleme nähteid vooluringis alates sellest momendist, kui vool nullväärtusest hakkab kasvama positiivse maksimumi suunas. Voolu tekkimisel mähises tekib viimase ümber magnetväli, mille tekitamiseks kulutatakse generaatorilt vooluringile antavat energiat; kuid saavutanud maksimumi, vool hakkab kahanema, mähise ümber tekkinud magnetväli hakkab kaduma, sellesse kogunenud energia vabaneb ning antakse vooluringilt generaatorile, sest kaduv magnetväli indutseerib mähises omainduktsooni elektromotoorset jõudu, mis teatavasti voolu kahanemisel püüab teda alal hoida (aitab generaatorit tekitada voolu vooluringis, s. t. mähis ise muutub sel ajal generaatoriks, andes temasse magnetvälja tekkimise ajal kogutud energiat). Neil momentidel järelikult mähis mitte ainult ei võta generaatorilt energiat, vaid annab energiat generaatorile, s. t. vooluringis toimub energia negatiivne kulutamine ning seepärast ongi võimsus negatiivne. Tähendab, vooluringis toimuvad protsessid on seotud energia katkestamatu võnkumisega generaatorilt tarvitajale (mähisele) magnetvälja tekitamise ajal, ning tarvitajalt tagasi generaatorile magnetvälja kadumise ajal.

Tulemusena energia kogukulu sellises vooluringis on võrdne nulliga. Kuid see on õige ainult sel juhul, kui aktiivne takistus on niivõrd väike, et teda võib jätta tähele panemata.

Praktikas niisuguseid vooluringe me ei leia.

Vooluring omab alati teatavat aktiivset takistust ning siis on meil tegemist joonisel 79 vaadeldud juhuga. Reaktiivse takistuse olemasolu tagajärjel toimub siin ka energia tagastamine generaatorile magnetvälja kadumise vältel.

Kuid võib hõlpsalt märgata, et generaatorile ei tagastata mitte kogu vooluringis kulutatud energiat: tagastatakse ainult see osa, mis vabaneb magnetvälja kadumisel, kuna energiat, mis kulub vooluringi juhtmete soojendamiseks või mingisuguseks muuks tööks, ei tagastata. Näiteks kui vooluringi on lülitatud mingit mehaanilist tööd teostav elektrimootor, siis mootori pöörlemiseks kulutatud energiat enam ei tagastata ja seda tuleb lugeda vooluringis jäägita kulutatuks. Vastavalt sellele võib ka võimsust jagada kahte ossa: võimsus, mis on vajalik magnetvälja tekitamiseks, mis teatud momentidel (magnetvälja kadumise ajal) on negatiivne, s. t. tagastatakse generaatorile, ning võimsus, mis on vooluringis jäägita kulutatud, mida generaatorile enam ei tagastata. Võimsuse kõverast (joon. 79) võib hõlpsalt märgata, et võimsuse positiivsed ordinaadid on negatiivsetest suuremad, ning

kui positiivsest osast lõigata ära negatiivsetele võimsustele võrdsed ülemised osad, siis ülejäänud võimsuse kõvera osa annabki meile kujutluse vooluringis jäägita kulutatud võimsusest. Vooluringis jäägita kulutatud võimsust nimetatakse aktiivseks võimsuseks (ka vattvõimsuseks, tegevvõimsuseks); nagu juba märgitud, kulutatakse seda võimsust soojendamiseks ja mingisuguse töö tegemiseks. Võimsuse teist osa tavaliselt nimetatakse reaktiivseks võimsuseks (ka vatitavõimsuseks). See võimsus on seotud magnetvälja tekkimisega ja kadumisega ning seda vooluringis täielikult ei kulutata, vaid kord võetakse generaatorilt, kord tagastatakse temale.

Järelikult, määrates energia kulu vooluringis tuleb võtta arvesse ainult vooluringi aktiivses takistuses kulutatavat aktiivset võimsust.

Vahelduvvoolu energia kulu mingis aktiivses takistuses R on juba arvutatud punktis 29. Seal me selgitasime, et energia kulu ühe perioodi vältel võrdub:

$$A = \int_0^T i^2 \cdot R \cdot dt.$$

Väljendades seda energia kulu voolutugevuse efektiivse väärtuse kaudu, saime samas punktis toodud valemi

$$A = I^2 \cdot R \cdot T.$$

Kõverate vaatlusest joonistel 80 ja 81 järgneb, et joonisel 80 toodud graafikule vastav energia kulu vooluringi aktiivsele takistusele võrdub kogu energia kuluga ühe perioodi vältel, kuna joonisel 81 toodud graafikule vastav energia kulu, mida tuleks arvesse võtta induktiivse takistuse olemasolu puhul vooluringis, võrdub, nagu eespool selgitatud, nulliga.

Teades kogu energia kulu perioodi vältel, võib leida keskmist võimsust sellel ajavahemikul, jagades energia kulu ajaga:

$$N = \frac{A}{T},$$

$$N = I^2 \cdot R. \qquad (37)$$

Avaldame nüüd saadud keskmise võimsuse valemi vooluringiga ühendatud pinge ja voolutugevuse kaudu.

Viime valemisse (37) aktiivse takistuse

$$U_a = I \cdot R;$$

siis

$$N = \cdot .lU$$

Pingete kolmnurgast järgneb:

$$U_a = U \cdot \cos \varphi.$$

Asetades selle avaldise võimsuse valemisse, saame lõplikult:

$$N = U \cdot I \cdot \cos \varphi. \tag{38}$$

See on kõige üldisem valem võimsuse arvutamiseks vahelduvvoolu ringis.

Nii siis võimsuse keskmine väärtus ühe perioodi vältel ja ühtlasi ka aktiivse võimsuse keskmine väärtus samal ajavahemikul võrdub voolu ja pinge efektiivsete väärtuste ja faasi nihkenurga koosinuse korrutisega. Seda suurust nimetatakse vahelduvvoolu tegevvõimsuseks ehk aktiivseks võimsuseks.

Cos φ esineb võimsuse valemis teatava tegurina ja teda nimetatakse võimsusteguriks.

Juhul kui vooluringis esineb puht-aktiivne takistus ja tema induktiivsus on niivõrd väike, et temaga võib mitte arvestada (näiteks vooluringi lülitatud hõõglambid), siis $\varphi = 0$, järelikult cos $\varphi = 1$ ning võimsuse valem omandab järgmise kuju:

$$N = U \cdot I. \tag{39}$$

Kui aga vooluringi aktiivne takistus on võrreldes reaktiivse takistusega väga väike ning teda võiks jätta arvestamata (näiteks, kui vooluringi on lülitatud väga jämedast traadist mähis väikese R-ga, kuid väga suure L-ga), siis $\varphi \approx 90°$, cos $\varphi \approx 0$, järelikult $N \approx 0$, s. t. et vooluring energiat peaaegu ei kulutagi.

Reaktiivse pinge korrutist voolutugevusega nimetatakse reaktiivseks võimsuseks:

$$N_b = U_L \cdot I.$$

Pingete kolmnurgast nähtub, et

$$U_L = U \cdot \sin \varphi,$$

kust

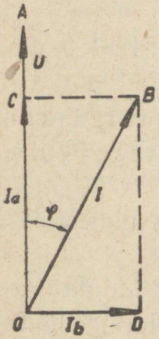
$$N_b = U \cdot I \cdot \sin \varphi. \tag{40}$$

Ja lõpuks kogupinge korrutist voolutugevusega nimetatakse näivvõimsuseks:

$$N_s = U \cdot I. \tag{41}$$

Kuna ei reaktiivne võimsus ega ka näivvõimsus ei võimalda määrata energia kulu vooluringis, nähtub, et „võimsuseks" on nad nimetatud ainult leppeliselt. Erinevusena vattides mõõdetavast aktiivsest võimsusest, mõõdetakse reaktiivset ja näivvõimsust voltamprites.

Olgu vahelduvvoolu ringiga ühendatud mingi pinge U, mis tekitab vooluringis pingest faasiliselt teatava nurga φ võrra mahajäävat voolu I. Vektordiagramm omab joonisel 82 näidatud kuju, kus OA — pinge U vektor ning OB — temast nurga φ (AOB) võrra mahajääv voolu I vektor. Jagame voolu vektori kaheks osaks: I_a — ühesuunaline pingega (vektor OC), ja I_b — perpendikulaarne pingele (vektor OD). Esimest, pingefaasiga ühte langevat osa nimetatakse aktiivseks vooluks (ka vattvooluks) kuna teist pingefaasist veerandperioodi võrra erinevat osa nimetatakse reaktiivseks vooluks (ka vatitavooluks). Kolmnurka COB nimetatakse voolude kolmnurgaks. Võib hõlpsalt märgata, et aktiivne vool (nurga φ juures asuva kaatetina) võrdub



Joon. 82.

$$I_a = I \cdot \cos \varphi , \qquad (42)$$

kuna reaktiivne vool (nurga φ vastaskaatetina)

$$I_b = I \cdot \sin \varphi . \qquad 43)$$

Muidugi vooluringis voolab tegelikult ainult üks vool (koguvool) I, ja tema suurust näitavad ampermeetrid; kuid reaktiivse ja aktiivse voolu mõisted lihtsustavad tunduvalt väga mitmete vahelduvvoolu ringides esinevate nähete matemaatilist tõlgitsust.

Võimsuse valemis

$$N = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

avaldis $I \cdot \cos \varphi$ ongi aktiivne vool.

Reaktiivse võimsuse valemis

$$N_b = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

avaldis $\cdot \sin \varphi$ on reaktiivne vool.

36. Võimsustegur ja selle tähtsus kaasaegses tööstuses.

Alalisvoolu ringis võimsus määratakse pinge ja voolutuge vuse korrutisena ning seepärast tema mõõtmiseks piisab voltmeetrist ja ampermeetrist: vahelduvvoolu ringis aga nende mõõteriistade hälvete korrutis annab meile ainult

näivvõimsuse, kuna tegev- ehk aktiivse võimsuse saamiseks on vaja teada veel võimsusteguri cos φ väärtust, mis erijuhuna ainult puhtaktiivse takistusega vooluringides võrdub ühega. Üldiselt aga on cos φ väiksem kui üks, ning järelikult vahelduvvoolu ringi võimsuse määramiseks vajatakse vattmeetrit või lisaks ampermeetrile ja voltmeetrile veel nn. faasimõõtjat (cos φ mõõtjat), mis vahenditult näitab kas võimsusteguri suurust või faasi nihkenurga suurust, millest võib väga hõlpsalt määrata cos φ.

Valemist (38) järgneb, et

$$\cos \varphi = \frac{N}{U \cdot I} = \frac{N}{N_s}. \qquad (44)$$

Viimane avaldis annab cos φ-le teguri kuju, mis näitab suhet tegevvõimsuse ja näivvõimsuse vahel (näitab, mitu korda on tegevvõimsus näivvõimsusest väiksem).

Võimsustegur omab väga suurt tähtsust kaasaegses tööstuses, mida selgitame järgmise näitega. Näide on vähe liialdatud selleks, et järeldused omaksid suuremat näitlikkust.

Olgu kaks tarvitajat (näiteks kaks tehast), kusjuures mõlemad töötavad ühesuguse pingega

$$U = 6000 \text{ V};$$

mõlemal tarvitajal on üles seatud voolumõõtjad, millede järgi teostatakse arvete õiendamist elektrijaamaga saadud energia hulga eest. Näidaku mõlemad voolumõõtjad teatud ajavahemiku (näiteks ühe kuu möödumisel) 250 töötunni eest ühesuurust energia kulutamist:

$$t = 250 \text{ tundi},$$

$$A = 120\,000 \text{ kWh}.$$

Peale selle on teada, et mõlema tarvitaja võimsustegurid, millega nad töötasid, pole ühesugused:

$$\cos \varphi_1 = 0{,}8; \quad \cos \varphi_2 = 0{,}4.$$

Eeldusel, et elektrienergia tariif on mõlemale tarvitajale ühesugune, näiteks 2 kop. ühe kWh eest, nad maksavad kulutatud energia eest ühe ja sama summa:

$$120\,000 \cdot 0{,}02 = 2400 \text{ rbl.},$$

kusjuures keskmine tarvitatav võimsus on ka ühesugune:

$$N = \frac{A}{t} = \frac{120\,000}{250} = 480 \text{ kW}.$$

Kuid esimese ja teise tarvitaja poolt tarvitatavad voolud pole ühesugused. Valemi (38) kohaselt $N = U \cdot I \cdot \cos \varphi$, kust:

$$I = \frac{N}{U \cdot \cos \varphi},$$

$$I_1 = \frac{480 \cdot 1000}{6000 \cdot 0{,}8} = 100 \text{ A}, \quad I_2 = \frac{480 \cdot 1000}{6000 \cdot 0{,}4} = 200 \text{ A}.$$

Siit võime juba teha esimese järelduse.

Järeldus nr. 1. Madala võimsusteguriga (0,4) töötav tarvitaja pole jaamale kasulik, kuna sama tasusumma puhul ta tarvitab kaks korda suuremat voolu kui kõrgema võimsusteguriga (0,8) tarvitaja.

Nüüd vaatleme jõujaama.

Olgu jõujaamas üles seatud generaator nimipingega 6600 V ja nimivooluga 1000 A.

Järelikult tema näivvõimsus

$$N_s = 6600 \cdot 1000 = 6\,600\,000 \text{ VA} = 6600 \text{ kVA},$$

mis $\cos \varphi = 1$ juures annaks võimaluse arendada tegelikku võimsust $N = N_s \cdot \cos \varphi = 6600$ kW.

Oletame, et jõujaam projekteeriti eeldusel, et kõik tarvitajad töötavad keskmise võimsusteguriga 0,8; siis generaatori tegelik võimsus oleks olnud $N = 6600 \cdot 0{,}8 = 5280$ kW ja eeldusel, et generaatori kasutegur nimikoormusel $\eta = 0{,}96$, tingiks see generaatori rootorit ringiajava jõumasina võimsuse

$$N_{\text{jõum}} = \frac{5280}{0{,}96} = 5500 \text{ kW}.$$

Eeldusel, et generaatorit ja tarvitajat ühendavates juhtmetes kadumaminev võimsus moodustab 10% generaatori võimsusest, saame $\cos \varphi = 0{,}8$ juures tarvitajale antava tegeliku võimsuse:

$$N_{\text{tarv}} = \frac{5280}{1{,}1} = 4800 \text{ kW},$$

ning võimsuskadu juhtmetes $5280 - 4800 = 480$ kW.

Arvutame, mitu tarvitajat võiks generaator toita ilma ülekoormuseta.

Nii generaatori kui ka igasuguse teise elektrimasina maksimaalne kestev koormus on määratud maksimaalse voolutugevusega, mille juures mähiste soojenemine ei ületa veel isolatsioonile ohtlikku väärtust.

Antud juhul on see voolutugevus 1000 A. Kuna esimene tarvitaja tarvitab voolu $I_1 = 100$ A, ning teine tarvitaja $I_2 = 200$ A, siis tarvitajate arv, milliseid generaator võiks energiaga varustada, oleks: esimese tüübi puhul — kümme, teise tüübi puhul — viis.

Järeldus nr. 2. Mida madalam on tarvitaja võimsustegur, seda vähem niisuguseid tarvitajaid suudab generaator toita ilma ülekoormuseta.

Siit järgneb ka, et kui jõujaama generaatori võimsuse valik toimus eeldusel, et esimest tüüpi tarvitajate arv $n_1 = 10$ (tingimusel, et nad töötavad cos $\varphi = 0{,}8$-ga), ning tegeliku töötamise ajal selgus, et tarvitajad töötavad cos $\varphi = 0{,}4$-ga, siis jõujaam suudab toita ainult poolt kõikidest tarvitajatest ($n_2 = 5$), ning ülejäänud tarvitajaid elektrienergiaga varustada ei suuda. Arvesse võttes, et väga mitmed jõujaamad Nõuk. Liidus töötavad praegusel ajal peaaegu ilma reservita, selgub, et tarvitajate madala cos φ puhul jõujaamad ei suuda kõiki tarvitajaid rahuldada ning on sunnitud madala cos φ tõttu osa neist välja lülitama.

Määrame nüüd võimsuse, millist generaator annaks tarvitajaile:

$$N_{tarv\ 1} = n_1 \cdot N_1 = 10 \cdot 480 = 4800 \text{ kW};$$

$$N_{tarv\ 2} = n_2 \cdot N_2 = 5 \cdot 480 = 2400 \text{ kW}.$$

Järeldus nr. 3. Tarvitajate madala cos φ puhul on generaatori võimsus halvasti kasutatud (tõepoolest, normaalse 4800 kW võimsuse asemel generaator suudab teisel juhul tarvitajaile anda vaid poole oma võimsusest). Kui on soovitav, et jõujaam suudaks ka madala cos $\varphi = 0{,}4$ puhul rahuldada kõiki, s. t. 10 tarvitajat, siis peaks jõujaamas olema peale esimese veel teine sama suur generaator või üks uus kahekordsele voolutugevusele arvestatud generaator, mis oleks muidugi suurema koguga, kallim ja raskem.

Järeldus nr. 4. Generaatorite ühesuguse tegeliku võimsuse puhul madalama cos φ-ga töötav generaator omab suuremaid mõõte, on kallim ja raskem.

Generaatori kasuliku võimsuse vähendamine tingib tema kasuteguri halvenemist ja jõujaama energiakulu suurenemist (kütuse ülekulu näol).

Energia tarvitaja poolt tarvitatava voolutugevuse suurenemine cos φ halvenemise tagajärjel suurendab ka võimsuskadusid nii üleandva ja jaotava võrgu juhtmetes kui ka elektrimasinate mähistes. Juhtmete ristlõikeid tuleb suurendada, mis omakorda suurendab materjali kulu ja võrgu maksumust.

Vaadeldud järeldused tõendavad madala võimsusteguri negatiivset tähtsust kaasaegses jõumajanduses.

Kuid tarvitaja ei kannata peaaegu sugugi madala cos φ all. Juhtmete ristlõike suurendamine jaotusvõrgus pole kuigi suureks ülekulutuseks, kuna juhtmete pikkus voolumõõtjast kuni üksikute voolutarvitajateni pole suur.

Millest oleneb cos φ?

Takistuste kolmnurgast on selgesti näha, et φ on seda suurem ja järelikult cos φ on seda väiksem, mida suurem on reaktiivne takistus ja mida väiksem on aktiivne takistus. Kuid reaktiivne takistus antud sageduse puhul oleneb induktiivsusest; järelikult mida suurem on L ja mida väiksem on R, seda väiksem on cos φ, kusjuures L ja R olenevad kõigepealt tarvitaja iseloomust. Vaatleme põhitarvitajaid — lampe ja mootoreid. Lambid omavad väikest induktiivsust, kuid suhteliselt suurt aktiivset takistust, järelikult töötavad väga kõrge cos φ-ga, samal ajal aga mootorid, kujutades endast raudsüdamikkudele paigutatud mähiste süsteemi, omavad väga suurt induktiivsust, ning seepärast nende cos φ on üldiselt madalam kui lampidel.

Kuna tarvitaja on vähe huvitatud enda cos φ-st, siis selle huvi tõstmiseks võetakse tarvitusele eri tariifid. Nii näiteks tarvitaja töötamisel cos φ = = 0,8-ga maksab tarvitaja elektrienergia eest normaaltariifi alusel, töötamisel cos φ-ga üle 0,8 — tariifi veidi alandatakse, kuna töötamisel cos φ-ga alla 0,8 — tariifi suurendatakse.

Ettevõtte võimsusteguri parendamist võib saavutada:

1) seadmestiku, nagu ajamite, tööpinkide mootorite võimsuse, mootorite tüüpide, juhtimise viisi jne. õige valikuga;

2) tehnoloogilise protsessi õige planeerimisega, nii et see soodustaks mootorite töötamist täiskoormusega, väldiks tühijooksu jne.

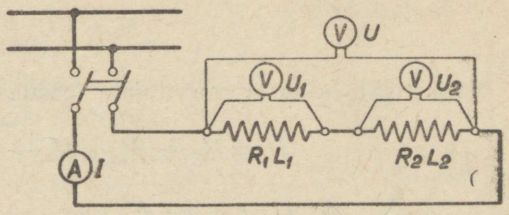
Kuid mõningad tarvitajad, sõltuvalt nende spetsiifilistest iseärasustest või ekspluatatsiooni iseärasustest, omavad „orgaaniliselt" madalat võimsustegurit (näiteks induktsioonahjud, vahelduvvoolu-keevitusseadmed jm.). Peale selle kõik ülalmainitud abinõud ei tõsta cos φ-d üle 0,8 ning seepärast veel kõrgema võimsusteguri saavutamiseks tarvitatakse eri seadmeid, nagu: kondensaatoreid, üleergutatud sünkroonmootoreid jm. Edaspidi me vaatleme võimsusteguri parendamisviisi kondensaatori abil.

37. Tarvitajate järjestikku-lülitus.

Olgu lülitatud järjestikku kaks tarvitajat aktiivsete takistustega R ja induktiivsustega L (joon. 83).

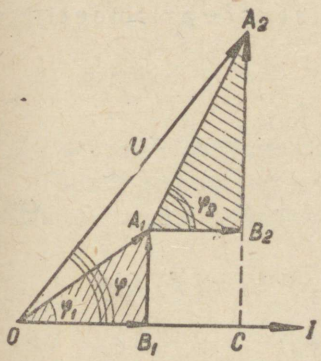
Mõlemaid tarvitajaid läbib sel juhul üks ja sama vool I. Kõigi tarvitajate kogupinge on võrdne üksikute osade pingete summaga; kuna aga üksikpinged U_1, U_2 pole omavahel faasis üksikute osade R ja X_L suhete

erinevuse tõttu, siis see pole mitte algebraline, vaid geomeetriline summa, s. t. järjestikku lülitatud tarvitajate üksikpinged liituvad omavahel geomeetriliselt. Niisugune liitmine on teostatud joonisel 84.



Joon. 83.

Diagrammi ehitamise järjekord on järgmine. Ehitame voolu I vektori vabalt valitud suunas, (näiteks horisontaalses suunas, nagu see on näidatud joonisel 84); edasi ehitame esimese tarvitaja pingete kolmnurga, milleks punktist O voolu vektori suunas joonestame lõigu OB_1, mis kujutab voltide jaoks valitud mõõtvahekorras aktiivse pinge U_{a_1} vektorit. Teatavasti on see faasis voolu vektoriga. Siis, püstitades punktis B_1 perpendikulaari joonele OB_1, joonestame sellele lõigu B_1A_1 — esimese tarvitaja reaktiivse pinge U_{L_1} vektori; viimane teatavasti on perpendikulaarne voolu vektoriga ja jookseb temast 90° võrra ette. Ühendades omavahel punktid O ja A_1, saame vektori OA_1 — esimese tarvitaja klemmipinge U_1 vektori. Punktist A_1 alates ehitame teise tarvitaja pingete kolmnurga $A_1B_2A_2$, suunates tema aktiivse pinge U_{a_2} vektorit A_1B_2 paralleelselt voolu vektoriga ning tema reaktiivse pinge U_{L_2} vektorit B_2A_2 — perpendikulaarselt voolu vektorile. Teise tarvitaja klemmipinge vektorit U_2 kujutab siis vektor A_1A_2, kuna mõlema tarvitaja kogupinge (võrgupinge) vektorit kujutab vektor OA_2.



Joon. 84.

Diagrammist nähtub, et järjestikku-lülituse puhul aktiivsed pinged liituvad omavahel algebraliselt.

Tõepoolest —

$$OC = U_a = OB_1 + B_1C = OB_1 + A_1B_2 = U_{a_1} + U_{a_2}.$$

Reaktiivsed pinged liituvad samuti algebraliselt. Tõepoolest —

$$CA_2 = U_L = CB_2 + B_2A_2 = B_2A_1 + B_2A_2 = U_{L_1} + U_{L_2}.$$

Vaadeldes üldist kolmnurka OCA_2, võime kirjutada Pythagorase lause alusel:

$$OA_2 = \sqrt{OC^2 + CA_2^2}$$

ehk

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2}. \tag{45}$$

Järjestikku-lülitatud tarvitajate igasuguse arvu n puhul pinged võrduvad:

$$U_a = U_{a_1} + U_{a_2} + U_{a_3} + \ldots\ldots + U_{a_n} \tag{46}$$

$$U_L = U_{L_1} + U_{L_2} + U_{L_2} + \ldots\ldots + U_{L_n}. \tag{47}$$

Kirjutades valemit (46) teisiti, saame:

$$I \cdot R = I \cdot R_1 + I \cdot R_2 + I \cdot R_3 + \ldots\ldots, + I \cdot R_n,$$

kust koondades I saame:

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots\ldots + R_n, \tag{48}$$

s. t. järjestikku-lülituse puhul kogu aktiivne takistus võrdub üksikute osade aktiivsete takistuste aritmeetilise summaga.

Talitades samal viisil valemiga (47), saame:

$$I \cdot x_L = I \cdot x_{L_1} + I \cdot x_{L_2} + I \cdot x_{L_3} + \ldots\ldots + I \cdot x_{L_n}$$

ehk

$$x_L = x_{L_1} + x_{L_2} + x_{L_3} + \ldots\ldots + x_{L_n} \tag{49}$$

ehk

$$2 \cdot \pi \cdot f \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_1 + 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_2 + 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_3 +$$

$$+ \ldots\ldots + 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_n;$$

koondades $2 \cdot \pi \cdot f$ saame:

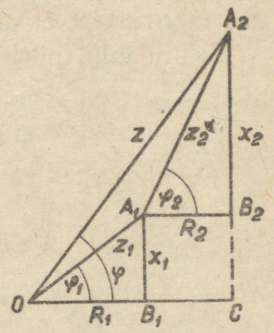
$$L = L_1 + L_2 + L_3 + \ldots\ldots + L_n,$$

s. t. järjestikku-lülituse puhul nii reaktiivsed takistused kui ka induktiivsused liituvad aritmeetiliselt.

Näivtakistusi aga aritmeetiliselt liita ei saa.

Kogu näivtakistuse graafiliseks määramiseks tuleb ehitada joonisel 85 näidatud takistuste diagramm.

Asetame vabaltvalitud suunas lõigu OB_1, mis mingis mõõtvahekorras võrduks esimese tarvitaja aktiivse takistusega R_1. Püstitame punktist B_1 perpendikulaari ja joonestame sellele lõigu B_1A_1, mis võrduks varemalt valitud mõõtvahekorras esimese tarvitaja induktiivse takistusega x_{L_1}. Ühendades omavahel punktid O ja A_1, saame lõigu OA_1, mis võrdub esimese tarvitaja näivtakistusega z_1. Kolmnurk OA_1B_1 moodustab seega esimese tarvitaja takistuste kolmnurga. Samal viisil ehitame ka teise tarvitaja takistuste kolmnurga $A_1A_2B_2$, kusjuures teise tarvitaja aktiivsed ja induktiivsed takistused tuleb joonestada samades suundades nagu esimese tarvitaja vastavad takistused. Lõik A_1A_2 kujutab teise tarvitaja näivtakistust z_2. Mõlema tarvitaja kogu näivtakistus võrdub üksikute tarvitajate näivtakistuste z_1 ja z_2 geomeetrilise summaga ning kujundub antud mõõtvahekorras lõiguna OA_2.



Joon. 85.

Diagrammist nähtub, et terve vooluringi kogu aktiivne takistus R võrdub üksikute tarvitajate aktiivsete takistuste R_1 ja R_2 algebralise summaga:

$$OC = OB_1 + B_1C$$

$$R = R_1 + R_2,$$

nagu see oli juba varemalt tõestatud valemiga (48).

Täpselt samuti terve vooluringi kogu induktiivne takistus x_L võrdub ka üksikute tarvitajate induktiivsete takistuste x_{L_1} ja x_{L_2} summaga:

$$CA_2 = CB_2 + B_2A_2$$

$$x_L = x_{L_1} + x_{L_2},$$

mis vastab valemile (49).

Terve vooluringi kogu näivtakistuse leiame kolmnurgast OA_2C

$$z = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (x_{L_1} + x_{L_2})^2}$$

ehk tarvitajate igasuguse arvu puhul

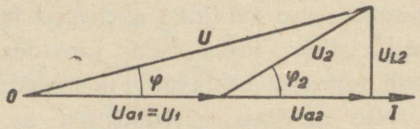
$$z = \sqrt{(\Sigma R)^2 + (\Sigma x_L)^2}.$$

Takistuste kolmnurk OA_2C võimaldab leida faasi üldnihkenurga φ. Näiteks:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{CA_2}{OC} = \frac{\Sigma x_L}{\Sigma R}.$$

Huvitav on praktikas sagedasti esinev järjestikku-lülituse erijuhtum, kus üks takistustest ei oma induktiivsust.

Sellise juhu pingete diagramm on näidatud joonisel 86.



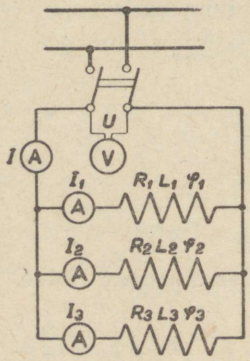
Joon. 86.

Niivõrd, kui $x_{L_1} = 0$ ja $U_{L_1} = 0$, muundub siin esimese tarvitaja pingete kolmnurk üheks sirgjooneks U_{a_1}.

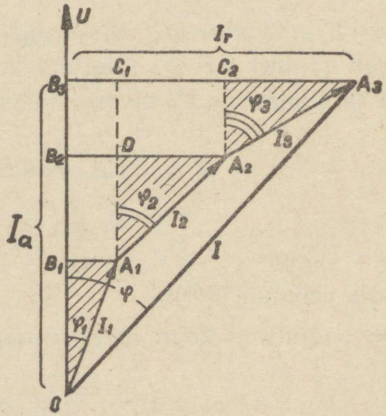
Soovitame õpilastele seda diagrammi enestel läbi uurida.

38. Tarvitajate paralleel-lülitus.

Tarvitajate paralleel-lülituse skeem on toodud joonisel 87, kuna selle juhu voolude vektordiagramm on näidatud joonisel 88.



Joon. 87.



Joon. 88.

Paralleel-lülituses pinge kõikides harudes on üks ja sama (vektordiagrammil on selle pinge vektor kujutatud vertikaalselt), seepärast kõikide

harude aktiivsed voolud kujunduvad vektoritena, mis on paralleelsed selle pinge vektoriga:

$$OB_1 = I_{a_1} \; ; \; A_1D = B_1B_2 = I_{a_2}$$

jne. (sest aktiivsed voolud faasilt ühtuvad pingega).

Kuid reaktiivsed voolud

$$B_1A_1 = B_3C_1 = I_{r_1} \; ; \; DA_2 = C_1C_2 = I_{r_2}$$

jne. kujunduvad pinge vektoritele perpendikulaarsete ja sellest ajanäitaja osuti suunas nihutatud vektoritena (sest need jäävad pingest maha veerandperioodi võrra). Üksikute harude voolude kolmnurgad on diagrammil näidatud viirutatult.

Diagrammist saame:

$$OB_1 + B_1B_2 + B_2B_3 = OB_3 \text{ või } I_{a_1} + I_{a_2} + I_{a_3} = I_a \qquad (50)$$

ja

$$B_1A_1 + DA_2 + C_2A_3 = B_3A_3 \text{ või } I_{r_1} + I_{r_2} + I_{r_3} = I_r, \qquad (51)$$

s. t. paralleel-lülituses nii aktiivsed kui ka reaktiivsed voolud liituvad algebraliselt. Kuid üldvoolud $I_1(OA_1)$; $I_2(A_1A_2)$; $I_3(A_2A_3)$ liituvad geomeetriliselt ja nende resulteeriv vektor OA_3 võrdub kogu vooluringi üldvooluga I (vooluga vooluringi hargnemata osas), s. t. esimest Kirchhoff'i seadust vahelduvvoolu ringile võib formuleerida samuti nagu alalisvoolu ringilegi, kuid voolude summa peab olema geomeetriliseks summaks.

Kuna

$$U_1 = U_2 = U_3 = U,$$

siis

$$I_1Z_1 = I_2Z_2 = I_3Z_3,$$

kust

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{Z_2}{Z_1}; \quad \frac{I_2}{I_3} = \frac{Z_3}{Z_2} \text{ jne.}; \qquad (52)$$

voolud üksikutes harudes on pöördvõrdelised nende harude näivtakistustega.

Üldvoolu leidmiseks on kõige lihtsam lahendada täisnurkne kolmnurk OB_3A_3:

$$OA_3 = \sqrt{OB_3^2 + B_3A_3^2} \text{ või } I = \sqrt{I_a^2 + I_r^2},$$

kus I_a ja I_r leitakse valemite (50) ja (51) abil. Faaside üldnihkenurga φ leidmiseks võib kasutada selle kolmnurga igasugust trigonomeetrilist funktsiooni, näiteks:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{I_r}{I_a}.$$

Juhul kui mõningad paralleelselt lülitatud tarvitajaist osutuvad puhtaktiivseteks takistusteks (s. t. nende $L = O$), siis diagramm lihtsustub, kuna nende voolude kolmnurgad muutuvad U-le paralleelseteks sirgeteks I_a.

39. Mahtuvusega vahelduvvoolu ring.

Kui ühendada mingi isoleeritud juhe generaatori (näiteks, alalisvooludünamomasina või akumulaatorpatarei) ühe klemmiga, siis juhtmes tekib lühiaegne vool (nõndanimetatud laadimisvool), ja juhe omandab teatava elektrilise laengu, mis on positiivne, kui juhe on ühendatud generaatori positiivse poolusega, ning on negatiivne, kui juhe on ühendatud generaatori negatiivse poolusega, ning mille suurus on võrdeline potentsiaali suurusega generaatori klemmidel, s. t.

$$Q = C \cdot U. \tag{53}$$

Tegur C iseloomustab juhtme võimet elektrilise laengu vastuvõtmiseks.

Elektri hulk, millist juhe võtab vastu tema laadimisel kuni potentsiaalini 1 volt, nimetatakse selle juhtme mahtuvuseks.

Kui juhe on laetud potentsiaalini 1 volt ($U = 1$ V), siis valemi (53) kohaselt:

$$Q = C,$$

s. t. tegur C osutub juhtme mahtuvuseks.

Juhtme mahtuvust mõõdetakse eriliste mõõtühikutega, mida nimetatakse faraditeks.

Üks farad on sellise juhtme mahtuvus, mis elektri hulgaga üks kulon laetakse potentsiaalini 1 V.

See mõõtühik on väga suur ja seepärast tehnikas kasutatakse palju väiksemat mõõtühikut, mida nimetatakse mikrofaradiks ja mis on 10^{-6} faradit.

Juhtme mahtuvus oleneb tema mõõtudest, kujust, teda ümbritsevatest juhtmetest ja dielektrikust, millega antud juhe on nendest isoleeritud. Juhul kui on vaja suurt mahtuvust, kasutatakse erilisi riistu, mida nimetatakse kondensaatoriteks. Vaatleme nõndanimetatud lamedat kondensaatorit.

Tema ehitus on väga lihtne. Kaks õhukest metallplaati (kõige sagedamini inglistinafooliumist) on eraldatud üksteisest mingi dielektriku (tavaliselt mingi isoleeriva ainega immutatud paberi) õhukese kihiga.

Kondensaatori laadimisel üks tema plaatidest on ühendatud generaatori ühe klemmiga, kuna teine kas ühendatakse teise klemmiga või maandatakse (ühendatakse maaga). Kui generaatori klemmidel on teatav potentsiaal ning siselülitamise momendil kondensaatoril polnud mingisugust laengut, s. t. potentsiaalid tema plaatidel võrdusid nulliga, siis kondensaatori plaate ja

generaatori klemme ühendavates juhtmetes tekib vool, mille tugevus oleneb potentsiaalide vahest klemmidel, kus on generaatori potentsiaal, ja plaatidel kus potentsiaal võrdub nulliga; see vool kestab nii kaua, kuni kondensaatori plaadid on laetud potentsiaalidega, mis on võrdsed nendega ühendatud generaatori klemmide potentsiaalidega.

Üks plaat omab siis positiivset potentsiaali, teine — negatiivset. Plaatide vahel tekib potentsiaalide vahe, s. t. kondensaatori klemmidel tekib mingisugune, generaatori pingele vastupidises suunas töötav pinge.

Kui nüüd lahutada generaator ja kondensaatori plaadid ühendada omavahel mingi juhtmega, siis pinge kondensaatori klemmidel tekitab lühiaegset voolu (tühjendamisvoolu), mis püsib nii kaua, kuni plaatide potentsiaalid ühtlustuvad. Seda nähet nimetatakse kondensaatori tühjendamiseks.

Kui kondensaatori laadimisel tema plaatidel tekib väga suur pinge, siis selle mõjul kondensaatori plaate eraldava dielektriku elektronid võidakse kiskuda eemale nende aatomitest, s. t. nad muutuvad vabadeks elektronideks ja siirduvad positiivse potentsiaaliga plaadi poole; dielektrikus tekib elektri vool ja ta muutub seetõttu juhiks ning kondensaator tühjeneb. Pärast seda kõikidel tahketel dielektrikutel isoleerivad omadused enam ei taastu ning kondensaator osutub rikutuks, nagu öeldakse „läbilööduks" Seepärast iga kondensaatorit võib laadida kindlaksmääratud, tavaliselt tema sildil märgitud pingeni. „Läbilöögi-pinge" suurus oleneb dielektriku paksusest ja materjalist. Äsja kirjeldatud nähet nimetatakse „dielektriku läbilöögiks".

Vaatleme kondensaatori vahelduvvoolu ringisse sisselülitamisel esinevaid nähteid. Kuna pinge sel juhul on muutlik suurus, mis teatavail momentidel omab nullväärtusi ning järgmistel momentidel saavutab positiivseid või negatiivseid maksimume, siis kondensaatorit kogu aja kas laaditakse, kui potentsiaalid generaatori klemmidel on suuremad potentsiaalidest kondensaatori plaatidel, või tühjendatakse (potentsiaalide ümberpöördud suhtel), ja vooluringis voolab kogu aeg kas laadimis- või tühjendamisvool, ning ampermeeter näitab selle efektiivväärtust.

Kui kondensaatori plaatidega ühendatud pinge lõpmatult lühikese ajavahemiku dt vältel muutub suuruse du_c võrra, siis ka kondensaatori laeng, vastavalt valemile (53) muutub suuruse $dq = C \cdot du_c$ võrra. Vooluringis ajavahemiku dt vältel nihkunud elektri hulk dq annab momentvoolu i_c, mis peab olema kooskõlas järgmise vahekorraga:

$$dq = i_c \cdot dt;$$

asendamisel saame:

$$i_c \cdot dt = C \cdot du_c,$$

kust

$$i_c = C \cdot \frac{du_c}{dt}.$$

Kui pinge kondensaatori klemmidel muutub sinusoidaalselt, s. t.

$$u_c = U_{c_m} \cdot \sin \omega t \tag{54}$$

siis

$$i_c = C \cdot \frac{du_c}{dt} = C \cdot U_{c_m} \cdot \frac{d(\sin \omega t)}{dt} = C \cdot U_{c_m} \cdot \omega \cos \omega t;$$

asendades

$$\cos \omega t = \sin (\omega t + 90°),$$

saame:

$$i_c = \omega \cdot C \cdot U_{c_m} \cdot \sin (\omega t + 90°); \tag{55}$$

eeldades, et

$$\sin (\omega t + 90°) = 1,$$

saame:

$$I_{c_m} = \omega \cdot C \cdot U_{c_m},$$

või üle minnes efektiivsetele väärtustele see tähendab, et jagades $\sqrt{2}$-ga saame:

$$I_c = \frac{I_{cm}}{\sqrt{2}} = \frac{U_{cm}}{\sqrt{2}} \cdot \omega \cdot C = U_c \cdot \omega \cdot C.$$

Seda avaldist võib ümber kirjutada järgmiselt:

$$\frac{U_c}{I_c} = \frac{1}{\omega \cdot C}.$$

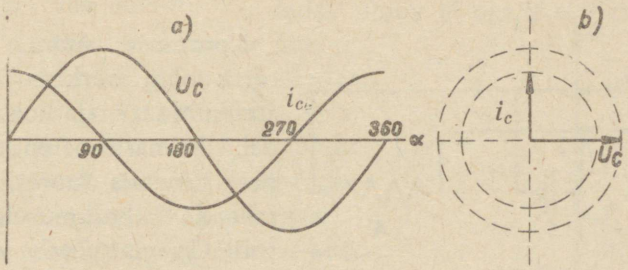
Kuid voolutugevusega jagatud pinge annab üldiselt takistuse; järelikult $\frac{1}{\omega C}$ on suurus, mida võiks nimetada takistuseks — mahtuvuslikuks takistuseks, mida tavaliselt tähistatakse tähega x_c, s. t.

$$x_c = \frac{1}{\omega \cdot C}. \tag{56}$$

x_c on siin väljendatud oomides, ning C — faradites.

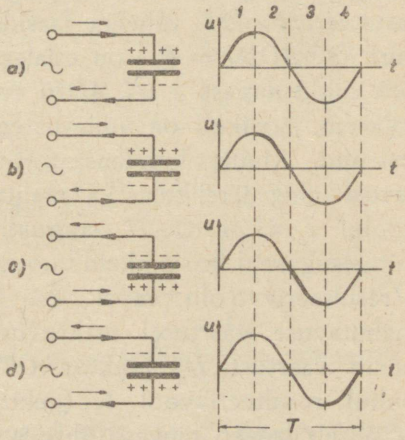
Võrreldes omavahel valemeid (54) ja (55) eeldusel, et $t = 0$, leiame, et pinge faas $\alpha = 0$, järelikult esimesel ajamomendil kondensaatori klemmipinge vektor asub algasendis, kuna momendil $t = 0$ voolu faas $\alpha = 90°$, s. t. voolu vektor on juba nihkunud vektorite pöörlemise suunas 90° võrra, teiste sõnadega — kondensaatori klemmidega ühendatud pinge faas jääb voolu faasist veerand-perioodi võrra maha; vastavalt sellele jääb ka pinge vektor 90° võrra maha voolu vektorist.

Joonisel 89-a on näidatud valemitele (54) ja (55) vastavalt ehitatud voolu i_c sinusoid ja pinge u_c sinusoid, kuna joonisel 89-b on kujutatud vastav vektordiagramm.



Joon. 89.

Joonise 90 kõverate järgi on kerge jälgida laadimis- ja tühjendamisreziimide vahetust kondensaatori vooluringis. Nooled väljaspool joon näitavad võrgupinge suunda, nooled joontel — voolu suunda. Perioodi esimese veerandi vältel võrgupinge kasvab. Võrgupinge suurenemisega suureneb elektri hulk kondensaatori plaatidel. Elektrilised laengud voolavad plaatidele, voolu suund ühtub pinge suunaga (joon. 90-a). Perioodi esimese veerandi lõpuks võrgupinge lakkab kasvamast ning kohe lõpeb laengute vool kondensaatorile. Momendiks muutub voolutugevus võrdseks nulliga.

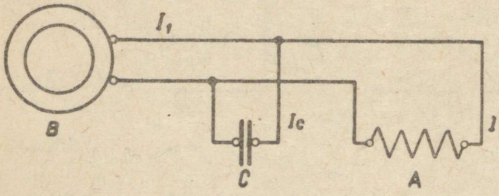


Joon. 90.

Nüüd võrgupinge langeb ja laengud voolavad kondensaatori plaatidelt võrku. Vool on suunatud võrgupingele vastupidiselt (joon. 90-b). Teise veerandi lõpuks võrgupinge muutub võrdseks nulliga, kõik plaatide laengud on voolanud võrku. Järgnevalt võrgupinge muudab oma suunda. Kolmanda veerandi vältel (joon. 90-c) ta kasvab ja laengud jällegi voolavad kondensaatori plaatidele; viimase veerandi vältel võrgupinge langeb, laengud pöörduvad plaatidelt võrku (joon. 90-d).

Kondensaatori omadust võtta võrgust pingele ettejooksvat voolu kasutatakse võrgu võimsusteguri parendamiseks.

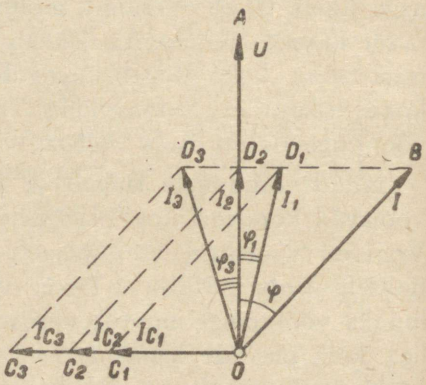
Töötagu mingisugune, jaama B poolt toidetav tarvitaja A (joon. 91) pingega U ja tarvitagu ta voolu tugevusega I, mis faasilt jääks pingest maha nurga φ võrra. Vektordiagramm sellele juhule on näidatud joonisel 92, kus OA on tarvitaja pinge, OB — tarvitaja vool, nurk AOB — faaside nihkenurk tarvitaja pinge ja voolu vahel.



Joon. 91.

Koormuse suure induktiivsuse tõttu olgu nurk φ kaunis suur ja ärelikult tarvitaja cos φ kaunis madal. Viimase parendamiseks koha peal, tarvitaja juures, lülitame paralleelselt koormusele kondensaatori C, mis võtab võrgust voolu $I_{c_1} = \omega \cdot C \cdot U$. See vool teatavasti jookseb pingele veerandperioodi võrra ette ja järelikult tema vektor eelneb pinge vektorile OA 90° nurga võrra.

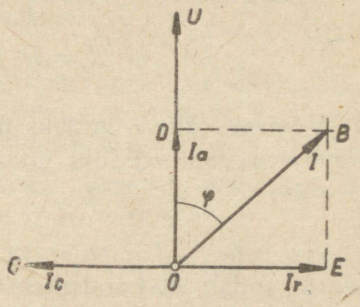
Jaam saadab nüüd energia tarvitamise kohale mitte ainult tarvitaja poolt tarvitatavat voolu I, vaid ka kondensaatori voolu I_{c_1}, mis liidetuna annavad jaama koguvoolu I_1. See liitmine on teostatud joonisel 92: OB — koormuse vool I, OC_1 — kondensaatori vool I_{c_1}, OD_1 — jaama vool I_1. Võib hõlpsalt märgata, et võrgupinge U ja resulteerivvoolu I_1 vaheline faaside nihkenurk ($< AOD_1 = \varphi_1$) on esialgsest faaside nihkenurgast φ ($< AOB$) tunduvalt väiksem, järelikult on võimsustegur suurenenud. Muutes kondensaatori C mahutavust ning järelikult ka mahtuvusliku voolu $I_c = \omega \cdot C \cdot U$ suurust, saame mitmesuguseid faasinihkeid tarvitaja pinge a resulteerivvo olu vahel. Nii teataval mahutavuse väärtusel mahtuvuslik vool omab väärtust I_{c_2} (vektor OC_2), mispuhul resulteerivvool I_2 (vektor OD_2) faasiliselt langeb pingega ühte ja nurk φ_2 võrdub nulliga; järelikult cos φ omab siis maksimaalset väärtust cos $\varphi_2 = 1$. Kui veelgi suurendada kondensaatori mahtuvust, ja järelikult ka mahtuvusvoolu, näiteks suuruseni I_{c_3} (vektor OC_3), võime saada resulteerivat voolu I_3 (vektor OD_3), mis on nüüd juba pingele nurga φ_3 võrra ettejooksvaks vooluks ja cos φ on nüüd jälle väiksem kui üks.



Joon. 92.

Diagrammist on selgesti näha, et $\varphi = 0$ juures on resulteerivvool väikseim kõigist võimalikest (järelikult aga ka võimsuskaod liinis on väikseimad), generaatori kasutamine on parim jne. Niisiis, kondensaatori lülitamisel paralleelselt induktiivsele koormusele võidakse võimsustegurit tunduvalt parendada ja koguni viia üheni.

Joonisel 93 on kujutatud faaside täielise kompensatsiooni vektordiagramm. Jaotades koormuse voolu I (OB) aktiivseks vooluks I_a (OD) ja reaktiivseks vooluks I_r (OE), võime hõlpsalt märgata, et ühendades koormusele paralleelselt kondensaatorit, mis tarvitab antud pingega suuruse juures koormuse reaktiivse vooluga I_r võrdset voolu I_c, kompenseerime sellega reaktiivset voolu ja vooluringis voolab ainult faasiliselt pingega ühtelangev aktiivne vool I_a (OD).



Joon. 93.

Ka pole raske diagrammist välja tuua põhisuhteid kõikide suuruste vahel. Nii teades U, I ja cos φ pole raske määrata koormuse reaktiivse voolu kompenseerimiseks vajalikku mahtuvust C:

$$I_r = I \cdot \sin \varphi;$$

kuid

$$I_c = I_r$$

ja

$$I_c = \omega \cdot C \cdot U,$$

järelikult:

$$\omega \cdot C \cdot U = I_r = I \cdot \sin \varphi,$$

$$C = \frac{I \cdot \sin \varphi}{\omega \cdot U}. \qquad (57)$$

N ä i d e 23. Vaatleme kondensaatori abil cos φ parendamise võimalust ühe arvulise näite najal.

Võrku pingega 500 V lülitame elektrimootori, mis võtab võrgust võimsust 50 kW võimsusteguri puhul cos $\varphi = 0{,}8$. Määrame kondensaatori mahtuvuse, mis parendaks võimsustegurit kuni üheni.

Võrgust mootori poolt võetav voolutugevus võrdub

$$I = \frac{N}{U \cdot \cos \varphi} = \frac{50\,000}{500 \cdot 0{,}8} = 125 \text{ A}.$$

Reaktiivse voolu leidmiseks määrame sin φ:

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = \sqrt{1 - 0{,}64} = 0{,}6.$$

Reaktiivne vool võrdub (vt. joon. 93):

$$I_r = I \cdot \sin \varphi = 125 \cdot 0{,}6 = 75 \text{ A}.$$

Võimsusteguri viimiseks ühele on vajalik, et kondensaatori poolt võrgust tarvitatav vool võrduks vooluga I_r:

$$I_c = I_r,$$

see tähendab, et kondensaator tuleb arvutada reaktiivsele võimsusele

$$N_b = I_c \cdot U = 75 \cdot 500 = 37\,500 \text{ VA} = 37{,}5 \text{ kVA};$$

mahtuvuslik takistus võrduks siis:

$$x_c = \frac{U}{I_c} = \frac{500}{75} = 6{,}67 \ \Omega,$$

ja kondensaatori mahtuvus

$$C = \frac{1}{\omega \cdot x_c} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot x_c},$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 6{,}67} = 0{,}00048 \text{ F} = 480 \ \mu\text{F}.$$

Samasuguse tulemuse saaksime, kasutades otseselt valemit (57):

$$C = \frac{I \cdot \sin \varphi}{\omega \cdot U},$$

$$C = \frac{125 \cdot 0{,}6}{314 \cdot 500} = 0{,}00048 \text{ F}.$$

Pärast kondensaatori sisselülitamist voolutugevus võrgus võrdub

$$I' = I_a = I \cdot \cos \varphi = 125 \cdot 0{,}8 = 100 \text{ A}.$$

Me näeme, et kondensaatori sisselülitamine vähendab voolu tarvitamist 25 A võrra.

KEERDVOOL.

40. Keerdvoolu saamine.

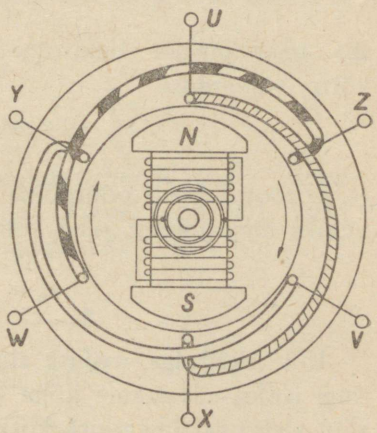
Seni tundmaõpitud vahelduvvoolu nimetatakse täpsemalt ühefaasiliseks vahelduvvooluks, kuna ta on tekitatud ainult ühe, generaatoris esineva elektromotoorse jõuga. Kuid praegusel ajal üldiselt elektrifitseerimiseks kasutatava põhi-voolusüsteemina esineb keerdvoolu süsteem, seda peamiselt ühefaasiliste elektrimootorite suurte puuduste tõttu.

Keerdvooluks ehk kolmefaasiliseks vooluks nimetatakse süsteemi kolmest ühefaasilisest voolust, mis on tekitatud kolme, võrdse sagedusega ja võrdse amplituudiga, faasiliselt üksteisest kolmandik-perioodi võrra nihutatud elektromotoorse jõuga.

Keerdvoolu võib saada kolmest üksikust ühefaasilise voolu generaatorist, millede elektromotoorsed jõud ühesugusel sagedusel on võrdsed, kuid hilinevad üks teise suhtes $^1/_3$ perioodi võrra. Kuid niisugune võimalus osutub tehniliselt liiga keeruliseks. Seepärast tavaliselt saadakse keerdvoolu nõndanimetatud keerdvoolu-generaatoritest.

Vaatleme niisuguse generaatori töötamise põhimõtet.

Joonisel 94 on skemaatiliselt kujutatud keerdvoolu-generaator. Võib hõlpsalt märgata, et keerdvoolu-generaator erineb ühefaasilisest generaatorist ainult staatori mähise poolest, kuna kõik muu on neil ühesugune: keerdvoolu-generaatori rootor ja staator ei erine millegagi ühefaasilise generaatori omast.



Joon. 94.

Keerdvoolu-generaatori staatorile on paigutatud kolm täpselt samasugust mähist nagu ühefaasilisel generaatoril, kusjuures need mähised on üksteisest nihutatud 120° võrra. Joonisel 94 mähised on näidatud ühekeerulistena, kusjuures mähiste algused on märgitud tähtedega *U*, *V*, *W*, kuna lõpud — *X*, *Y*, *Z*. Teise mähise algus on näiteks nihutatud esimese mähise algusest 120° võrra rootori pöörlemise suunas jne. Nii on keerdvoolu-generaatori staator kujundatud just kui kolme ühefaasilise staatori liitmise teel.

Rootori pöörlemisel kõigis mähiseis tekivad sageduselt ja amplituudilt ühesugused elektromotoorsed jõud (sest kõik kolm mähist on täpselt ühesugused), kuid need elektromotoorsed jõud ei saavuta oma maksimume üheaegselt. Joonisel 94 kujutatud momendil rootor möödub oma põhjapoolusega esimese mähise algusest, ning lõunapoolusega sama mähise lõpust; mähises indutseerub maksimaalne elektromotoorne jõud, kuna elektromotoorse jõu samasuunaline maksimum teises mähises saadakse põhjapooluse keskkoha möödumisel teise mähise algusest V, s. t. rootori pöörde ühele kolmandikule vastava ajavahemiku võrra hiljem; kuna aga kahepooluselises generaatoris ühele rootori pöördele vastab elektromotoorse jõu üks periood, siis teise mähise elektromotoorne jõud E_2 hilineb faasiliselt esimese mähise elektromotoorsest jõust E_1 kolmandik-perioodi võrra, kuna E_3 omakorda hilineb $^1/_3\ T$ võrra E_2-st (muidugi, kui rootor oleks pöörelnud vastupidises suunas, siis oleksime lugenud kolmandat mähist teiseks, teist — kolmandaks ja midagi poleks muutunud).

Mähiste alguste ja lõppude märkimine toimub täiesti vabalt. Tähed UVW võib vahetada ka tähtede XYZ vastu, kuid valides esimese mähise alguse, me määrame seega ka kõigi teiste mähiste algused ja lõpud, sest kahepooluselises masinas üks algus peab olema nihutatud teistest 120° võrra. Järelikult, kui esimese mähise elektromotoorset jõudu võib väljendada valemiga

$$e_1 = E_m \cdot \sin \omega t,$$

siis teise mähise elektromotoorne jõud, mis esimesest jääb maha 120° võrra, väljendub

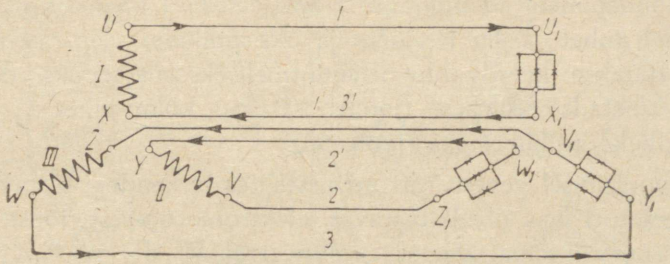
$$e_2 = E_m \cdot \sin (\omega t - 120°)$$

(s. t. rootor peab pöörduma veel 120° võrra, et elektromotoorne jõud saavutaks maksimumi), ning kolmandas mähises

$$e_3 = E_m \cdot \sin (\omega t - 240°).$$

Kui nüüd iga mähise algusele ja lõpule ühendada juhtmed välisvooluringi jaoks, siis saame kolm iseseisvat vooluringi, millede vahel ei ole mingeid elektrilisi ühendusi, kusjuures igas vooluringis voolaks meile juba varemast ajast tuntud ühefaasiline vool ja tervet süsteemi võiks nimetada sidestamata kolmefaasiliseks süsteemiks. Sellise süsteemi välisvooluringis on kuus juhet. Skemaatiliselt niisugune süsteem on näidatud lihtsustatud kujul joonisel 95; sakilise joonega on siin näidatud keerdvoolu-generaatori staatori üksikud mähised (neid mähiseid nimetatakse sagedasti generaatori faasi-

mähisteks ehk lihtsalt generaatori faasideks). Sama joonise paremal poolel on näidatud kolm üksikut tarvitajate rühma, mis on ühendatud generaatori faasidega liinijuhtmete abil (neid rühmi sagedasti nimetatakse koormuse



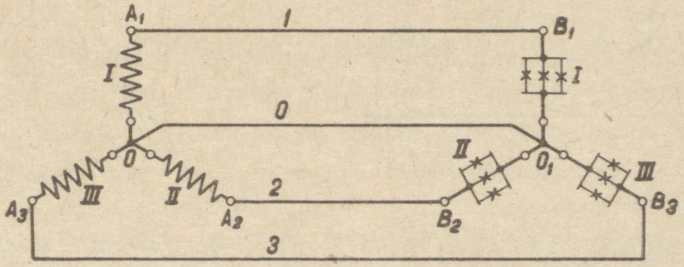
Joon. 95.

faasideks). Nooled joonisel 95 ei näita voolu suunda antud momendil, vaid näitavad ainult leppeliselt energia ülekandmise suunda generaatorilt tarvitajale. Leppeliselt loetakse, et generaatoris energia voolab faasi lõpust selle alguse poole, ning tarvitajal ümberpöördult — algusest lõpu poole.

Välisvooluringi minevate juhtmete arvu vähendamise eesmärgil generaatorite faasimähised ja koormuse faasid ühendatakse omavahel kokku, moodustades sidestatud keerdvoolu süsteemi. Niisugust ühendust võib teostada kahel erineval viisil: tähena ja kolmnurgana.

41. Tähtlülitus.

Generaatori mähiste tähekujulise lülituse saamiseks nende kolm lõppu ühendatakse kokku, nõndanimetatud nullpunktiks *O* (vt. joon. 96), kuna algustest lähevad välisvooluringi kolm juhet (liinijuhtmed).

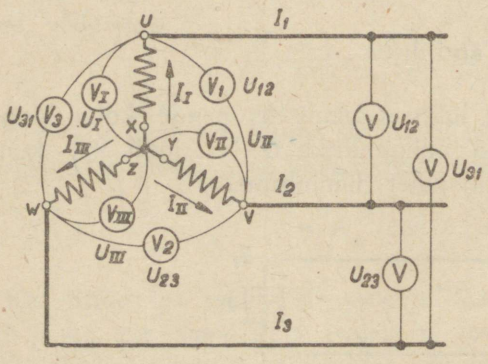


Joon. 96.

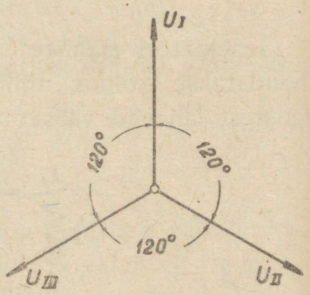
Tarvitajate tähtlülitamiseks tuleb ühendada täpselt samuti kolm koormuse faasi lõppu kokku ühiseks nullpunktiks O_1, kuna algused ühendada liinijuhtmetega. Tarvitajate nullpunktid (neid võib olla mitu, sõltuvalt tarvitajate rühmade arvust) ühendatakse omavahel ja generaatori nullpunktiga neljanda, nõndanimetatud nulljuhtme abil. Sellisel ühendusviisil välisvooluringis on neli juhet: kolm liinijuhet ja üks nulljuhe; seepärast niisugust süsteemi nimetatakse keerdvoolu neljajuhtmeliseks süsteemiks. Skemaatiliselt võib teda tuletada eelmisest (joonis 95), kui kolm juhet 1′, 2′, ja 3′ liita omavahel üheks nulljuhtmeks (joon. 96).

Voolu voolamisel generaatori mähistes tekib nendes teatav pingelangus ja iga generaatori faas omab teatavat, elektromotoorsest jõust selle pingelanguse võrra väiksemat pinget; voltmeetrid V_I, V_{II} ja V_{III} (vt. joon. 97) näitavad pinget iga vastava faasi alguse ja lõpu vahel (ehk, mis on üks ja sama — pinget nullpunkti ja faaside alguste vahel). Nimetame neid pingeid *generaatori faasipingeteks* ja märgime neid U_I, U_{II} ja U_{III}. Voolu voolamisel liinijuhtmetes tekib nendeski teatav pingelangus ja seepärast pinge tarvitaja faaside alguste ja lõppude vahel osutub generaatori faasipingetest nende pingelanguste võrra väiksemaks. Nimetame neid pingeid *tarvitaja faasipingeteks*.

Ühesuguste tarvitajate ühendamisel liinijuhtmetega faasivoolud ja faaside nihkenurgad on võrdsed, ja seepärast võrdsete generaatori elektromotoorsete jõudude tõttu on võrdsed ka faasipinged (nii generaatoril kui ka tar-



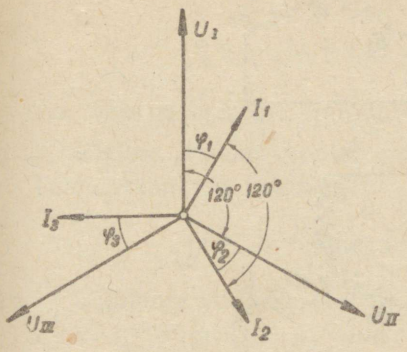
Joon. 97.



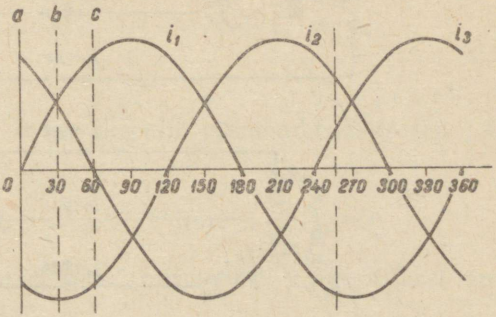
Joon. 98.

vitajal, kui juhtmete takistused on võrdsed). Niisugust koormust nimetatakse *ühtlaseks ehk sümmeetriliseks koormuseks*. Niisugusel, praktikas sagedasti esineval juhul faasipinged ja voolud kujunduvad võrdse pikkusega

vektoritena, mis on üksteisest nihutatud 120° võrra (joon. 98 ja 99). Ühtlase koormuse voolude laotatud diagramm on kujutatud joonisel 100, kus kolm sinusoidi on nihutatud üksteisest 120° võrra ja omavad võrdseid



Joon. 99.



Joon. 100.

amplituude. Kui koormus on ebaühtlane, siis muidugi voolude amplituudid pole ühesugused ja sinusoidide vahelised faaside nihked võivad erineda 120°-st.

Rakendades generaatori nullpunktile või tarvitaja nullpunktile esimest Kirchhoff'i seadust, saame:

$$i_I + i_{II} + i_{III} + i_0 = 0 \qquad (58)$$

ehk

$$i_0 = -(i_I + i_{II} + i_{III}),$$

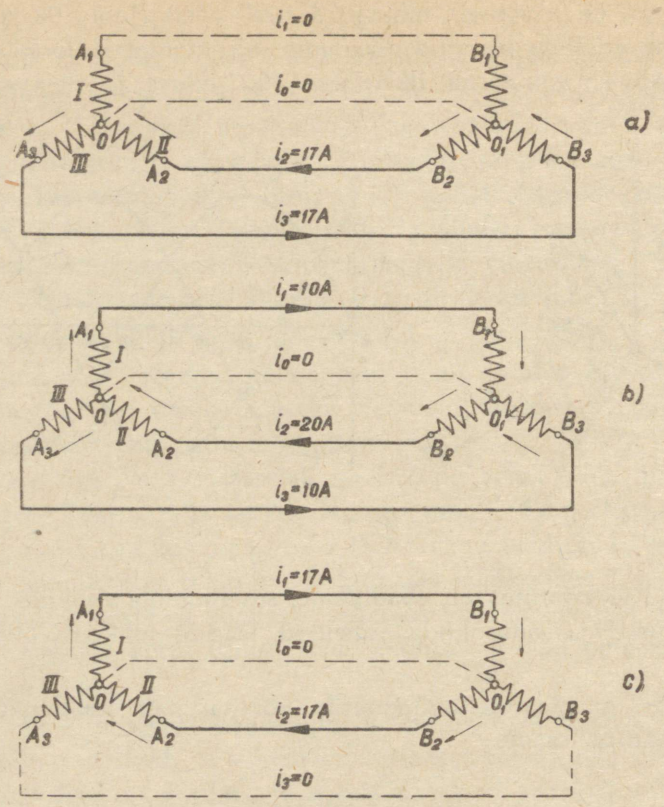
s. t. voolutugevus nulljuhtmes igal üksikul ajamomendil võrdub faasi voolutugevuste summaga.

Vaatleme nüüd lähemalt faaside ühtlase koormuse juhust. Valime mõned momendid ja jälgime voolu suunda ja voolu suurust neil momentidel (joon. 101).

Lepime kokku lugeda generaatorilt tarvitajale minevat voolu positiivseks, ning tarvitajalt generaatorile minevat voolu negatiivseks vooluks.

Oletame, et voolutugevus kõigis faasides on ühesugune ja võrdub 14 A.

Määrame voolutugevused üksikutes faasides momendil a (joon. 101-a). Sel momendil esimese faasi faasinurk võrdub nulliga ($\omega t = 0$) vt. joon. 100 vertikaal *a*), ja voolutugevus selles faasis võrdub ka nulliga ($i_I = 0$). Voolutugevused teistes faasides leiame, meeles pidades, et vool teises faasis



Joon. 101.

hilineb voolust esimeses faasis 120° võrra ning vool kolmandas faasis hilineb voolust esimeses faasis 240° võrra. Siis võime kirjutada:

$$i_{II} = I_m \cdot \sin\,(\omega\, t - 120°)$$

ja

$$i_{III} = I_m \cdot \sin\,(\omega\, t - 240°).$$

Leiame I_m voolutugevuse antud efektiivväärtusest:

$$I_m = I \cdot \sqrt{2} = 14 \cdot 1{,}41 \approx 20\ \text{A};$$

järelikult

$$i_{II} = 20 \cdot \sin\,(-120°) = 20 \cdot (-0{,}86) = -17\ \text{A};$$

$$i_{III} = 20 \cdot \sin\,(-240°) = 17\ \text{A}.$$

Voolutugevus teises faasis on negatiivne, s. t. see vool voolab tarvitajalt generaatorile, kuna kolmandas faasis on ta positiivne ja voolab generaatorilt tarvitajale.

Voolutugevus nulljuhtmes võrdub faasivoolude summaga, s. t.

$$i_o = -(i_I + i_{II} + i_{III}) = -[0 + (-17) + 17] = 0,$$

s. t. vool nulljuhtmes puudub.

Jälgime, kuidas voolab vool meie skeemil momendil a (joon. 101-a). Tema suund on järgmine:

$$O \rightarrow A_3 \rightarrow \text{juhe } 3 \rightarrow B_3 \rightarrow O_1 \rightarrow B_2 \rightarrow \text{juhe } 2 \rightarrow A_2 \rightarrow O.$$

Vaatleme voolude jaotust momendil b, mis vastab esimese faasi nurgale $\omega t = 30°$ (vertikaal b, joon. 100).

Voolude momentväärtused üksikutes faasides on:

$$i_I = I_m \cdot \sin \omega t = 20 \cdot \sin 30° = 10 \text{ A},$$

$$i_{II} = I_m \cdot \sin (\omega t - 120°) = 20 \cdot \sin (-90°) = -20 \text{ A},$$

$$i_{III} = I_m \cdot \sin (\omega t - 240°) = 20 \cdot \sin (-210°) = 10 \text{ A}.$$

Voolutugevus nulljuhtmes on jällegi võrdne nulliga:

$$i_o = -(i_I + i_{II} + i_{III}) = -[10 + (-20) + 10] = 0.$$

Joonisel 101-b on näidatud voolude jaotus teisel momendil.

Voolu teekond on järgmine:

$$O \begin{cases} \rightarrow A_1 \rightarrow \text{juhe } 1 \rightarrow B_1 \\ \rightarrow A_3 \rightarrow \text{juhe } 3 \rightarrow B_3 \end{cases} \rightarrow O_1 \rightarrow B_2 \rightarrow \text{juhe } 2 \rightarrow A_2 \rightarrow O.$$

Voolude jaotus momendil c, mil esimese faasi faasinurk $\omega t = 60°$, on näidatud joonisel 101-c.

Soovitame lugejale joonise 101-c abil omal jõul läbi töötada voolude jaotus sellel momendil.

Nii siis, millist momenti me ka ei vaatleks, alati on

$$i_I + i_{II} + i_{III} = 0,$$

ja järelikult vool nulljuhtmes kogu aeg puudub; seepärast nulljuhe muu-

tub tarbetuks ja välisvooluringis piisab küllaldaselt ainult kolmest liinijuhtmest *.

Nulljuhtme puudumisel saame nõndanimetatud keerdvoolu kolmejuhtmelise süsteemi. Muidugi, ebaühtlase koormuse puhul vool nulljuhtmes pole võrdne nulliga, sest $i_I + i_{II} + i_{III} \neq 0$, milles võib hõlpsalt veenduda, kujutledes, et vool i_{II} on näiteks kaks korda suurema amplituudiga kui i_I ja i_{III}, ja neljandat (null-) juhet seekord ei tohiks kõrvale heita, kuna see tugevasti mõjutaks tarvitaja faasipingete jaotust. Väiksema takistusega faasis on siis ka väiksem pinge, kuna suurema takistusega faasis on suurem pinge; nii näiteks valgustuskoormuse puhul, kui faasidesse on sisse lülitatud mitmesugune lampide arv, näiteks esimeses 30 tk., teises 20 tk. ja kolmandas 10 tk. ühesuguseid lampe, saame esimeses faasis väikese pinge, kolmandas — suure pinge; esimese faasi lambid põlevad väga tumedalt, kuna kolmanda faasi lambid põlevad liiga heledalt. Kuna on raske oletada, et valgustusseadmetes kõigis faasides oleks üheaegselt sisse lülitatud ühesugused lampide arvud, siis ebaühtlase lampide hõõgumise vältimiseks valgustusseadmetes tähekujulise lampide lülitusviisi puhul tavaliselt kasutatakse neljajuhtmelist süsteemi.

Seni me vaatlesime ainult faasipingeid, kuid võib hõlpsalt veenduda, et tähtlülituses peale faasipingete on veel nõndanimetatud liinipinged ehk faasidevahelised pinged. Liinipingeteks nimetatakse pinget kahe mistahes faasi alguste vahel või kahe liinijuhtme vahel. Joonisel 97 punktide U ja V vahele lülitatud voltmeeter näitab liinipinget U_{12} (indeks $_{12}$ näitab, milliste juhtmete vahel on pinge võetud). Kuna punktidega U ja V ühendatud voltmeeter näitab potentsiaalide vahet nende punktide vahel, ning mähiste lõpud on nullpunktis ühendatud kokku, järelikult omavad üht potentsiaali, siis

$$U_{12} = \overline{U}_I = \overline{U}_{II}; \tag{59}$$

täpselt samuti ka

$$U_{23} = \overline{U}_{II} - \overline{U}_{III}.$$

---

* Seda, et igal momendil $i_I + i_{II} + i_{III} = 0$, võib tõestada ka puhtanalüütiliselt. Tõepoolest:

$$i_I = I_{Im} \cdot \sin \omega t;\ i_{II} = I_{IIm} \cdot \sin (\omega t - 120^0);$$

$$i_{III} = I_{IIIm} \cdot \sin (\omega t - 240^0).$$

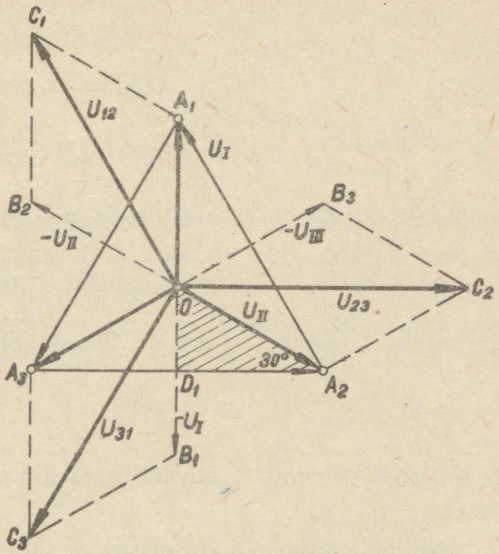
Kuid $I_{Im} = I_{IIm} = I_{IIIm}$ (ühtlane koormus); järelikult

$$i_I + i_{II} + i_{III} = I_m \cdot [\sin \omega t + \sin (\omega t - 120^0) + \sin (\omega t - 240^0)].$$

Teostades matemaatilisi ümberkujundusi, võib kergesti veenduda, et nurksulgudes olev avaldis võrdub nulliga igasugusel t väärtusel.

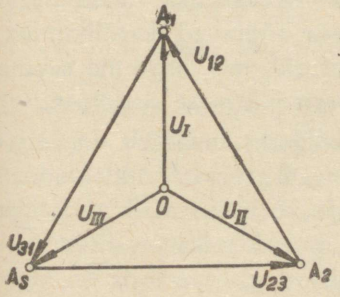
Kriipsud vihjavad sellele, et need vahed on geomeetrilised, aga mitte algebralised, kuna pinged faasiliselt ei ühtu. Niisiis, liinipinge võrdub kahe faasipinge geomeetrilise vahega *).

Arvulist vahekorda liini- ja faasipingete vahel võib hõlpsalt leida pingete diagrammist joonisel 102.



Joon. 102.

Valemist (59) järgneb, et liinipinge U_{12} vektori saamiseks tuleb vektorist U_I lahutada vektor U_{II}, või teisiti, liita vektor U_I vektoriga $-U_{II}$, s. t. vektoriga, mis on võrdne U_{II}-ga, kuid on vastupidiselt suunatud. Joonisel 102 on need vektorid U_I (OA_1) ja $-U_{II}$ (OB_2) liidetud parallelogrammi reegli kohaselt, ja selle parallelogrammi diagonaal ongi otsitav liinipinge U_{12}. Võib selgesti näha, et $OC_1 = A_2A_1$, kui parallelogrammi $A_2A_1C_1O$ vastasküljed; seepärast A_2A_1 on liinipinge vektor U_{12}. Täpselt samuti A_3A_2 on vektor U_{23} ja A_1A_3 — vektor U_{31} (joonisel 102 on toodud kõik need ehitused, kuna joonisel 103 on näidatud sama diagramm, kuid ilma vahepealsete ehitusteta). Tulemusena on saadud võrdkülgne liinipingete kolmnurk, kusjuures kõik liinipinged on faasiliselt nihutatud üksteisest $^1/_3$ perioodi (120°) võrra; kuid liinipinge U_{12} ja faasipinge U_I vahel on faasinihe 30°, samuti ka U_{23} ja U_{II} vahel ning U_{31} ja U_{III} vahel.



Joon. 103.

Kolmnurgast A_2OD_1 (joon. 102) võib hõlpsalt saada järgmise väga tähtsa vahekorra:

$$D_1A_2 = OA_2 \cdot \cos 30°;$$

kuid

$$D_1A_2 = \frac{U_{23}}{2};\ OA_2 = U_{II}$$

*) Et liinipinge tõepoolest võrdub faasipingete geomeetrilise vahega, selgub lähemalt kontuuri $O - U -$ voltmeeter $V_1 - V - O$ vaatlusest joonisel 97. Seda kontuuri läbivat ja voltmeetri osutit kallutavat voolu tekitavad ju kaks faasipinget U_I ja U_{II}, mis kontuuris on suunatud üksteisele vastupidiselt.

ja

$$\cos 30° = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

järelikult

$$\frac{U_{23}}{2} = U_{II} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$$

või

$$U_{23} = \sqrt{3} \cdot U_{II};$$

$$U_I = U_{II} = U_{III} = U_f$$

(kus indeks f näitab, et see on faasipinge) ja

$$U_{12} = U_{23} = U_{31} = U_l$$

(kus indeks l näitab, et see on liinipinge); seepärast

$$U_l = \sqrt{3} \cdot U_f = 1{,}73 \cdot U_f, \tag{60}$$

s. t. ühtlasel koormusel tähtlülituses liinipinge on $\sqrt{3}$ korda suurem faasipingest.

Tegelikult näitab see vahekord, et tähtlülituses pinged liinijuhtmete vahel on 1,73 korda suuremad kui pinged iga liinijuhtme ja nulljuhtme vahel s. t. et keerdvoolu ahelas on sel juhul kaks isesugust pinget.

Nii näiteks 127 V-se faasipinge puhul on liinipinge 220 V või 220 V-se faasipinge puhul on liinipinge 380 V. Viimast süsteemi kasutatakse praegusel ajal väga sagedasti tehaste jaotusvõrkudes. Madalamale faasipingele lülitatakse hõõglambid, mis just madalama pingega töötavad kasulikumalt, kuna kõrgemale liinipingele lülitakse elektrimootorid, mis, nagu me näeme hiljem, võimaldab tunduvalt vähendada jaotusvõrgu juhtmete ristlõiget.

Liinipingete kolmnurk jääb generaatoril võrdkülgseks tavaliselt ka ebaühtlasel koormusel. Tõepoolest, liinipinged on pinged generaatori klemmidel, mis on teatavasti generaatori elektromotoorsest jõust väiksemad sisepinge languste võrra. Generaatori küllaldase võimsuse puhul (mis tavaliselt esinebki võrgu toitmisel suurest jõujaamast) sisekaod generaatoris on väga väikesed, ja seepärast isegi tunduva koormuse ebaühtluse puhul vahed pingelangustes generaatori faasides pole suured ja tegelikult võib küllaldase täpsusega lugeda, et liinipinged on võrdsed, mida, nagu me nägime, ei saa öelda tarvitaja faasipingete kohta.

Mitte ainult pinged, vaid ka voolud jagatakse faasivooludeks (s. t. vooludeks, mis voolavad generaatori või tarvitaja faasides, vt. joon. 97)

$$I_{\mathrm{I}};\ I_{\mathrm{II}};\ I_{\mathrm{III}},$$

ja liinivooludeks (s. t. vooludeks, mis voolavad liini peajuhtmetes):

$$I_1;\ I_2;\ I_3.$$

Samalt jooniselt 97 võib hõlpsalt näha, et

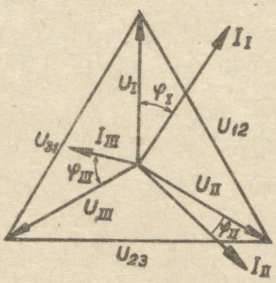
$$I_1 = I_{\mathrm{I}};\quad I_2 = I_{\mathrm{II}};\quad I_3 = I_{\mathrm{III}}$$

ehk üldisel kujul,

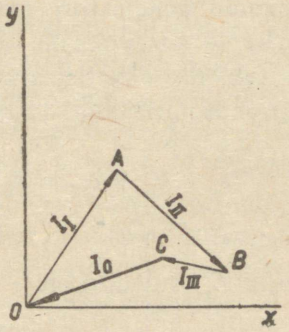
$$I_f = I_l \tag{61}$$

igasugustele koormustele.

Neljajuhtmelise süsteemi ebaühtlase koormuse puhul vool nulljuhtmes pole võrdne nulliga ja tema suurust võib määrata vektordiagrammi abil. Sel juhul võiks lugeda ühesugusteks mitte ainult liini-, vaid ka faasipinged seepärast pingete diagramm kujutab endast võrdkülgset kolmnurka tema geomeetrilisest keskpunktist väljuvate faasipingete vektoritega (joon. 104).



Joon. 104.



Joon. 105.

Üldisel juhul voolud võivad faasiliselt mitte ühtuda oma pingetega, seepärast on neid kujutatud vektoritega, mis on vastavate faasipingete vektoritest nihutatud teatavate nurkade φ_1, φ_2 ja φ_3 võrra. Rakendades voolude efektiivväärtustele Kirchhoff'i seadust, võime voolude algebralist summat asendada geomeetrilisega ja võrrandit (58) kirjutada järgmiselt:

$$\bar{I}_{\mathrm{I}} + \bar{I}_{\mathrm{II}} + \bar{I}_{\mathrm{III}} + \bar{I}_0 = 0,$$

kust järgneb, et kõik neli voolu vektorit liitmisel peavad andma kinnise nelinurga. Seepärast liites vektorid I_{I}, I_{II} ja I_{III}, nagu see on tehtud joonisel 105, saame murdjoone *OABC*, kusjuures seda sulgev külg *CO* annabki meile nulljuhtme voolu vektori. Ehitades kogu diagrammi teatavas mõõtvahekorras, võib suuruse I_0 leida graafiliselt, kuid teda võib leida ka analüüti-

liselt: tõepoolest, projekteerides vektorid I_I, I_{II} ja I_{III} kahele vastastikku perpendikulaarsele teljele OX ja OY, leiame

$$I_0 = \sqrt{\left[(\bar{I}_I + \bar{I}_{II} + \bar{I}_{III})_x\right]^2 + \left[(\bar{I}_I + \bar{I}_{II} + \bar{I}_{III})_y\right]^2},$$

kus

$$(\bar{I}_I + \bar{I}_{II} + \bar{I}_{III})_x \text{ ja } (\bar{I}_I + \bar{I}_{II} + \bar{I}_{III})_y$$

on kolme vektori I_I, I_{II} I_{III} projektsioonide summad valitud telgedele.

42. Kolmnurklülitus.

Kolmnurklülituses generaatori või tarvitaja esimese faasi lõpp ühendatakse teise faasi algusega, teise faasi lõpp — kolmanda faasi algusega ning kolmanda faasi lõpp — esimese faasi algusega, ning kõigi algustega ühendatakse liinijuhtmed (joon. 106).

Niisugune generaatori mähiste ühenduse viis kinnisesse kontuuri — kolmnurka — on võimalik ilma kartuseta, et selles kinnises vooluringis võiksid tekkida nimetamisväärsed sisemised voolud, kuna meeles pidades, et elektromotoorne jõud järgnevas faasis jääb eelnevast maha 120° võrra, saame:

$$e_I + e_{II} + e_{III} = E_m \cdot \sin \omega t + E_m \cdot \sin(\omega t - 120°) + \\ + E_m \cdot \sin(\omega t - 240°)$$

ehk, tuues E_m sulgude ette:

$$e_I + e_{II} + e_{III} = E_m \cdot [\sin \omega t + \sin(\omega t - 120°) + \\ + \sin(\omega t - 240°)] = 0.$$

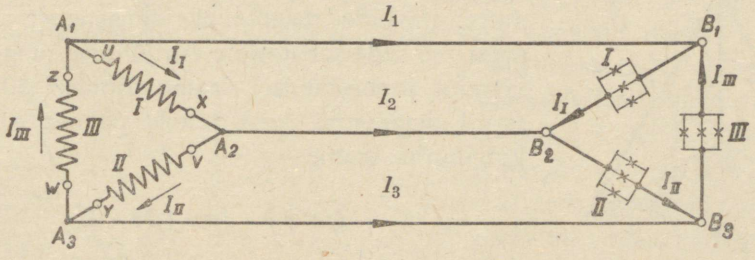
Nurksulgudes olev avaldis võrdub nulliga, s. t. elektromotoorsete jõudude summa kolmnurgas võrdub nulliga, ja mingit voolu selles ei või olla nii kaua, kuni tema tippude külge pole ühendatud välisvooluring. Võimalikkude vahede tõttu elektromotoorsetes jõududes tegelikult siiski välditakse generaatori mähiste ühendamist kolmnurka.

Võib hõlpsalt märgata, et sellise lülitusviisi juures liinipinge võrdub faasipingega, kuna liinijuhtmed on ühendatud ühe ja sama faasi alguse ja lõpu külge, s. t.

$$U_l = U_f. \tag{62}$$

Niivõrd kui sellises lülituses puudub nullpunkt, puudub siin ka nulljuhe ja me saame kolmeastmelise süsteemi; nulljuhe siin polegi tarvilik, sest

tarvitajaid ühendatakse liinipingetega ning viimased võiks igasugusel koormusel lugeda ligikaudu võrdseteks. Seepärast tarvitaja faasipinged (võrdsed liinipingetega) peaaegu ei olene koormuse ebaühtlusest, nii et niisugune tarvitajate lülitusviis on eriti soovitav kolmejuhtmelises süsteemis ja ebaühtlasel koormusel.



Joon. 106.

Vaatleme nüüd, millises vahekorras on omavahel liinivoolud ja faasivoolud kolmnurklülituses. Selleks märgime joonisel 106 voolude positiivsed suunad üksikutes vooluringi osades. Positiivset suunda võib alati valida täiesti vabalt, ainult kõigile faasidele ühise tunnuse järgi. Loeme liinivoolude positiivseks suunaks suunda generaatorilt koormusele, faasivoolude positiivseks suunaks aga suunda faasi algusest lõpu poole, kusjuures faasi algust loeme ühendatuks samanimelise liinijuhtmega. Siis positiivsed suunad vastavad joonisel 106 näidatud nooltele. Selleks et määrata voolude vahekorda, rakendame esimest Kirchhoff'i seadust joonisel 106 toodud skeemi mingile hargnemissõlmele, näiteks sõlmele B_1.

Kirchhoff'i seadust võib rakendada punktis B_1 kokkuvoolavate voolude momentväärtustele.

Arvesse võttes joonisel 106 näidatud suunad, võime kirjutada:

$$i_1 + i_{III} - i_I = 0,$$

kust

$$i_1 = i_I - i_{III}.$$

Varemalt me juba märkisime, et üleminekul maksimaalsetele või efektiivväärtustele, s. t. vektoritele, algebralist liitmist või lahutamist tuleb asendada vastavalt geomeetrilise liitmise või lahutamisega. Antud juhul, üle minnes voolude efektiivväärtustele, tuleb kirjutada:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_I - \bar{I}_{III}$$

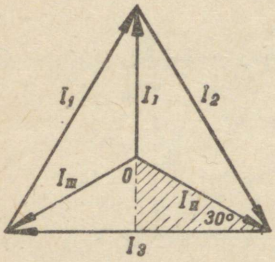
või sõlmele B_2

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{II} - \bar{I}_I$$

ja sõlmele B_3

$$\bar{I}_3 = \bar{I}_{III} - \bar{I}_{II},$$

s. t. liinivoolud on võrdsed faasivoolude geomeetrilise vahega.



Joon. 107.

Teostades kolmnurka lülitatud ühtlase koormuse voolude diagrammi samasugust ehitust, nagu me seda kasutasime tähtlülituse pingete diagrammi joonestamisel, saame joonisel 107 kujutatud diagrammi, kust tähele pannes viirutatud kolmnurka saame:

$$I_l = \sqrt{3} \cdot I_f = 1{,}73 \cdot I_f, \qquad (63)$$

s. t. ühtlasel koormusel kolmnurklülituses liinivool on $\sqrt{3}$ korda suurem faasivoolust.

Muidugi on see vahekord õige ainult ühtlasele koormusele.

Vaatleme nüüd ebaühtlase koormuse juhust: jäägu faasivoolud I_I, I_{II} ja I_{III} vastavatest faasipingetest maha teatavate nurkade φ_1, φ_{II} ja φ_{III} võrra Siis, ehitanud pingete vektordiagrammi (kolmnurk ABC joonisel 108), ehitame punktis A nurga φ_I all pinge U_{12} suhtes voolu I_I vektori AD, ning vastavalt punktis B voolu I_{II} vektori BF nurga φ_{II} all pinge U_{23} suhtes ja punktis C voolu I_{III} vektori CG nurga φ_{III} all pinge U_{31} suhtes. Lähtudes faasivoolude vektoritest leiame liinivoolud. Selleks kasutame ülaltoodud võrrandeid:

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_I - \bar{I}_{III},\ \bar{I}_2 = \bar{I}_{II} - \bar{I}_I \text{ ja } \bar{I}_3 = \bar{I}_{III} - \bar{I}_{II}$$

ehk

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_I + (-\bar{I}_{III}),\ \bar{I}_2 = \bar{I}_{II} + (-\bar{I}_I) \text{ ja}$$

$$\bar{I}_3 = \bar{I}_{III} + (-\bar{I}_{II}).$$

Need võrrandid näitavad, et esimese liinivoolu vektori saamiseks tuleb faasivoolu I_I vektor liita faasivoolu I_{III} vastupidiselt suunatud (miinusmärk) vektoriga. See ehitus on teostatud punktis A.

Samasugusel viisil on teostatud ka ehitused punktides B ja C.

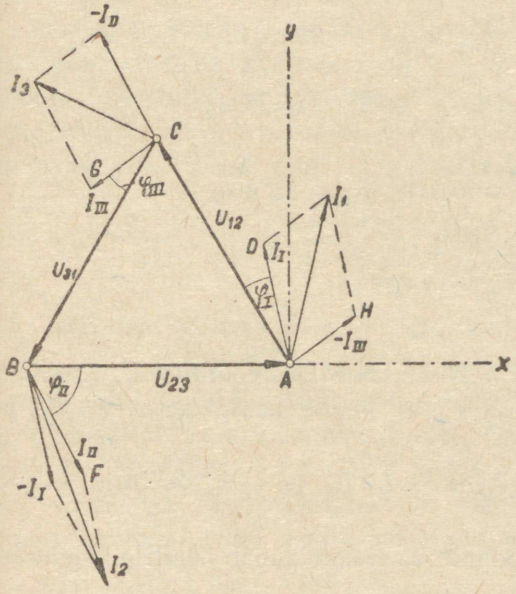
Ehitades faasivoolude vektoreid teatavas mõõtvahekorras, võib hõlpsalt leida liinivoolusid graafiliselt. Kuid neid võib leida ka analüütiliselt. Projekteerides vektorid I_I ja $-I_{III}$ kahele vastastikku perpendikulaarsele teljele OX ja OY (teoreemi alusel: vektorite summa projektsioon võrdub liidetavate projektsioonide summaga), saame:

$$I_1 = \sqrt{I_{1x}^2 + I_{1y}^2},$$

kus I_{1x} ja I_{1y} on vastavad voolude I_I ja $-I_{III}$ vektorite projektsioonide summad telgedel OX ja OY.

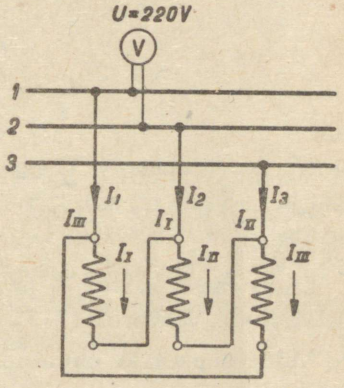
Näide 24. Olgu keerdvoolu võrguga, pingega 220 V ja sagedusega 50 Hz, lülitatud kolmnurka kolm tarvitajat (joon. 109), millede aktiivsed takistused $R_I = 10\,\Omega$; $R_{II} = 5\,\Omega$ ja $R_{III} = 15\,\Omega$; ja induktiivsused $L_I = 0{,}01$ H; $L_{II} = 0{,}03$ H ja $L_{III} = 0{,}02$ H. Määrata voolutugevused liinijuhtmetes.

Ehitame pingete U_{12}, U_{23} ja U_{31} diagrammi vastavalt joonisele 108.



Joon. 108.

Liinivoolude leidmiseks tuleb vastavalt ülalöeldule määrata faasivoolud I_I, I_{II} ja I_{III} ja faasi nihkenurgad φ_I, φ_{II} ja φ_{III}. Seepärast seda ülesannet tuleb lahendada alltoodud järjekorras:



Joon. 109.

I tarvitaja:

$$R_I = 10\,\Omega;\ x_I = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_I = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0{,}01 = 3{,}14\,\Omega;$$

$$z_I = \sqrt{R_I^2 + x_I^2} = \sqrt{10^2 + 3{,}14^2} = 10{,}47\,\Omega;$$

$$\operatorname{tg} \varphi_I = \frac{X_1}{R_I} = \frac{3{,}14}{10} = 0{,}314;\ \varphi_I = 17^\circ 25';$$

$$I_I = \frac{U_{12}}{z_I} = \frac{230}{10{,}47} = 21\ \text{A}.$$

II tarvitaja:

$$R_{II} = 5\,\Omega;\ x_{II} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{II} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0{,}03 = 9{,}42\,\Omega;$$

$$z_{II} = \sqrt{R_{II}^2 + x_{II}^2} = \sqrt{5^2 + 9{,}42^2} = 10{,}66\ \Omega;$$

$$\operatorname{tg}\ \varphi_{II} = \frac{x_{II}}{R_{II}} = \frac{9{,}42}{5} = 1{,}884;\ \varphi_{II} = 62°;$$

$$I_{II} = \frac{U_{23}}{z_{II}} = \frac{220}{10{,}66} = 20{,}6\ \text{A}.$$

III tarvitaja:

$$R_{III} = 15\ \Omega;\ x_{III} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{III} = 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 0{,}02 = 6{,}28\ \Omega;$$

$$z_{III} = \sqrt{R_{III}^2 + x_{III}^2} = \sqrt{15^2 + 6{,}28^2} = 16{,}25\ \Omega;$$

$$\operatorname{tg}\ \varphi_{III} = \frac{x_{III}}{R_{III}} = \frac{6{,}28}{15} = 0{,}418;\ \varphi_{III} = 22°40';$$

$$I_{III} = \frac{U_{31}}{z_{III}} = \frac{220}{16{,}25} = 13{,}55\ \text{A}.$$

Valime vooludele mõõtvahekorra ja ehitame faasivoolude I_I, I_{II} ja I_{III} vektorid vastavate nurkade φ_I, φ_{II} ja φ_{III} all nende faasipingete U_{12}, U_{23} ja U_{31} suhtes.

Liites faasivoolude I_I ja $-I_{III}$, I_{II} ja $-I_I$, I_{III} ja $-I_{II}$ vektorid, saame liinivoolude vektorid I_1, I_2 ja I_3.

Mõõtvahekorras ehitatud liinivoolude diagramm annab nendele järgmised väärtused:

$$I_1 \sim 29\ \text{A};\ I_2 \sim 42\ \text{A ja}\ I_3 \sim 23\ \text{A}.$$

Määrame ühe neist vooludest, näiteks I_1 analüütiliselt. Selleks projekteerime sõlme A vektorid telgedele OX ja OY (vt. joon. 108), saame:

$$I_{1x} = AH \cdot \cos\ (HAX) + AD \cdot \cos\ (DAX) = 13{,}55 \cdot \cos\ (60° -$$

$$- 22°\,40') + 21 \cdot \cos\ (120° - 17°\,25') =$$

$$= 13{,}55 \cdot 0{,}795 - 21 \cdot 0{,}218 = 5{,}18\ \text{A};$$

$$I_{1y} = AH \cdot \cos\ (HAY) + AD \cdot \cos\ (DAY) =$$

$$13{,}55 \cdot \cos\ (30° + 22°\,40') + 21 \cdot \cos\ (30° - 17°\,25') =$$

$$= 13{,}55 \cdot 0{,}607 + 21 \cdot 0{,}976 = 28{,}7\ \text{A};$$

kust

$$I_1 = \sqrt{I_{1x}^2 + I_{1y}^2} = \sqrt{5{,}18^2 + 28{,}7^2} = 29{,}3 \text{ A.}$$

Täpselt samuti leitakse ka teised voolud. Soovitame lugejale neid leida iseseisvalt ja neid võrrelda graafiliselt saadud tulemustega.

Sõltumatult generaatori mähiste lülitusviisist, tarvitajaid võidakse lülitada soovikohaselt kas tähte või kolmnurka, kusjuures selle või teise lülituse valik oleneb võrgupinge ja tarvitaja nimipinge suurustest.

Vaatleme näitena, kuidas tuleks lülida üht keerdvoolu-mootorit, kui on teada, et tema faasipinge on 220 V ja liinipinge 380 V. Kui mootor lülitada kolmnurka, siis faasipinge võrdub liinipingega, s. t. mootori faasis oleks 380 V, kuna mootor on arvutatud kõigest 220 V-le; tähendab kolmnurka teda lülida ei tohi. Lülides teda aga tähte, saame mootori faasipinge

$$U_f = \frac{U_l}{\sqrt{3}} = \frac{380}{1{,}73} = 220 \text{ V,}$$

s. t. faasipinge võrdub parajasti just nimipingega.

Tuleb märkida, et generaatori mähised tavaliselt ühendatakse tähte. Generaatoris on tähtlülitusel teatavad paremused: süsteem on lahtine (kokku on ühendatud ainult mähiste lõpud), järelikult generaatoris pole sisemiste voolude ohtu; liinipinge on 1,73 korda suurem generaatori mähiste pingest (mis võimaldab tarvitada nõrgemat mähiste isolatsiooni, vähendab masina mõõte ja hinda); võib omada neljajuhtmelist süsteemi jne.

43. Keerdvoolu võimsus.

Kuna keerdvool on kolme ühefaasilise voolu süsteem, siis ka tema võimsus võrdub nende võimsuste summaga:

$$N = N_{\text{I}} + N_{\text{II}} + N_{\text{III}} = U_{\text{I}} \cdot I_{\text{I}} \cdot \cos \varphi_{\text{I}} +$$

$$+ U_{\text{II}} \cdot I_{\text{II}} \cdot \cos \varphi_{\text{II}} + U_{\text{III}} \cdot I_{\text{III}} \cdot \cos \varphi_{\text{III}}.$$

Faaside ühtlasel koormusel, s. t. kui

$$N_{\text{I}} = N_{\text{II}} = N_{\text{III}},$$

võimsus avaldub valemiga

$$N = 3 \cdot N_f = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos \varphi; \qquad (64)$$

kuid see valem pole küllalt käepärane, kuna ta sisaldab pingete ja voolude faasiväärtusi, tavaliselt on aga teada liiniväärtused. Seepärast väljendame faasiväärtusi liiniväärtuste kaudu. Tähtlülituses saame

$$U_f = \frac{U_l}{\sqrt{3}};\ I_f = I_l.$$

Asetades need väärtused valemisse (64), saame:

$$N = 3 \cdot \frac{U_l}{\sqrt{3}} \cdot I_l \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot U_l \cdot I_l \cdot \cos\varphi.$$

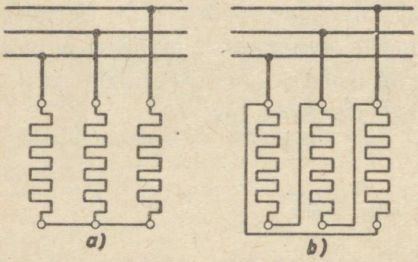
Kolmnurklülituses vastavad vahekorrad on järgmised:

$$U_f = U_l;\ I_f = \frac{I_l}{\sqrt{3}},$$

mis pärast asetamist annab

$$N = 3 \cdot U_l \cdot \frac{I_l}{\sqrt{3}} \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot U_l \cdot I_l \cdot \cos\varphi, \qquad (65)$$

s. t. me saame ühesuguse valemi nii kolmnurgale kui ka tähele.



Joon. 110.

Näide 25. Elektriahjus on kolm takistuste rühma, igaüks 10 Ω.

Leida ahju poolt 220 V-st võrgust tarvitatav võimsus ja liinivoolud takistuste lülitamisel tähte ja kolmnurka. Võimsustegurit võib võtta võrdseks ühega.

Joonisel 110-a on näidatud takistuste lülitus tähte. Määrame iga faasi pinge

$$U_f = \frac{U_l}{\sqrt{3}} = \frac{220}{1{,}73} = 127 \text{ V}.$$

Faasivoolu tugevuse leiame Ohmi seaduse abil

$$I_f = \frac{U_f}{R} = \frac{127}{10} = 12{,}7 \text{ A}.$$

Tähtlülituses liinivool võrdub faasivooluga

$$I_l = I_f = 12{,}7 \text{ A}.$$

Võimsuse tarviduse määrame valemiga

$$N = \sqrt{3} \cdot U_l \cdot I_l \cdot \cos \varphi = 1{,}73 \cdot 220 \cdot 12{,}7 \cdot 1 = 4840 \text{ W}.$$

Nüüd lülime ahju ümber kolmnurka.
Vastav skeem on näidatud joonisel 110-b.
Sel juhul faasipinge võrdub liinipingega, s. t.

$$U_f = U_l = 220 \text{ V}.$$

Faasivool võrdub:

$$I_f = \frac{U_f}{R} = \frac{220}{10} = 22 \text{ A}.$$

Leiame liinivoolu

$$I_l = \sqrt{3} \cdot I_f = 1{,}73 \cdot 22 = 38{,}1 \text{ A}.$$

Tarvitatav võimsus võrdub

$$N = \sqrt{3} \cdot U_l \cdot I_l \cdot \cos \varphi = 1{,}73 \cdot 220 \cdot 38{,}1 \cdot 1 = 13\,520 \text{ W}.$$

Nagu näeme, võimsuse tarvidus võrreldes tähtlülitusega suurenes kolmekordseks.

X peatükk.

VAHELDUVVOOLU-GENERAATORID.

44. Generaatorite ehitus.

Me tutvusime vahelduvvoolu-generaatorite ehituse põhimõttega VI peatüki punktis 27. Kuna ühefaasilised generaatorid omavad väga piiratud kasutamisala, siis järgnevalt vaatleme ainult keerdvoolu-generaatoreid.

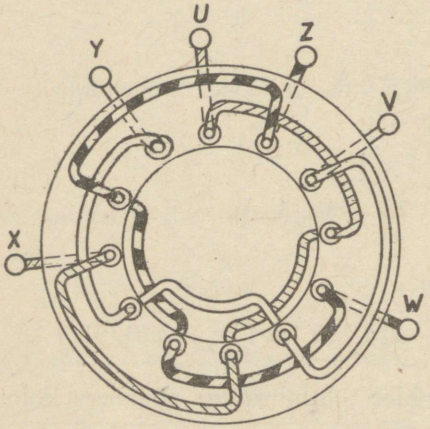
Raudlehtedest koostatud generaatori staatori mähise valmistamine toimub punktis 40 kirjeldatud põhimõtte järgi.

Joonisel 111 on näidatud neljapooluselise ganeraatori mähise skeem, kuna joonisel 112 on näidatud neljapooluselise generaatori üksikutest poolidest koosnev mähis, mis omab kahte uuret pooluse ja faasi kohta. Nagu ülal juba selgitatud, ühendatakse mähis tavaliselt tähte. Rootor moodustab endast elektromagnetite süsteemi, mille mähiseid toidetakse alalisvooluga.

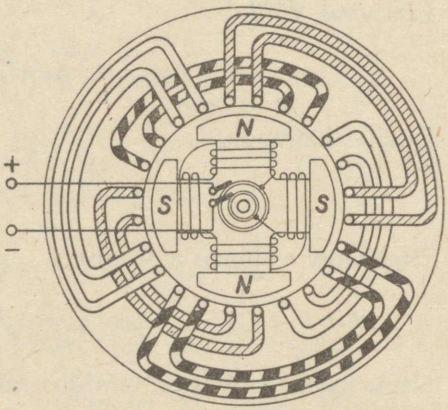
Rotoori poolt tekitatud magnetvoo jõujooned lõikavad staatori mähist ja indutseerivad selles EMJ, mille sagedus on

$$f = \frac{p \cdot n}{60},$$

s. t. sagedus on võrdeline rootori pooluste paaride arvuga p ja tema pöörlemise kiirusega n. Alalisvooluga ergutatavaid masinaid, millede pöörete arv täpselt vastab sagedusele, nimetatakse sünkroonmasinateks.



Joon. 111.



Joon. 112.

Generaatori induktoreid ehitatakse kahte tüüpi: magnetrattana ja turborootorina. Generaatoritel, mis töötavad pöörete arvuga 1000 pööret/min. ja vähem, kasutatakse magnetrattaid.

Sageduse valemist nähtub, et generaatori pooluste paaride arv

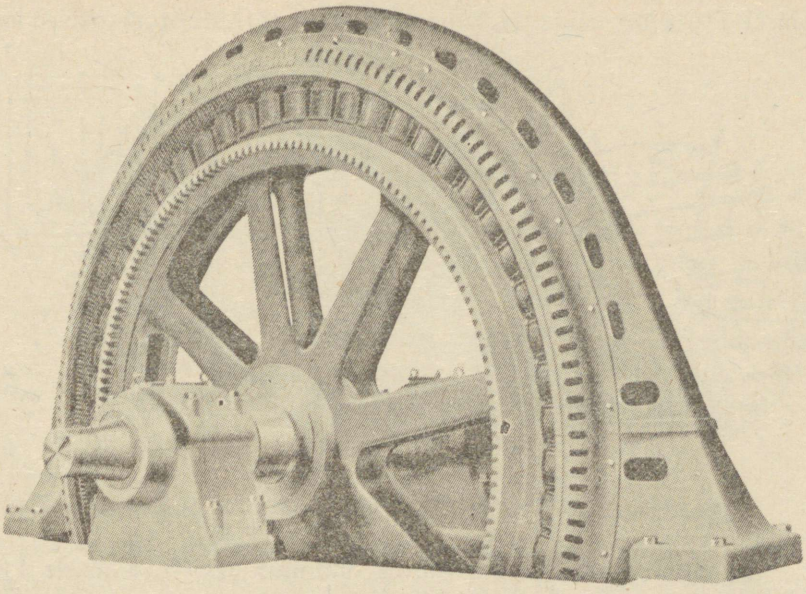
$$p = \frac{60 \cdot f}{n}$$

on täiesti määratud pöörete arvu ja sagedusega. Generaatori rootorit käitatakse mingi primaarse jõumasinaga, näiteks auruturbiiniga, aurumasinaga, diiselmootoriga, hüdroturbiiniga jne. Aurumasin, hüdroturbiin ja diiselmootor töötavad tavaliselt madala pöörete arvuga, mille tagajärjel nende masinate käitatava generaatori pooluste arv rootoril on suur.

Niisuguseid aeglaselt jooksvaid rootoreid ehitatakse alati magnetrattana. Joonisel 113 on näidatud aeglaselt jooksva generaatori väliskuju, kus on selgesti nähtav ka magnetratta ehitus.

Rootor ehitatakse massiivse hooratta kujul, mille pinnale on kinnitatud poolused. Pooluste südamikud tehakse terasest. Pooluste südamikkude

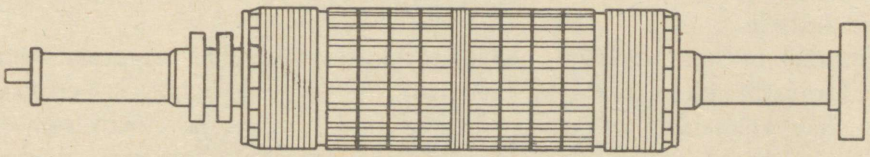
külge kinnitatakse teraslehtedest valmistatud poolusekingad. Poolusekinga kuju peab tagama generaatori EMJ sinusoidaalset kuju, nagu sellest on räägitud VI peatükis.



Joon. 113.

Auruturbiinidega töötavad generaatorid omavad isesuguse konstruktsiooniga rootorit, mida nimetatakse turborootoriks.

Auruturbiin on kiirelt jooksev masin. Generaatoritele sagedusega 50 Hz ehitatakse auruturbiinid tavaliselt 3000 või 1500 pööret/min., mis vastavalt tingib rootoril kaks või neli poolust.



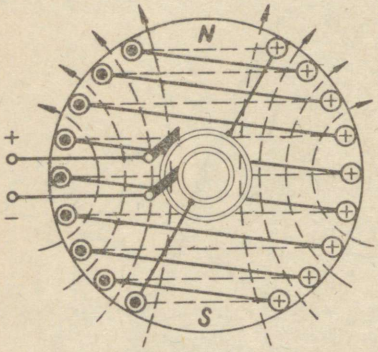
Joon. 114.

Joonisel 114 on näidatud kahepooluselise turborootori väliskuju, joonisel 115 aga mähise skeem. Terassilindrisse freesitakse paralleelselt rootori teljega uurded, milledesse paigutatakse ergutusmähis.

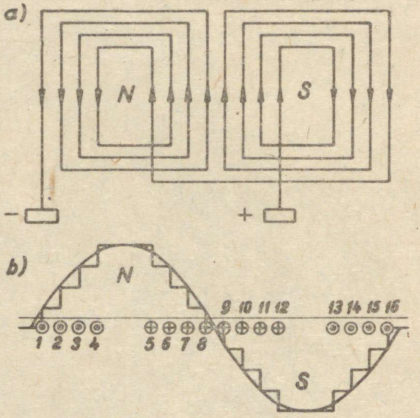
Mähis kinnitatakse rootori uuretesse kiiludega mittemagnetilisest metallist — alumiiniumpronksist või mittemagnetilisest terasest.

Rootorist väljaulatuvad mähise osad kaetakse terasbandaažidega. Bandaaž kujutab endast õhukeseseinalist silindrit mittemagnetilisest terasest.

Joonisel 116-a on näidatud kahepooluselise turborootori mähise laotatud



Joon. 115.



Joon. 116.

skeem. Magnetilise induktsiooni jaotus õhupilus vastab joonisele 116-b ja on saadud järgmiste arutluste alusel.

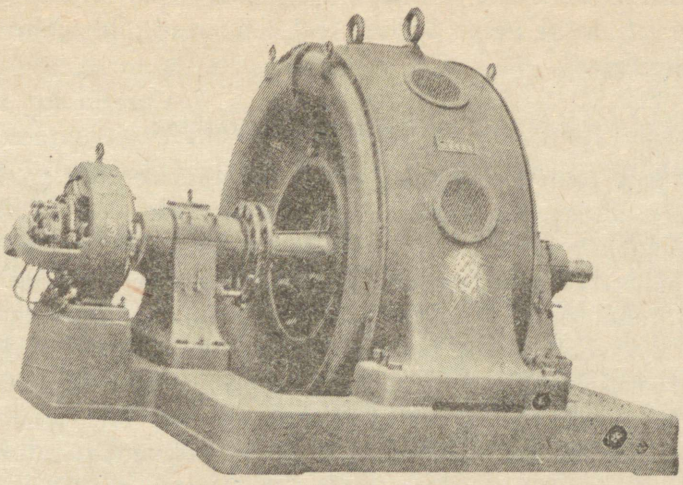
Õhupilu ühtlase laiuse tagajärjel rootori kogu pinnal võib magnetilist takistust kõigile jõujoontele lugeda püsivaks väärtuseks ning magnetilist induktsiooni — otsevõrdeliseks amperkeerdudega. Osad 4—5 ja 12—13 ümbritsetakse pooluse mähise kõigi amperkeerdudega, seepärast on induktsioon nendes osades kõige suurem. Sõltuvalt lähenemisest äärmistele amperkeerdudele 1—8 ja 9—16 koos amperkeerdude vähenemisega väheneb ka induktsioon. Nii osades 1—2 ja 7—8 mõjub ainult üks amperkeerd 1—8. Induktsiooni jaotus on seetõttu astmelise iseloomuga, mis on väga lähedane sinusoidaalsele.

Joonisel 117 on näidatud generaatori väliskuju ühes ergutusmasinaga.

Hüdroturbiinidega töötavad generaatorid omavad tavaliselt vertikaalset võlli. See võimaldab paigutada seadme hüdraulilised ja elektrilised osad eri kordadele. Joonisel 118 on näidatud vertikaalse võlliga generaator väliskuju.

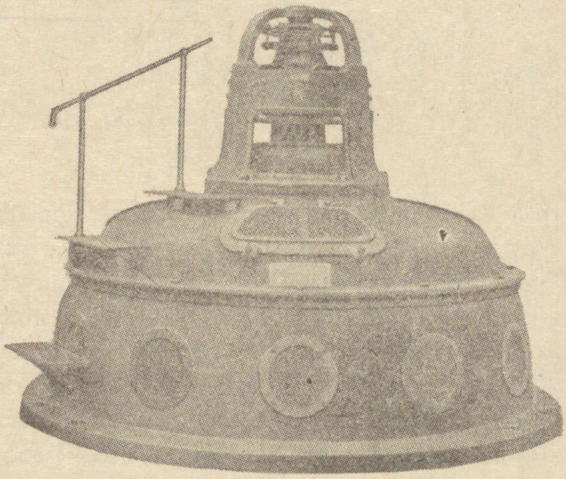
Vaatamata kaasaegsete võimsate turbogeneraatorite kõrgele kasutegurile, on neis eralduv soojuse hulk väga suur. Näiteks 50 000 kW generaatori kaod moodustavad umbes 1000 kW (kasutegur 98 %), mis annab 240 kilokalorit sekundis. Niisuguse suure soojuse hulga kõrvalejuhtimine on iseendast väga

keeruline probleem. Generaatori jahutust teostatakse tavaliselt järgmisel viisil. Ventilaatoriga ringiaetav õhk voolab piki kanaleid staatori ja rootori



Joon. 117.

kehades ja viib neilt soojust. Vanades konstruktsioonides võeti õhk otse atmosfäärist, juhiti erilistesse filtritesse, kus teda puhastati mustusest ja tolmust, kuna soojenenud õhk juhiti otse õue. Kuid vajadus filtrite sagedase puhastamise järele ja õhu mitte küllaldane puhastus, mille tagajärjel ummis-



Joon. 118.

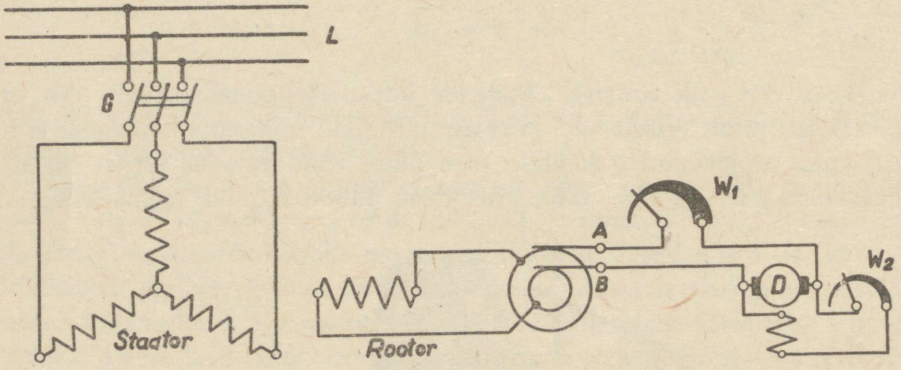
tusid generaatori ventilatsioonikanalid, sundis kaasaegsetes generaatorites üle minema kinnisele ventilatsiooni süsteemile. Soojenenud õhk juhitakse nõndanimetatud jahutajasse — kambrisse, mida läbib suur hulk torusid. Torudes voolab külm vesi. Sellisel teel jahutatud õhk juhitakse jällegi generaatorisse tagasi.

45. Generaatorite töötamine.

Generaatorite töötamiseks tuleb teatavasti tema rootorit toita alalisvooluga, kusjuures alalisvoolu allikat sel juhul nimetatakse ergutajaks.

Vahelduvvoolu-generaator võib omada kas iseseisvat ergutajat või töötada nõndanimetatud tsentraliseeritud (keskendatud) ergutusega.

Esimesel juhul on ergutajaks väike, vahelduvvoolu-generaatori võllile paigutatud alalisvoolu-masin, tavaliselt haruvoolu-generaator. Joonisel 119 on näidatud sellise generaatori skeem: sõnaga „staator" on seal märgitud generaatori staatori mähised, milledega lüliti G abil ühendatakse toidetav võrk L; rootorile juhitakse harjade A ja B ning magnetregulaatori W_1 kaudu



Joon 119.

alalisvoolu ergutajast D, milleks on generaatori rootoriga ühisel võllil istuv väike haruvoolu-masin. Ergutaja haruvoolu ringi on sisse lülitatud ergutusregulaator W_2, millega võib reguleerida masina klemmipinget ja ühes sellega ka rootorit toitva voolu suurust. Sellepärast mõlemad regulaatorid — W_1 ja W_2 — on ette nähtud vahelduvvoolu-generaatori klemmipinge reguleerimiseks.

Ergutusregulaatori W_2 takistuse vähendamisel ergutaja klemmipinge suureneb, mille tagajärjel suureneb ka voolutugevus rootori vooluringis ja tema mähise poolt tekitatav magnetvoog. Järelikult ühtlasel rootori pöörlemise kiirusel saadakse staatori juhtmete tihedamat lõikumist magnetvoo jõujoontega, s. t. juhtmetes tekib suurem elektromotoorne jõud ja järelikult

ka suurem pinge generaatori klemmidel; nähtub, et ergutusregulaatori takistuse muutmisega võib reguleerida vahelduvvoolu-generaatori pinget.

Tsentraliseeritud ergutuse puhul ergutajaks võib olla akumulaatorpatarei või iseseisvalt jõumasinalt käitatav alalisvoolu-generaator. Sel juhul ergutaja võib toita mitut generaatorit ja teda võib kasutada ka jõujaama abiseadmete toitmiseks.

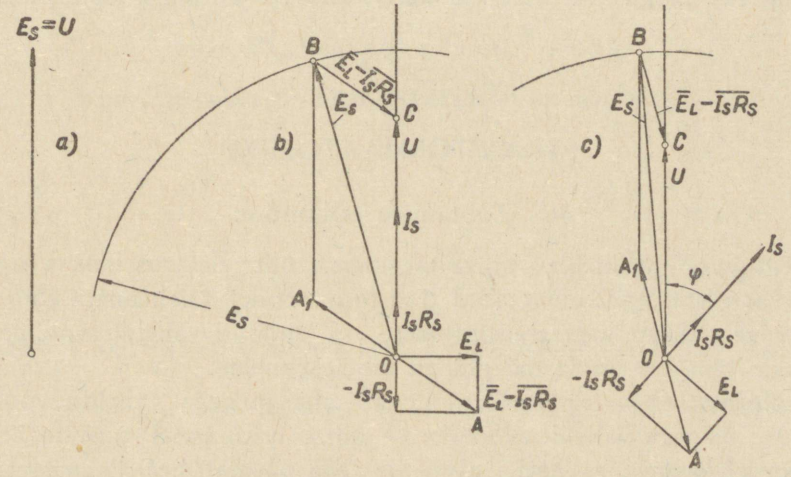
Säärast ergutusviisi kasutatakse tavaliselt generaatoritel, milledel rootorid on otseselt sidestatud aeglaselt jooksvate jõumasinate võllidega, näiteks hüdrogeneraatoritel.

Generaatori tühijooksul tema klemmipinge U võrdub rootori jõujoonte ja staatori juhtmete lõikumise tagajärjel staatoris indutseeritud EMJ-iga E_s (vt. joon. 120, diagramm a). Koormusel staatori juhtmetes voolab vool, mis tekitab generaatori mähises pingelangust $I_s \cdot R_s$, kus I_s — staatori vool, (mis mähiste ühendamisel tähte võrdub vooluga välisvooluringis, s. t. koormuse vooluga, kuna ühendamisel kolmnurka on temaga võrdeline), ning R_s — staatori mähise takistus. Staatori mähist läbiv vahelduvvool I_s tekitab selles omainduktsiooni EMJ E_L; viimane liitub staatori mähiste ja rootori jõujoonte lõikumisest saadud EMJ-iga E_s, mille tagajärjel staatoris mõjub summaarne $\bar{E}_1 = \bar{E}_s + \bar{E}_L$. Koormusel klemmipinge on seega sellest EMJ-ist väiksem pingelanguse $I_s \cdot R_s$ võrra, s. t.

$$\bar{U} = \bar{E}_s + \bar{E}_L - \overline{I_s \cdot R_s}.$$

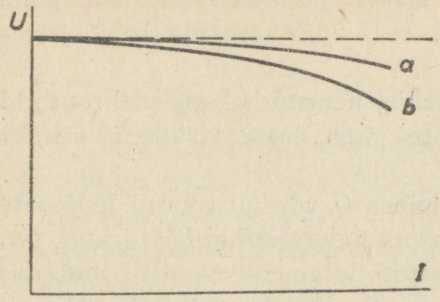
Vaatleme kahte juhtu:

1) Puhtaktiivne koormus (joon. 120-b). Siin vool I_s faasiliselt langeb ühte pingega U. Tekitagu rootor staatoris samasugust EMJ nagu



Joon. 120.

tühijooksul; diagrammis võime siis tõmmata ringi raadiusega E_s. Valides pinge vektorile vertikaalse suuna, joonestame samas suunas voolu vektori I_s; viimasest jääb 90° võrra maha vektor E_L; liites E_L ja $-I_s \cdot R_s$, saame vektori OA, mis liidetuna E_s-ga annab otsitava suuruse U. Ehitamiseks joonestame vektoriga OA võrdse vektori OA_1, selle tipust tõmbame vektorile U paralleelse sirglõigu A_1B kuni lõikumiseni ringiga ning lõikumispunktist B tõmbame OA-le paralleelse (ja ühtlasi ka temaga võrdse) sirglõigu BC. Siis OC ongi otsitav pinge.



Joon. 121.

Diagrammist nähtub, et voolutugevuse I_s (s. t. koormuse) suurenemisel generaatori klemmipinge väheneb; seepärast generaatori väliskarakteristik, s. t. generaatori klemmipinge olenevus koormuse voolust, kujundub joonisel 121 kõvera *a* näol.

2) Induktiivne koormus. Siin vool I_s jääb faasiliselt pingest U maha nurga φ võrra. Ehitades täpselt samasuguse diagrammi nagu eelmiselgi juhul (joon. 120-c), saame pinge, mis on samal koormusel ja samasuguse EMJ E_s juures väiksem kui eelmisel juhul; seepärast väliskarakteristik kujundub kõveraga *b* (joon. 121), mis langeb rohkem kui kõver *a*.

Niisiis generaatori klemmipinge muutub sõltuvalt koormuse iseloomust ja suurusest; selle reguleerimiseks on ergutustakistus, mida püsiva pinge alalhoidmiseks võrgus varustatakse kiirelt töötava automaatregulaatoriga.

XI peatükk.

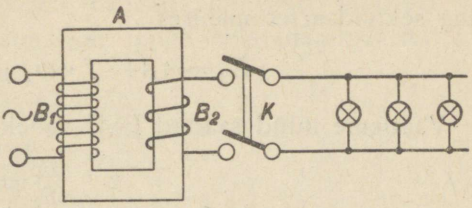
TRANSFORMAATORID.

46. Töötamise põhimõte.

Vahelduvvool võimaldab võtta tarvitusele ühte elektrotehnikas sagedasti kasutatavat riista, nõndanimetatud transformaatorit. Liialdamata võib öelda, et võrreldes alalisvooluga transformaator on andnud vahelduvvoolule selle ülekaaluka tähtsuse, mida me praegu tähele paneme.

Transformaator — riist, mis muundab ühe pingega vahelduvvoolu iga teistsuguse pingega vahelduvvooluks — omab eriti suurt tähtsust energia ülekandmisel kauge maa peale, nagu me seda näeme ühes järgmistest peatükkidest.

Joonisel 122 on näidatud transformaator skemaatiliselt. Ta kujutab endast raudplekkidest koostatud südamikku A, millele on paigutatud kaks isoleeritud vasktraadist mähist B_1 ja B_2. Üks neist mähistest — joonisel 122 mähis B_1 — on ühendatud vahelduvvoolu energia allikaga. Seda mähist me nimetame primaarmähiseks. Teise mähise, meie skeemis B_2 klemmidele on ühendatud koormus, näiteks hõõglambid. Seda mähist me nimetame sekundaarmähiseks.



Joon. 122.

Transformaatori töötamise põhimõte seisneb järgmises: võrgust primaarsesse mähisesse juhitav vahelduvvool tekitab südamikus vahelduvat magnetvoogu. See magnetvoog, lõigates mähiste keerdusid indutseerib nendes vastavalt induktsiooni põhimõttele EMJ.

Mõlema mähise igas keerus indutseeritud EMJ suurus, Maxwelli seaduse alusel võrdub

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ (volti)}.$$

Kuna magnetvoog südamikus muutub sinusoidi seaduse järgi, s. t.

$$\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t,$$

siis, asetades viimase avaldise eelmisesse, saame:

$$e = -\frac{d\Phi_m \cdot \sin \omega t}{dt} \cdot 10^{-8} \text{ (volti)} =$$

$$= -\Phi_m \cdot \omega \cdot \cos \omega t \cdot 10^{-8} \text{ (volti)}.$$

EMJ maksimaalse väärtuse saame, võttes $-\cos \omega t = 1$; siis

$$E_m = \Phi_m \cdot \omega \cdot 10^{-8} \text{ (volti)};$$

kuna

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f,$$

siis

$$E_m = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \Phi_m \cdot 10^{-8} \text{ (volti)}.$$

Jagades EMJ maksimaalse väärtuse $\sqrt{2}$-ga, saame efektiivväärtuse

$$E = \frac{2 \cdot \pi}{\sqrt{2}} \cdot f \cdot \Phi_m \cdot 10^{-8} = 4{,}44 \cdot f \cdot \Phi_m \cdot 10^{-8} \text{ (volti)}.$$

Niisugust EMJ indutseeritakse mõlema mähise igas keerus. Kui primaarse mähise keerdude arv võrdub w_1, ja sekundaarse mähise oma — w_2,

siis vahelduva magnetvooga primaarses mähises indutseeritav kogu elektromotoorne jõud on

$$E_1 = 4{,}44 \cdot f \cdot w_1 \cdot \Phi_m \cdot 10^{-8} \text{ (volti)},$$

ning sekundaarses mähises

$$E_2 = 4{,}44 \cdot f \cdot w_2 \cdot \Phi_m \cdot 10^{-8} \text{ (volti)}.$$

Vaatleme nüüd saadud EMJ vahekorda. Ilmselt

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \tag{66}$$

sest kõik muud mõlemale mähisele ühised korrutajad koonduvad. Saadud vahekorda väljendatakse järgmiselt: vahelduva magnetvooga transformaatori mähistes indutseeritud EMJ on otsevõrdelised nende mähiste keerdude arvudega.

Transformaatori tühijooksul, s. t. avatud lüliti K puhul (koormus puudub), mähises B_2 voolu ei ole. Järelikult ei ole ka mingit pingelangust sekundaarmähises ja transformaatori sekundaarklemmidel pinge U_2 võrdub sekundaarmähise EMJ E_2-ga.

Primaarmähises voolab siis tähtsusetu tühijooksuvool I_{10}.

Selle voolu väiksuse tõttu võib mitte arvestada pingelangust primaarses mähises ja lugeda, et generaatori poolt primaarsele mähisele ühendatud pinge U_1 täielikult tasakaalustatakse mähises indutseeritava EMJ E_1-ga.

Seetõttu transformaatori tühijooksu kohta võib kirjutada järgmised vahekorrad:

$$U_1 \approx E_1,$$

$$U_2 = E_2.$$

Arvesse võttes avaldist (66), saame:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}. \tag{67}$$

Transformaatori tühijooksul mähiste klemmipinged suhtuvad nagu keerdude arvud.

Pingete suhet transformaatori tühijooksul nimetatakse transformeerimise koefitsiendiks ja märgitakse tähega K:

$$\frac{U_1}{U_2} = K. \tag{68}$$

Kui primaarne mähis omab rohkem keerdusid kui sekundaarne, siis koormuse pinge on madalam kui generaatoril ja transformaator töötab pinget vähendavalt.

Ühendades energia allikaga väikese keerdude arvuga mähise, saame suurema keerdude arvuga sekundaarmähises suurema pinge, kui andsime transformaatorile. Transformaator töötab pinget suurendavalt.

Näide 26. Transformaatori primaarse mähisega, mis omab 4500 keerdu, on ühendatud pinge 6000 V. Kui suur on pinge sekundaarmähises, kui sekundaarmähise keerdude arv on 90?

Mähiste keerdude arvude suhe võrdub

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{4500}{90} = 50.$$

See suhe on võrdne pingete suhtega tühijooksul, s. t.

$$K = \frac{U_1}{U_2} = 50,$$

kust

$$U_2 = \frac{U_1}{50} = \frac{6000}{50} = 120 \text{ V}.$$

Nii siis, sekundaarmähises on pinge 120 V.

Niisugust transformaatorit võib lülida linna kaablivõrku (pinge Leningradi kaablivõrgus on 6000 V) ja temaga toita valgustusseadet.

47. Transformaatori koormamine.

Ühendame transformaatori sekundaarmähise klemmidega mingi tarvitaja. Sekundaarses vooluringis voolab siis vool

$$I_2 = \frac{E_2}{z_2},$$

kus E_2 — sekundaarmähises indutseeritud EMJ ja z_2 — terve sekundaarse vooluringi kogutakistus.

Läbides transformaatori mähist vool I_2 tekitab amperkeerud $I_1 \cdot w_2$, mis mõjuvad samas transformaatori südamiku magnetilises ringis nagu primaarse mähise amperkeerudki. Sel viisil magnetvoogu südamikus tekitatakse transformaatori mõlema mähise amperkeerdude ühisel mõjul.

Lenz'i reegli kohaselt sekundaarmähises indutseeritud vool on suunatud selliselt, et töötab teda esilekutsuvale põhjusele vastu. Antud juhul sekundaarmähises voolu esilekutsuvaks põhjuseks on vahelduv magnetvoog südamikus. Järelikult sekundaarne vool peab olema suunatud nii, et tema amperkeerud vähendaksid magnetvoogu, töötades vastu primaarmähise amperkeerdudele. Magnetvoo vähenemine kutsub esile primaarmähises indutseeritud EMJ vähenemise, ning kuna välispinge klemmidel U_1 jääb muutumatuks, siis pingele vastutöötava EMJ E_1 vähenemine põhjustab

voolu suurenemise primaarses mähises ning primaarse mähise magneetivate amperkeerdude ja resulteeriva magnetvoo tugevnemise. Vool I_1 saavutab väärtuse, mille puhul jällegi tekib tasakaal välispinge U_1 ja EMJ E_1 vahel.

Me näeme, et koormuse suurenemisel transformaatori sekundaarses vooluringis suureneb primaarse vooluringi voolutugevus. Soovitame lugejale omal jõul selgitada voolude, magnetvoo ja EMJ muutumist sekundaarse vooluringi koormuse vähenemisel.

Määrame sõltuvuse muutumatu primaarse mähise klemmipingega töötava transformaatori primaarse ja sekundaarse mähise amperkeerdude vahel. See tingimus tavaliselt on täidetud tansformaatori ekspluatatsioonis.

Kõrvale jättes tähtsusetu pingelanguse primaarses mähises, võib lugeda, et selles mähises indutseeritud ja välispinget U_1 tasakaalustav EMJ E_1 on samuti püsiv väärtus. EMJ valemist

$$E_1 = 4{,}44 = f \cdot w_1 \cdot \Phi_m \cdot 10^{-8} \text{ (volti)}$$

järgneb, et suuruse E_1 püsiva väärtuse puhul on ka magnetvoo maksimaalne väärtus Φ_m püsiv väärtus, sest teised valemis esinevad suurused — sagedus f ja primaarse mähise keerdude arv w_1 — on juba kahtlemata püsivad väärtused.

Kuid magnetvoog on võrdeline transformaatori mähiste amperkeerdudega. Tühijooksul sekundaarse mähise amperkeerud puuduvad, kuna vool I_2 võrdub nulliga, ning magnetvoog tekitatakse ainuüksi primaarse mähise amperkeerdudega $I_{10} \cdot w_1$, kus I_{10} on endiselt primaarse mähise tühijooksu vool. Kui aga trasformaator on koormatud, siis voolab ka sekundaarses mähises vool I_2 ja magnetvoog tekitatakse mõlema mähise amperkeerdude $I_1 \cdot w_1$ ja $I_2 \cdot w_2$ üheaegsel mõjul. Kuna magnetvoo suurus tühijooksul ja koormusel on üks ja sama, (transformaator on ühendatud püsiva pingega U_1), siis ka seda magnetvoogu tekitav amperkeerdude summaarne mõju peab jääma püsivaks väärtuseks, s. t. tühijooksu amperkeerud $I_{10} \cdot w_1$ peavad võrduma koormusel m õjuvate amperkeerdude $I_1 \cdot w_1$ ja $I_2 \cdot w_2$ summaga

$$\overline{I_{10} \cdot w_1} = \overline{I_1 \cdot w_1} + \overline{I_2 \cdot w_2}. \qquad (69)$$

Summa võtame seejuures geomeetrilise, kuna voolud I_1 ja I_2 faasiliselt ei ühtu.

See liitmine on teostatud graafiliselt joonisel 123, kus on näidatud transformaatori lihtsustatud vektordiagramm.

Alustame ehitamist vabalt suunatud vektorist Φ_m, mis kujutab teatavas mõõtvahekorras transformaatori magnetvoo maksimaalset väärtust; siis ehitame tühijooksu amperkeerdude vektori $I_{10} \cdot w_1$. Jättes tähele panemata

mõningad nähted transformaatori rauas, võib lugeda, et magnetvoog faasiliselt ühtub teda tekitava vooluga, s. t. antud juhul transformaatori tühijooksuvooluga I_{10}. Seepärast asetame vektori $I_{10} \cdot w_1$ magnetvoo vektori suunas, valides eelnevalt amperkeerdude mõõtvahekorra.

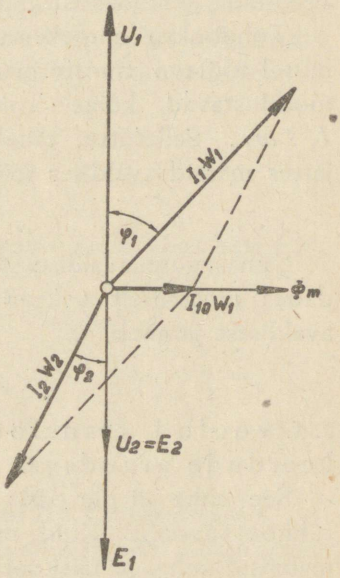
Seesama vektor teisstuguses mõõtvahekorras nähtavasti vastab tühijooksuvoolule I_{10}, sest keerdude arv w_1 on püsiv suurus.

Magnetvoog Φ_m indutseerib primaarses ja sekundaarses mähises EMJ E_1 ja E_2, mis nagu igasugused vahelduvvooluga indutseeritud EMJ, jäävad magnetvoost faasiliselt 90° nurga võrra maha.

Suuruselt EMJ E_1 ja E_2 on võrdelised keerdude arvudega. Joonisel 123 nad on näidatud vektoritena E_1 ja E_2, mis magnetvoo vektori Φ_m suhtes on pööratud kellaosuti suunas 90° võrra. Jättes tähele panemata tähtsusetud pingelangused transformaatori mähistes, võib lugeda et sekundaarse mähise klemmipinge U_2 võrdub selles indutseeritud EMJ-iga E_2 ($U_2 = E_2$), ning et võrgu poolt primaarse mähise klemmidega ühendatud pinge U_1 tasakaalustab temas indutseeritud EMJ E_1, s. t. võrdub E_1-ga ja on temale vastupidiselt suunatud.

$$U_1 = -E_1 .$$

Diagrammis primaarse pinge U_1 vektor võrdub vektoriga E_1 ja on temale vastupidiselt suunatud.



Joon. 123.

Transformaatori sekundaarse vooluringi pinge U_2 mõjul voolab selles vool I_2, mis on faasiliselt nihutatud pinge U_2 suhtes teatava, koormusest oleneva nurga φ_2 võrra. Erijuhul, puhtaktiivsel koormusel faaside nihkenurk sekundaarses vooluringis on võrdne nulliga.

Joonisel 123 sekundaarse mähise amperkeerdude vektor $I_2 \cdot w_2$ on paigutatud pinge U_2 suhtes faaside nihkenurga φ_2 all.

Sõltumatult voolu I_2 olemasolust ja selle väärtusest magnetvoogu Φ_m tekitavad amperkeerud peavad säilitama oma püsivat suurust $I_{10} \cdot w_1$. Järelikult primaarses vooluringis peab nüüd voolama amperkeerdusid $I_1 \cdot w_1$ tekitav vool I_1, mille amperkeerud koos sekundaarse mähise amperkeerdudega $I_2 \cdot w_2$ annaksid eelmisi püsivaid amperkeerde $I_{10} \cdot w_1$. Seda tingimust rahuldab vektor $I_1 \cdot w_1$, mis on ehitatud parallelogrammi teise küljena, lähtudes tuntud diagonaalist $I_{10} \cdot w_1$ ja küljest $I_2 \cdot w_2$.

Võrreldes omavahel vektoreid $I_{10} \cdot w_1$ ja $I_1 \cdot w_1$, me näeme, et nende vektoritega võrdeline vool primaarses mähises koormuse sisselülimisel on tunduvalt suurenenud, nagu seda võiski oodata. On silmanähtav, et koormuse suurenemisel sekundaarses vooluringis vool I_2 ja ühes sellega vektor $I_2 \cdot w_2$ kasvavad, mis vektori $I_{10} \cdot w_1$ püsiva väärtuse puhul kutsub esile vektori $I_1 \cdot w_1$ suurenemise, s. t. et koos koormuse voolu I_2 suurenemisega kasvab ka transformaatori poolt võrgust võetav vool I_1. Koormuse eelmise faaside nihkenurga φ_2 säilimisel faaside nihkenurk transformaatori primaarses vooluringis φ_1 väheneb. Soovitame lugejale omal jõul selles veenduda, ehitades diagrammi voolu I_1 suuremale väärtusele.

Tühijooksu ampekeerud $I_{10} \cdot w_1$ on väga väikesed võrreldes täiskoormusel töötava transformaatori amperkeerdudega $I_1 \cdot w_1$ ja $I_2 \cdot w_2$, ning moodustavad kõige rohkem 3—5% primaarsetest amperkeerdudest $I_1 \cdot w_1$. Selletõttu, tähele panemata jättes suurust $I_{10} \cdot w_1$ ja kõrvale jättes märgid avaldises (69), võime kirjutada

$$I_1 \cdot w_1 \approx I_2 \cdot w_2 .$$

Samasuguse avaldise saame ka diagrammi vaatlusest joonisel 123, vähendades mõtteliselt vektorit $I_{10} \cdot w_1$ nullile lähedase väärtuseni. Kirjutatud avaldisest järgneb, et

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{w_2}{w_1},$$

s. t. voolud transformaatori mähistes on pöördvõrdelised keerdude arvudega.

See suhe ei ole päris täpne, sest me jätsime tähele panemata väikese tühijooksuvoolu. Kuid mida suurem on koormus, seda täpsem on ülalmainitud suhe, ja täiskoormusel võib teda kasutada ligikaudsete arvutuste jaoks.

Suhet transformaatorilt saadud kasuliku võimsuse

$$N_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2$$

ja transformaatorile antud võimsuse

$$N_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$$

vahel nimetatakse transformaatori kasuteguriks

$$\eta = \frac{N_2}{N_1}. \qquad (70)$$

Transformaatorite kasutegur on väga kõrge.

Täiskoormusel ja koormuse võimsusteguri võrdudes ühega, väheldaste transformaatorite (5 kVA) kasutegur on vähemalt 0,95. Võimsate transformaatorite kasutegur saavutab väärtusi 0,99 ja rohkem.

Transformaatori elektromotoorset jõudu määrav põhivõrrand, $E = 4{,}44 \cdot f \cdot \Phi_m \cdot w \cdot 10^{-8}$ (volti), võimaldab määrata mähise amperkeerde antud pinge ja raudsüdamiku ristlõike järgi.

Selles valemis EMJ suurust, nagu me nägime ülal, võib lugeda võrdseks mähise klemmipingega U. Magnetvoo Φ_m suurus võrdub maksimaalse induktsiooni B_m ja raua ristlõike S (ruutsentimeetrites) korrutisega.

$$\Phi_m = B_m \cdot S.$$

Induktsiooni B_m suurus ei tohiks aga olla liiga suur, kuna suure küllastuse puhul tugevasti suureneb raua soojenemine; väikese induktsiooni puhul aga raud on halvasti kasutatud, mis omakorda pole majanduslik. Keskmise võimsusega transformaatoritele (kuni 100 kVA) võiks induktsiooni väärtuseks valida 10000 gaussi.

Eeldusel, et $B_m = 10000$ gaussi, saame

$$\Phi_m = 10000 \cdot S.$$

Võrgu sagedus tavaliselt võrdub 50 Hz. Asetades need väärtused EMJ valemisse, saame:

$$U = 4{,}44 \cdot 50 \cdot 10000 \cdot S \cdot w \cdot 10^{-8} \text{ (volti)}$$

ehk

$$U \approx 0{,}022 \cdot S \cdot w \text{ (volt)i,}$$

kust

$$w \approx \frac{45 \cdot U}{S} \text{ keerdu.}$$

Näide 27. Näites 26 vaadeldud pinget vähendav transformaator toidab valgustusseadet, mis koosneb 500-st lambist, igaüks 60 W. Leida transformaatorile antav voolutugevus.

Näites 26 vaadeldud transformaatori sekundaarse vooluringi pinge võrdub

$$U = 120 \text{ V}.$$

Järelikult voolutugevus sekundaarses vooluringis

$$I_2 = \frac{N_2}{U_2 \cdot \cos \varphi_2} = \frac{60 \cdot 500}{120 \cdot 1} = 250 \text{ A}.$$

$\cos \varphi_2 = 1$, sest valgustuskoormus on puhtaktiivseks koormuseks.

Nüüd leiame suhtest

$$\frac{I_2}{I_1} \approx \frac{w_1}{w_2}$$

voolutugevuse I_1:

$$I_1 \approx I_1 \frac{W_2}{W_1}.$$

Vaadeldava transformaatori keerdude arvude suhe võrdub

$$\frac{W_2}{W_1} \approx \frac{90}{4500} = \frac{1}{50};$$

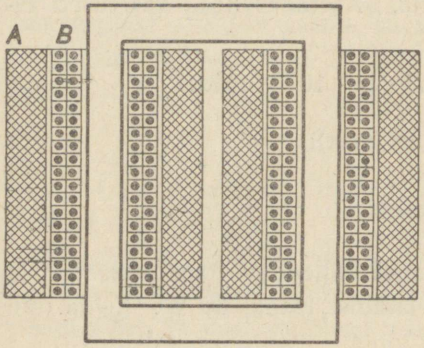
kust

$$I_1 \approx 250\,\frac{1}{50} \approx 5\text{ A}.$$

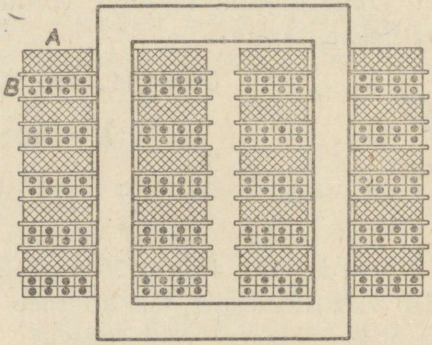
Nii siis, transformaatorile antakse 6000 V voolu tugevusega 5 A, kuna temalt saadakse 120 V voolu tugevusega 250 A.

48. Transformaatorite ehitus.

Konstruktiivselt valmistatakse transformaator selliselt, et nii primaarne kui ka sekundaarne mähis on paigutatud raudkeha mõlemale südamikule, kusjuures esineb kaks mähiste paigutamise viisi.



Joon. 124.



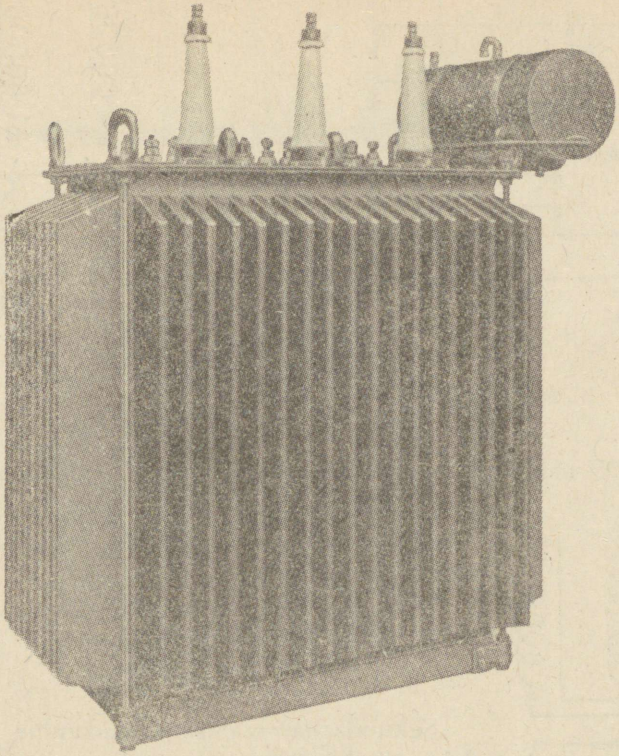
Joon. 125.

Joonisel 124 on näidatud nõndanimetatud silindriline mähis. Raudkeha südamikule mõlemalt poolt on paigutatud üks silindriline madalpingemähis *B* ja selle peale silindriline kõrgepingemähis *A*.

Joonisel 125 on näidatud nõndanimetatud ketasmähis. Siin lameda ketta kujulised madalpinge *(B)* ja kõrgepinge *(A)* mähised on paigutatud südamikule kõrguse suunas kordamööda, vahelduvalt.

Paremaks jahutamiseks keskmiste ja suurte võimsustega transformaatorid paigutatakse õlipaaki, kusjuures viimase seinad paremaks soojusejuhtivuseks valmistatakse erilisest raudplekist või — suurtel võimsustel — varustatakse eriliste ribidega või torudega, milledes tsirkuleerib jahutatav õli (joon. 126).

Keerdvoolu transformeerimiseks kasutatakse keerdvoolu-transformaatoreid.



Joon.. 126.

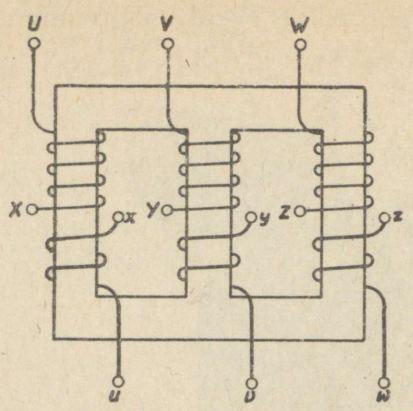
Joonisel 127 on näidatud keerdvoolu-transformaator skemaatiliselt. Iga faasi primaarne ja sekundaarne mähis on paigutatud kolme südamikuga raudkeha eri vardale.

Keerdvoolu-transformaatori mähiste ühendust võidakse teostada mitmesugusel viisil. Nii joonisel 128 on näidatud primaarse ja sekundaarse mähise ühendus tähes (märgistus Y/Y). Kuna keerdvoolu-transformaatori transformeerimise koefitsiendiks nimetatakse liinipingete suhet tühijooksul, siis sellisel ühendusel ta võrdub:

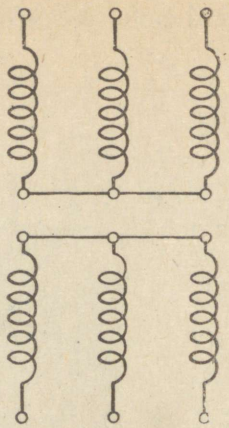
$$K = \frac{U_{l_1}}{U_{l_2}} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{f_1}}{\sqrt{3} \cdot U_{f_2}} = \frac{U_{f_1}}{U_{f_2}}.$$

Kuna kooskõlas eelmisega

$$\frac{U_{f_1}}{U_{f_2}} = \frac{W_1}{W_2}, \text{ siis } K = \frac{W_1}{W_2}.$$



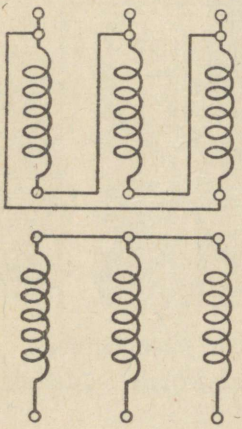
Joon. 127.



Joon. 128.

Joonisel 129 näidatud juhul primaarne mähis on ühendatud kolmnurka, sekundaarne mähis aga — tähte (märgistus $\triangle/Y$). Transformeerimise koefitsient sellisel ühendusel on võrdne

$$K = \frac{U_{l_1}}{U_{l_2}} = \frac{U_{f_1}}{\sqrt{3} \cdot U_{f_2}} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{W_1}{W_2}.$$



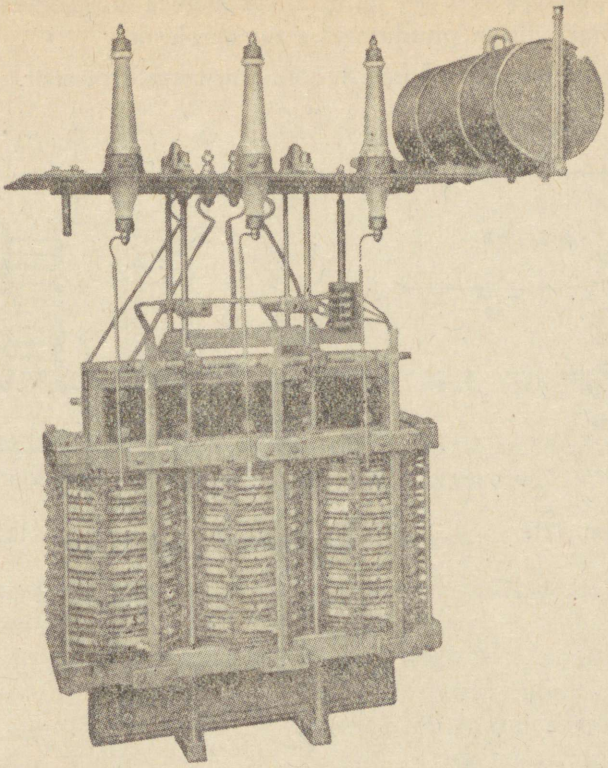
Joon. 129.

Sekundaarse mähise ühendamine tähte võimaldab välja viia tarvitaja jaoks nulljuhe ja kasutada kahte pinget: suuremat jõukoormusele ja vähemat valgustuskoormusele.

Joonisel 130 on näidatud õlipaagist väljavõetud suure keerdvoolu-transformaatori väliskuju.

49. Autotransformaator.

Erinevalt harilikust transformaatorist omab autotransformaator ainult ühte südamikule paigutatud mähist. Autotransformaatori skeem on näidatud joonisel 131. Primaarne pinge on ühendatud keerdude arvu w_1 omava mähise äärmiste klemmidega, kuna sekundaarset pinget saadakse sama



Joon. 130.

mähise keerdude arvu w_2 omavalt osalt. Tühijooksul primaarse ja sekundaarse pinge suhe ilmselt võrdub keerdude arvude w_1 ja w_2 suhtega:

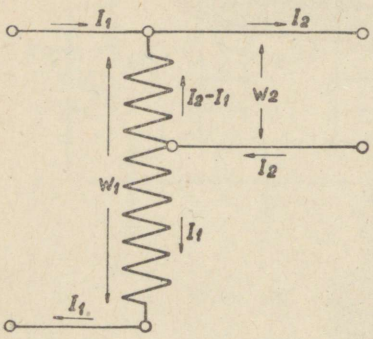
$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Primaarsele ja sekundaarsele vooluringile ühistes keerdudes w_2 voolab üheaegselt primaarse vooluringi vool I_1 ja sekundaarse vooluringi vool I_2. Need voolud on faasiliselt nihutatud peaaegu 180° võrra, igal momendil nad on üksteisele vastusuunalised. Seepärast mähise ühistes keerdudes voolab voolude vahe $I_2 - I_1$. See asjaolu võimaldab valmistada mähise ühist osa väiksema ristlõikega traadist, võrreldes tavalise transformaatori madalpingelise mähisega, kusjuures transformaatori kõrgepingemähise vastav keerdude arv autotransformaatoris puudub täiesti.

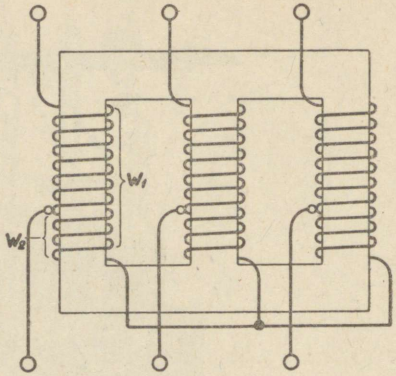
Elektriline ühendus primaarse ja sekundaarse vooluringi vahel ei võimalda autotransformaatorit kasutada üldkasutuse võrkudes, kui primaarses

võrgus on kõrgepinge, sest sel juhul kõrgepingega ühenduses oleva sekundaarse vooluringi juhtme puudutamine on eluohtlik.

Joonisel 132 on näidatud keerdvoolu-autotransformaator.



Joon. 131.



Joon. 132.

XII peatükk.

AMPERMEETRITE JA VOLTMEETRITE SÜSTEEMID.

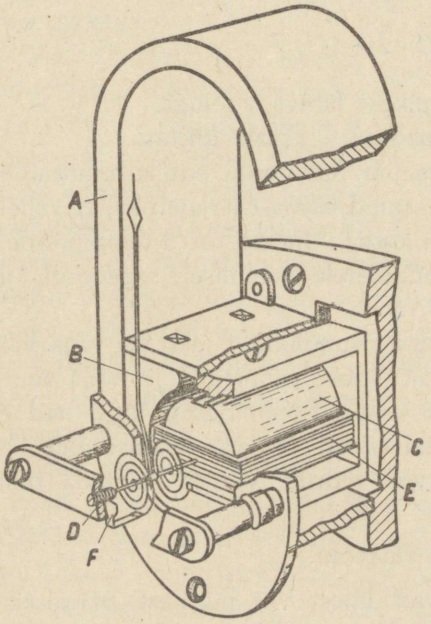
Ampermeetrid ja voltmeetrid ehitatakse mitut süsteemi. Antud käsiraamatus vaadeldakse ainult enamkasutatavaid süsteeme.

50. Keerdkatsa-süsteem.

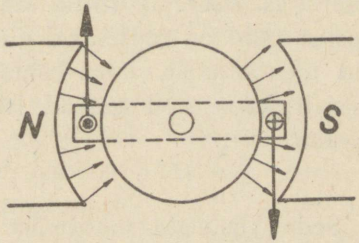
Seda süsteemi mõõteriistad on kõige enam kasutatavad mõõtmiste puhul alalisvoolu ringides.

Nende ehitus on järgmine. Tugeva püsivmagneti *A* poolused (joon. 133) on varustatud rauast poolustekingadega *B*. Viimaste silindrilisse väljalõikesse on paigutatud täpselt tsentreeritud raudsilinder *C*. Kitsas (1—3 mm), rõngakujulises õhupilus saadakse ühtlane magnetväli radiaalselt asetsevate magnetiliste jõujoontega (joon. 134).

Selles magnetväljas pöörleb kahele poolteljele *D* kinnitatud kerge alumiiniumraam *E*; viimasele on paigutatud



Joon. 133.



Joon. 134.

peenest isoleeritud traadist mähis, mille otsad on joodetud kahe spiraalvedrukese F külge. Need, olles keritud isesuunaliselt, on ühte otsa pidi isoleeritult kinnitatud pooltelgede D külge, kuna nende teised otsad on kinnitatud mõõteriista üksteisest isoleeritud paigalseisvate osade külge, mis juhtmete abil on ühendatud mõõteriista klemmidega. Eesmise pooltelje külge on kinnitatud osuti.

Voolu puudumisel raami mähises kogu süsteem on tasakaalus; voolu läbimisel raamist aga tekib jõudude paar, mis püüab raamikest pöörata vasaku käe reegli järgi määratavas suunas (joon. 134). Pöördmoment M on võrdeline raamikest läbiva voolutugevusega I ja magnetilise induktsiooniga B õhupilus; kuid B on const., järelikult $M = K \cdot I$, kus K on püsiv proportsionaalsuse koefitsient. Selle momendi mõjul raamike ühes osutiga pöörduvad, kusjuures spiraalvedrukesed tekitavad vastutöötavat momenti M_1, mis on võrdeline pöördenurgaga $M_1 = K_1 \cdot \alpha$.

Mõõdetava voolu püsival väärtusel M jääb muutumatuks, kuna M_1 kasvab koos raamikese pöörlemisega nii kaua, kui ta muutub võrdseks M-ga; siis saabub tasakaal ja raamikese ning sellega ühendatud osuti pöörlemine lõpeb.

Tasakaalu tingimuse kirjutame järgmiselt:

$$M = M_1,$$

$$K \cdot I = K_1 \cdot \alpha,$$

kust osuti pöördenurk

$$\alpha = \frac{K}{K_1} \cdot I = C \cdot I,$$

s. o. osuti pöördenurk on võrdeline raamikest läbiva vooluga.

Siit järgneb sellise riista väärtuslik omadus — skaala ühtlus.

Mõõteriista töötamise põhimõttest selgub, et voolu suuna muutmisel raamikeses muutub ka osuti pöördumise suund; samast järgneb ka, et vahelduvvoolude mõõtmiseks see mõõteriist ei kõlba. Inertsi tõttu tema pöörlev süsteem ei suuda järgneda voolu muudatustele tehnilisel sagedusel, ja mõõteriist ei anna mingit hälvet.

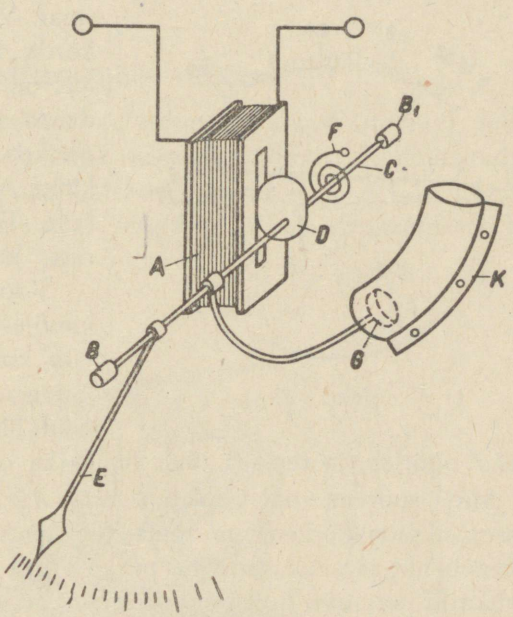
Seda süsteemi mõõteriistad omavad suurt tundlikkust (sest ka väga väikese I-ga suure B tõttu saadakse küllalt suurt momenti) ja väga suurt täpsust (nad on täpsemaid mõõteriistu kõigist süsteemidest), kuid nad ei talu ülekoormust, kuna õhukesed spiraalvedrud ja raamimähise peenike traat ülekoormusel võivad läbi põleda või vedrud võivad kaotada oma elastsuse.

51. Pehmeraua-süsteem.

Seda süsteemi mõõteriistad koosnevad ühest või mitmest paigalseisvast katsast ja ühest või mitmest katsasid läbiva voolu mõjul oma asendit

muutvast raudosast. Seda süsteemi mõõteriistu ehitatakse väga mitut tüüpi; me vaatleme ainult ühte nendest, nimelt kõige enam tarvitatavat katsasse sissetõmmatava raudsüdamikuga mõõteriista.

Selle mõõteriista põhiosaks on katsa A (joon. 135), mille otsad on ühendatud mõõteriista klemmidega ja mille keerdude arv ja traadi ristlõige olenevad mõõdetava voolu suurusest (mida suurem vool, seda vähem keerde ja suurem ristlõige). Laagrites B ja B_1 pöörlevale teljele C on paigutatud katsa ava ette pehmest rauast ovaalne plaat D. Plaat on kinnitatud teljele ovaali kitsamas osas. Sama telje külge on kinnitatud osuti E, spiraalvedru F (mida vahel asendatakse raskuste süsteemiga) ja õhksummutaja kolb G. Telje pöörlemisel kolb liigub painutatud kujuga metallsilindris K, mis põhjustabki osuti küllalt kiiret rahunemist mõõteriista töötamisel, sest oma liikumisel silindris kohtab kolb tunduvat õhu takistust.



Joon. 135.

Voolu läbimisel katsast raudplaat D tõmmatakse katsa sisse, mis omakorda sunnib pöörlema telge ühes osutiga. Sissetõmbamise jõud oleneb voolutugevusest katsas ja plaadi magnetilisest induktsioonist, mis omakorda oleneb samast voolutugevusest. Vastutöötavaks jõuks on spiraalvedru F elastsus, kusjuures spiraalvedru moment on võrdeline osuti pöördenurgaga. Seetõttu osuti pöörlemine ei saa olla võrdeline mõõdetava vooluga, nii et mõõteriista skaala on tavaliselt ebaühtlane (eesotsas tugevasti kokku surutud). Suurema ühtluse saamiseks sissetõmmatavale plaadile antakse ovaalne kuju.

Seda süsteemi mõõteriistades osuti kaldumise suund ei olene voolu suunast. Nad on kõlblikud nii alalis- kui ka vahelduvvoolule, omavad küllaldast vastupidavust (on suutelised taluma nimetamisväärseid ülekoormusi), kuid nende tundlikkus ja täpsus pole kuigi suur.

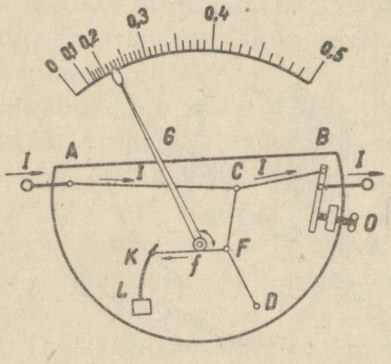
Loetletud omaduste, samuti ka mittekõrge hinna tõttu need mõõteriistad on kõige enam tarvitatavad tehnilistel mõõtmistel.

52. Termiline süsteem.

Seda süsteemi mõõteriistad koosnevad ühest traatniidist, mille pikenemine mõõdetava voolu kuumenemise mõjul põhjustab mõõteriista pöörleva osa hälbimist.

Vaatleme ühte kõige sagedamini esinevatest tüüpidest.

Tugede A ja B vahele on pingutatud peenike, tavaliselt plaatina-iriidiumist traat, mille külge punktis C on kinnitatud teine, toes D kinnitatud traat. Viimase külge punktis F on omakorda kinnitatud peenike siidniit FK, mis on keeratud ümber osutiga G ühendatud trumli f. Selle niidi teine ots punktis K on kinnitatud lehtvedru KL külge, mis püüab niiti tõmmata vasakule. Toed A ja B on ühendatud mõõteriista klemmidega.



Joon. 136.

Voolu läbimisel traadist AB viimane kuumeneb, soojuse mõjul pikeneb ja lõtvub, kuna lehtvedru KL, kasutades traadi lõdvenemist, tõmbab niiti KF vasakule. Niidi liikumisel niidiga ümbritsetud trummel f pöörleb, ja temaga ühes liigub ka osuti skaalal.

Mida suurem vool voolab traadis AB, seda suurem soojus eraldub viimases ja seda kõrgem on tema temperatuur, ning järelikult seda rohkem pikeneb niit ja seda suurema nurga võrra pöördub mõõteriista osuti. Kuna eraldatud soojuse hulk on võrdeline voolutugevuse ruuduga, siis mõõteriista skaala on ebaühtlane, jaotused on eesotsas tugevasti kokku surutud, kuna lõpuosas nad on tugevasti laienenud; kuid kunstlike abinõudega võidakse skaalat mõningates piirides teha ühtlaseks.

Osuti võnkumiste rahustamiseks tarvitatakse tavaliselt pöörisvoolu-summutajat. See koosneb osutiga ühisele teljele kinnitatud õhukesest alumiiniumplaadist, mis osuti pöörlemisel liigub tugeva püsivmagneti pooluste vahel. Osuti võnkumisel, magnetiliste jõujoonte lõikumise tõttu, plaadis tekivad pöörisvoolud, mis Lenz'i reegli kohaselt töötavad plaadi liikumisele vastu, ning sellega saavutataksegi summutamist.

Termilised mõõteriistad on üheväärselt kõlblikud nii alalis- kui ka vahelduvvoolu mõõtmiseks. Nende hälbed ei olene sagedusest, kuid nad on väga tundlikud ülekoormuse vastu (traatniidike võib läbi põleda 150% koormusel), nende täpsus pole kuigi suur, tundlikkus on väike, hind on kõrge ning peale selle nende hälbeid ja nullasendit mõjutab tugevasti temperatuur.

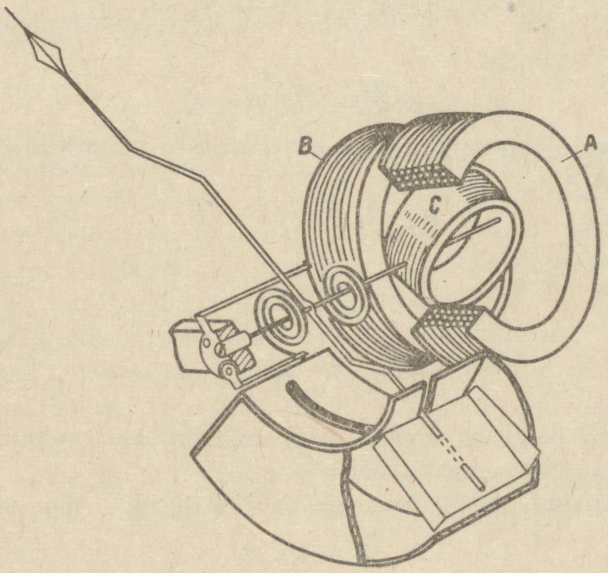
Igasugusel temperatuuri muutumisel meid ümbritsevas keskkonnas muutub niidi lõdve, ja järelikult ka osuti otsa asend mõõteriista skaalal. Seepärast kõik termilised riistad varustatakse korrektoriga. Korrektoriks joonisel 136 osutub kruvi *O*, mille pööramisega me muudame niidi pingutust ja võime osutit asetada skaala nullile.

Loetletud puuduste tõttu termilisi mõõteriistu tugevvoolutehnikas kasutatakse harva, kuid raadiotehnikas on nad laiemalt tarvitusel, kuna nende hälbed ei olene sagedusest.

53. Elektrodünaamiline süsteem.

Seda süsteemi mõõteriistad koosnevad mitmest katsast (poolist), milledest üks on kinnitatud liikumatult, kuna teised pöörlevad voolude mõjul, mis läbivad liikumatuid ja pöörlevaid katsasid.

a) Mõõteriistad ilma rauata. Joonisel 137 on skemaatiliselt ku-

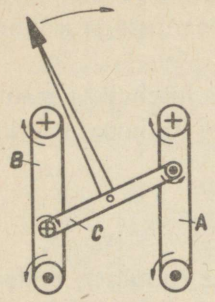


Joon. 137.

jutatud üks selline mõõteriist. Liikumatute katsade A ja B sisse on paigutatud laagrites pöörlevale teljele kinnitatud kerge katsa *C*. Telje külge on kinnitatud osuti ja kaks elastset spiraalvedru, millede teised otsad on kinnitatud liikumatult. Spiraalvedrud täidavad kahte ülesannet: nad juhivad voolu liikuvale katsale *C* ja tekitavad paigalseisvate ja pöörlevate katsade voolude koostöö mõjul saadavale momendile vastutöötavat momenti.

Joonisel 138 mõõteriista katsad on näidatud skemaatiliselt lõikes. Pöörleva katsa pöördmoment M on võrdeline koostöö jõuga F, s. t.

$$M = K_1 \cdot F;$$



Joon. 138.

jõud F aga elektromagnetilise jõuna võrdub

$$F = K_2 \cdot B \cdot l \cdot i = K_3 \cdot \mu \cdot H \cdot i_2 =$$

$$= K_3 \cdot \mu \cdot \frac{0{,}4 \cdot \pi \cdot i_1 \cdot w_1}{l_1} \cdot i_2 = K_4 \cdot i_1 \cdot i_2;$$

siin on i_1 — vool paigalseisvas katsas, i_2 — vool pöörlevas katsas.

Koefitsient K_4 sisaldab püsivaid suurusi. Järelikult

$$M = K_1 \cdot K_4 \cdot i_1 \cdot i_2 = K_5 \cdot i_1 \cdot i_2.$$

Vastutöötav moment

$$M_1 = K_6 \cdot \beta,$$

kus β on vedrude pöördenurk. Tasakaal saabub momentide tasakaalu puhul, kui $M = M_1$:

$$K_5 \cdot i_1 \cdot i_2 = K_6 \cdot \beta,$$

kust võttes

$$\frac{K_5}{K_5} = K,$$

saame:

$$\beta = K \cdot i_1 \cdot i_2,$$

s. t. mõõteriista osuti kaldumise nurk on võrdeline voolude korrutisega pöörlevas ja paigalseisvates katsades.

Tavaliselt katsad ühendatakse omavahel järjestikku ning seepärast

$$\beta = K \cdot i^2,$$

s. t. mõõteriistade skaalad (ampermeetritel ja voltmeetritel) on teise astme iseloomuga, s. o. eesosas kokkusurutud ja lõpposas laienenud.

Need mõõteriistad osutuvad täpseimateks riistadeks mõõtmiste puhul vahelduvvoolu ringides, on kõlblikud nii alalis- kui ka vahelduvvolu jaoks, kuna voolu suund üheaegselt muutub pöörlevas ja paigalseisvates katsades, kuid nad on väga tundlikud väliste magnetiliste nähete vastu ja on väga kallid; nad on vähe tundlikud, s. t. osuti pöördumiseks ühe kraadi võrra vajavad võrdlemisi suurt voolutugevust.

b) Ferromagnetilised mõõteriistad. Ilma rauata elektrodünaamiliste mõõteriistade peamiseks puuduseks on nende väike tundlikkus ja väliste magnetväljade suur mõju nende hälvetele. Need puudused tulenevad tunduval määral sellest, et nende pöördmoment on väga väike. Pöördmomendi suurendamise eesmärgil paigalseisvad katsad mähitakse raudsüdamikule, mis pöörisvoolukadude vähendamiseks on koostatud õhukestest plekkidest, kuna pöörlev katsa analoogiliselt keerdkatsa-riistadele ümbritseb raudsilindrit. Niisuguseid mõõteriistu nimetatakse ferrodünaamilisteks mõõteriistadeks. Nende pöördmoment on väga suur, tundlikkus on suur, väliste magnetväljade mõju tähtsusetu, kuid nende täpsus on madalam kui eelmisel süsteemil.

c) Ekraaniga mõõteriistad. Väliste magnetväljade mõju vähendamise eesmärgil elektrodünaamilised mõõteriistad varustatakse eriliste raudkatetega, mis takistavad väliste magnetiliste jõujoonte tungimist mõõteriista. Kuid niisugused katted nende võimaliku magnetiseerumise tõttu võivad osutuda lisavigade põhjuseks mõõteriista hälvetes ja seepärast on harva kasutusel.

54. Induktsioonsüsteem.

Induktsioon-mõõteriistad koosnevad mitmest paigalseisvast katsast, millede magnetilised ringid on omavahel ühendatud ferromagnetilise ainega ja mis tekitavad pöörlevat või nihkuvat magnetvälja, mis omakorda indutseerib mõõteriista paigalseisvas osas voolusid ja tekitab seega selle liikumist.

Pöörleva magnetväljaga töötavad ampermeetrid ja voltmeetrid — teisiti Ferraris'e mõõteriistad — esinevad NSV Liidus väga harva, kuna NSV Liidu tehased neid ei valmista. Seepärast nende kirjeldus jääb ära. Allpool on kirjeldatud induktsioon-vattmeeter.

Kõik induktsioon-mõõteriistad on kõlblikud ainult vahelduvvoolule, kusjuures nende hälbed olenevad suurel määral sagedusest. Nende riistade eemuseks osutub nende omadus kannatada tunduvaid ülekoormusi.

XIII peatükk.

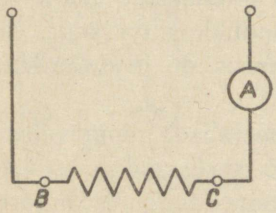
VOOLU, PINGE JA TAKISTUSE MÕÕTMINE.

55. Voolu mõõtmine.

Voolu mõõtmine toimub tavaliselt ampermeetri abil. Selleks et mõõteriist võiks näidata mõõdetava voolu suurust, tuleb temast läbi lasta kas kogu mõõdetav vool või täpselt tuntud osa sellest. Seepärast ampermeeter

tuleb lülitada järjestikku sellesse vooluringi osasse, kus soovitakse mõõta voolutugevuse suurust.

Et ampermeetri sisselülitamine ei mõjutaks nimetamisväärselt mõõdetava voolu suurust, tema takistus tehakse väga väike, mida on tähtis meeles pidada, kuna ebaõigel sisselülitamisel ampermeetrit võib kergesti rikkuda. Näiteks on vaja mõõta tarvitaja BC poolt tarvitatavat voolutugevust (joon. 139), milleks vooluringi lülitakse ampermeeter.



Joon. 139.

Kui ampermeetrit lülida vahetult võrguklemmidega, siis sellise ebaõige lülitamise tulemuseks on kaitsmete läbipõlemine ja ampermeetri riknemine. Tõepoolest, olgu klemmidel püsiv pinge 110 V. Lülitame võrgu klemmidele ampermeetri, mille nimivooluks on 10 A (kui tarvitajas BC suuremat voolu väärtust ei oletata) ning mille takistuseks on 0,01 Ω. Siis on voolutugevus ampermeetris Ohmi seaduse alusel

$$I = \frac{U}{R_A} = \frac{110}{0{,}01} = 11\,000 \text{ A},$$

s. t. kaitsmed põlevad läbi, kuid juba enne seda mõõteriista pöörlev osa saab niivõrd tugeva tõuke, et seal mõõdapääsmatult tekib murdumine.

56. Pinge mõõtmine.

Pinge mõõtmine toimub tavaliselt voltmeetri abil. Voltmeeter erineb ampermeetrist ainult suhteliselt suurema takistusega; põhimõtteliselt on ta sama ampermeeter, kuid arvutatud väikeste voolude mõõtmiseks.

Tõepoolest, kui on vaja mõõta pinget tarvitaja BC klemmidel (joon. 140), siis ühendades nende klemmidega mõõteriista, mis omab suurt takistust R_v, saame mõõteriista osuti mingi kaldumise, mis näitab mõõteriista läbiva voolu suurust. Ohmi seaduse alusel

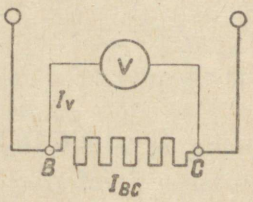
$$I_v = \frac{U_{BC}}{R_v}$$

või

$$U_{BC} = R_v \cdot I_v,$$

kuid $R_v = \text{const.} = C$; järelikult

$$U_{BC} = C \cdot I_v,$$



Joon. 140.

s. t. mõõdetav pinge klemmidel BC on otsevõrdeline mõõteriista läbiva voolu tugevusega. Järelikult, kui mõõtmiste mugavuse mõttes mõõteriista

skaalal amprites voolutugevust väljendavate arvude asemele märkida võrdelise suuruse $U = C \cdot I_v$ väärtusi, siis saame mõõteriista, mille skaalalt võib vahetult lugeda voltides väljendatud pinget, s. t. voltmeetri.

Voltmeetrid ehitatakse suure takistusega järgmistel põhjustel:

a) mida suurem on mõõteriista takistus, seda väiksemat voolu ta tarvitab (seda väiksem on võimsuse kulu),

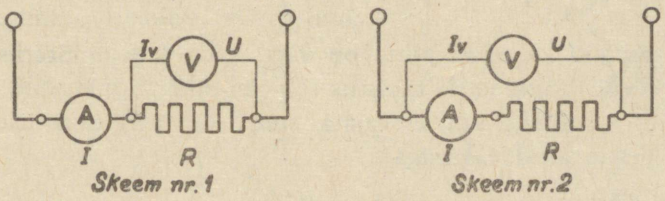
b) mida suurem on voltmeetri takistus, seda vähem mõjutab voltmeetri sisselülimine mõõdetavat pinget. Tõepoolest, oleks klemmidega *BC* (joon. 140) ühendatud voltmeetri takistus väga väike, siis toitejuhtmetes voolaks voltmeetri sisselülimisel nimetamisväärne vool

$$I = I_{BC} + I_v,$$

mis tekitaks nendes juhtmetes suuremat pingelangust ja tunduvalt vähendaks mõõdetava pinge suurust.

57. Takistuse mõõtmine ampermeetri ja voltmeetri abil.

Selline takistuse mõõtmise viis omab suurimat kasutamist. Otsitava takistuse leidmiseks sellel meetodil mõõdetakse ampermeetriga selles voo-



Joon. 141.

lavat voolu ning voltmeetriga selles langevat pinget ja Ohmi seaduse alusel arvutatakse otsitava takistuse suurus. Sealjuures voltmeetrit võib lülida kas skeemi nr. 1 või skeemi nr. 2 kohaselt (vt. joon. 141).

Esimesel juhul voltmeeter mõõdab ainult takistuses tekkivat pinget, kuid ampermeeter mõõdab voolu

$$I = I_R + I_v,$$

mis voolab mitte ainult otsitavas takistuses (I_R), vaid ka voltmeetris (I_v); seepärast otsitav takistus

$$R = \frac{U}{I_R} = \frac{U}{I - I_v};$$

kuid

$$I_v = \frac{U}{R_v},$$

kus R_v on voltmeetri takistus; järelikult

$$R = \frac{U}{I - \frac{U}{R_v}}; \tag{71}$$

siin U — voltmeetri näidatud pinge,

I — ampermeetri näidatud voolutugevus.

Teisel juhul ampermeeter mõõdab otsitavat takistust tegelikult läbivat voolu I, seevastu voltmeeter mõõdab mitte ainult otsitava takistuse klemmipinget (U_R), vaid ka pingelangust ampermeetris U_A, s. t. voltmeeter näitab pinget

$$U = U_R + U_A,$$

kust

$$U_R = U - U_A$$

ning järelikult

$$R = \frac{U_R}{I} = \frac{U - U_A}{I} = \frac{U - I \cdot R_A}{I} = \frac{U}{I} - R_A. \tag{72}$$

Nii esimesel kui ka teisel juhul on vaja teada ühe mõõteriista takistust (ampermeetri või voltmeetri takistus on mõnikord märgitud mõõteriista skaalal); kuid tavaliselt, kui ei vajata suurt täpsust, takistuse arvutamist teostatakse lihtsustatud valemiga

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

Sel juhul tuleb valida õige lülitusskeem, et vältida väga suuri vigu takistuse suuruse määramisel (milline viga võib täieliselt moonutada mõõtmise tulemust). Nimelt, kui mõõdetav takistus on väike võrreldes voltmeetri takistusega R_v, ehk teisiti — kui mõõtmist teostatakse suure vooluga ja väikesel pingel, siis on soovitav kasutada lülitusskeemi nr. 1, sest siis on liige $\frac{U}{R_v}$ valemis (71) väga väike ja teda võib jätta tähele panemata.

Kui aga ümberpöördult mõõdetav takistus on suur võrreldes ampermeetri takistusega R_A, ehk teisiti, kui mõõtmist teostatakse suuremal pingel ja väikese vooluga, siis on soovitav kasutada lülitusskeemi nr. 2, kuna R_A valemis (72) võrreldes $\frac{U}{I}$-ga on väike ja teda võib jätta tähele panemata.

58. Takistuse mõõtmine sildadega.

Mitmetüübilisi sildu takistuse määramiseks on väga palju, nad kõik on ehitatud nõndanimetatud Wheatstone'i (loe: uitston'i) silla põhimõttel. Niivõrd kui need mõõtmised kuuluvad peamiselt laboratoorsete mõõtmiste hulka, pole vajadust neid siin lähemalt vaadelda.

Mõõtmine toimub üldjoontes järgmiselt. On olemas kolm tuntud reguleeritavat takistust (tavaliselt takistuste magasinid), mis koos mõõdetava, neljanda takistusega moodustavad kinnise nelinurga $ABCD$ (joon. 142). Diagonaali AC lülitakse patarei E ja lüliti F, kuna teise diagonaali BD on lülitud galvanomeeter G ja nupp K. Lülides F ja vajutades alla K ning reguleerides tuntud takistusi, võib saavutada voolu puudumist diagonaalis BD (sealjuures galvanomeeter ei anna mingit hälvet — tema osuti jääb nullasendisse). See on võimalik ainult sel juhul, kui pinge punktide B ja D vahel võrdub nulliga. Siis $I_1 = I_2$ ja $I_4 = I_3$. Edasi, niivõrd kui pinge punktide B ja D vahel võrdub nulliga, pingelangus osas AB võrdub pingelangusega osas AD, s. t.

$$I_1 \cdot R_1 = I_3 \cdot R_3$$

ja

$$I_2 \cdot R_2 = I_4 \cdot R_4.$$

Jagades esimese avaldise teisega, saame

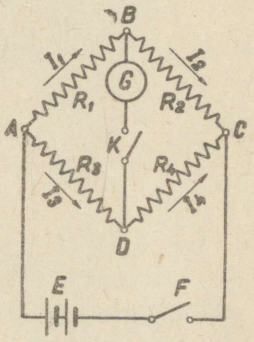
$$\frac{I_1 \cdot R_1}{I_2 \cdot R_2} = \frac{I_3 \cdot R_3}{I_4 \cdot R_4};$$

kuid

$$I_1 = I_2 \text{ ja } I_3 = I_4;$$

järelikult

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$



Joon. 142.

või

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3,$$

s. t. voolu puudumisel galvanomeetris silla vastasosade takistuste korrutised on võrdsed.

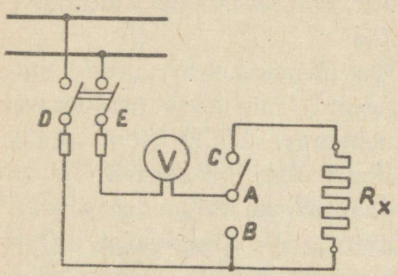
Teades kolme takistust leiame siit neljanda tundmatu takistuse:

$$R_3 = R_x = \frac{R_1}{R_2} \cdot R_4.$$

Suurimat mõõtmise täpsust saadakse sel juhul, kui kõik takistused oma suuruselt on üksteisele lähedased. Tavaliselt Wheatstone'i sillaga mõõdetakse takistusi mitte alla kümnendikkude oomist.

59. Takistuse mõõtmine voltmeetri abil.

Seda meetodit võib kasutada ainult suurte takistuste, näiteks isolatsioonitakistuse mõõtmiseks.



Joon. 143.

Mõõtmine toimub järgmiselt (joon. 143): ümberlüliti A asetatakse alumisele kontaktile B, seega ühendatakse voltmeeter toitevõrgu klemmidega DE ja mõõdetakse võrgu pinget U.

Siis lülitakse ümberlüliti A ülemisele kontaktile C ja seega ühendatakse voltmeeter järjestikku mõõdetava takistusega R_x. Sel juhul voltmeetrilt loetud hälve U_1 annab meile pingelanguse voltmeetris eneses.

Märkides R_v-ga voltmeetri sisetakistuse, võib teisele juhule kirjutada:

$$I = \frac{U}{R^v + R_x} = \frac{U_1}{R_v},$$

kust

$$U_1 \ (R_v + R_x) = U \cdot R_v$$

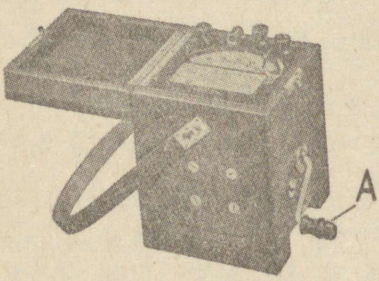
või

$$R_v = \frac{U \cdot R_v - U_1 \cdot R_v}{U_1} = R_v\left(\frac{U}{U_1} - 1\right). \qquad (73)$$

60. Takistuse mõõtmine oommeetriga.

Oommeetriteks nimetatakse mõõteriistu, mis võimaldavad takistuse väärtuse lugemist vahenditult oomides.

Tehnilistel mõõtmistel sagedamini tarvitatavaks riistaks on voltmeetri-tüübiline oommeeter, mis esineb mitmesugustes konstruktsioonides. Seadmete isolatsiooni proovimiseks on nendest laialdaselt tarvitusel nõndanimetatud voltmeetriga induktor. Tema ehitus on järgmine (joon. 144). Kandmiseks kohases puukastis asub keerdkatsa süsteemi voltmeeter ja väike induktor (magnetelektriline generaator), mida aetakse ringi vända A abil. Mõõteriist töötab samal põhimõttel nagu voltmeeter suurte takistuste mõõtmisel (vt. eelmist meetodit), selle vahega, et mõõtmiseks



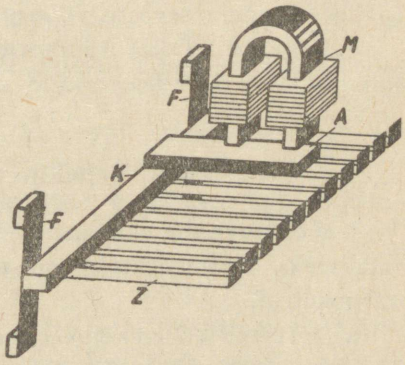
Joon. 144.

vajalik pinge toodetakse induktori abil ja mõõteriist peale voltide skaala omab veel teist, oomide skaalat, mille tõttu pole vaja teha arvutusi valemi (73) alusel. Nende riistadega toimetatavad mõõtmised omavad väikest täpsust.

61. Sageduse mõõtmine.

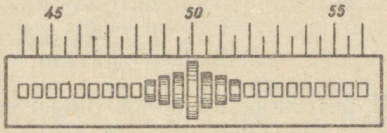
Sageduse mõõtmiseks on sagedusmõõtjad, mida ehitatakse kahte tüüpi: osutiga ja vibreerivate keeltega. Nendest vaatleme ainult viimaseid, sest need on enam tarvitusel. Nad kuuluvad võnkesüsteemiliste riistade hulka.

Joonisel 145 on näidatud selline sagedusmõõtja. Vedrude F külge kruvitud klotsile K on ühe otsaga kinnitatud elastsed raudplaadikesed Z, millede teised otsad on täisnurga all ära pööratud ja kaetud emailvärviga.



Joon. 145.

Need otsad on nähtavad väljaspool mõõteriista läbi skaala ava nelinurkade näol (joon. 146). Plaadikesed (vibreerivad keeled) omavad isesugust pikkust ja paksust ning seetõttu ka isesugust omavõnkumise perioodi. Vahelduvvoolu läbimisel elektromagneti mähisest M hakkavad plaadikesed ankru A ja klotsi K kaasabil vibreerima. Voolu suurenemisel ankur A tõmbub elektromagnetile lähemale, voolu vähenemisel aga eemaldub temast. Plaadikeste võnkumiste sagedus on kaks korda suurem elektromagnetit toitva voolu sagedusest, sest iga perioodi vältel ankur tõmbub tema külge kaks korda, s. t. iga amplituudi ajal. Need plaadikesed, millede omavõnkumise sagedus on suuruselt lähedane kahekordsele voolu sagedusele, vibreerivad tugevasti, suures ulatuses ja skaala avas nende plaadikeste nelinurgad näivad pikergustena (joon. 146). Teades iga plaadikese omavõnkumise sagedust, võib järelikult hõlpsalt määrata ka voolu sagedust.



Joon. 146.

Sagedusmõõtjaid lülitakse tavaliselt nagu voltmeetreid.

VÕIMSUSE JA TÖÖ MÕÕTMINE.

62. Alalisvoolu võimsuse mõõtmine.

Alalisvoolu võimsuse mõõtmine toimub enamalt jaolt joonisel 141 toodud lülitusskeemide kohaselt ampermeetri ja voltmeetri abil, kusjuures neil juhtudel, kui ei vajata eriti suurt täpsust, kasutatakse lihtsustatud valemit

$$N = U \cdot I,$$

(milles ei võeta arvesse võimsuskadusid mõõteriistades endis).

Selleks et vältida suuremaid vigu, tuleb õigesti valida lülitusskeemi, juhindudes § 57-ndas toodud arutlustest.

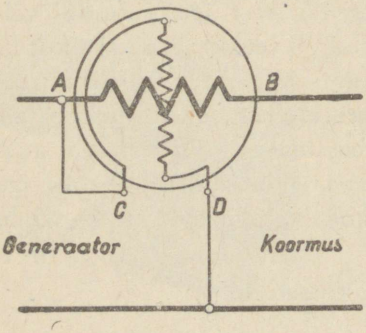
63. Vahelduvvoolu võimsuse mõõtmine.

Vahelduvvoolu võimsust mõõdetakse vattmeetritega. Sagedamini tarvitatavateks vattmeetriteks on elektrodünaamilised ja induktsioon-süsteemi vattmeetrid.

a) Elektrodünaamiline vattmeeter erineb elektrodünaamilisest ampermeetrist või voltmeetrist sellega, et omab nelja klemmi (kahe asemel).

Kahega nendest on ühendatud jämedast traadist nõndanimetatud vooluring AB (joon. 147), mida lülitakse (nagu ampermeetrit) järjestikku vooluringi sellesse osasse, kus soovitakse mõõta võimsust. Vattmeetri vooluringiks on tavaliselt paigalseisvate katsade süsteem (vt. joon. 137, katsad A ja B).

Teise klemmidepaariga CD on ühendatud peenikesest traadist pingering, mis lülitakse nagu voltmeeter ja koosneb pöörlevast katsast (katsa C joonisel 137).



Joon. 147.

Nagu juba selgitatud punkt 53-ndas, elektrodünaamilise mõõteriista pöördmoment on võrdeline voolude korrutisega pöörlevas ja paigalseisvates katsades, s. t.

$$m = K \cdot i_1 \cdot i_2 .$$

Niivõrd kui vattmeetri pingering koosneb väikese induktiivsusega pöörlevast katsast ja omab suurt puhtaktiivsest takistust, võib

kogu pingeringi lugeda aktiivseks takistuseks, ja vool selles on seepärast faasis pingega

$$i_2 = \frac{u}{R_v}$$

(pingering on lülitud täispingele u).

Asetades pöördmomendi valemisse saadud avaldise, saame:

$$m = K \cdot i_1 \cdot \frac{U}{R_v} = K_1 \cdot i_1 \cdot u \text{ (sest } R_v = \text{const.)}.$$

Vool voolukatsas i_1 võrdub koormuse vooluga i.

Sel teel saame:

$$m = K_1 \cdot i \cdot u,$$

s. t. mõõteriista pöörlevale süsteemile mõjuv momendi hetkväärtus on võrdeline võimsuse hetkväärtusega.

Pöördmomendi keskmine väärtus kogu perioodi vältel, järelikult ka osuti kaldenurk on võrdeline keskmise ehk aktiivse võimsusega.

Selle tõttu vattmeeter näitab vahetult aktiivset võimsust, mida määratakse valemiga

$$N = U \cdot I \cdot \cos \varphi.$$

Vattmeetri vooluringis voolab koormuse kogu vool, seepärast voolumähised tehakse tavaliselt jämedast traadist väikese keerdude arvuga. Suurt takistust omav pingering aga tarvitab väga väikest voolu, ning seepärast vattmeetri pöörlev katsa võidakse valmistada peenest traadist, (mis on tähtis katsa kerguse mõttes).

b) Induktsioon-vattmeetrid töötavad nihkuva või pöörleva magnetvälja põhimõttel. Vaatleme nendest riistadest ainult esimest tüüpi.

Joonisel 148 on skemaatiliselt näidatud nihkuva väljaga induktsioonvattmeeter. Õhukestest raudlehtedest koostatud südamiku AA_1 poolustevahelises õhupilus asub koos teljega F pöörlev alumiiniumketas E, kusjuures telje külge on kinnitatud osuti G ja vastutöötav spiraalvedru H.

Raudsüdamikule on paigutatud kolm mähist. Kaks nendest, jämedast traadist ja väikese keerdude arvuga, on ühendatud järjestikku nii, et nad moodustavad ketta poole pöördud südamiku otstel isenimelisi pooluseid. Need ongi vattmeetri vooluringi katsad. Keskmine katsa — peenest traadist suure keerdude arvuga — on pingekatsa. See katsa ise omab juba nimetamisväärset induktiivsust, ning paispooli (s. o. raudsüdamikule mähitud pooli) temaga järjestikku lülimisega võib saavutada ligikaudu 90°-st faasinihet.

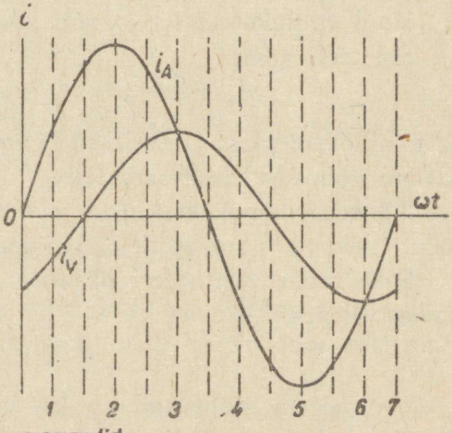
Vaatleme selle mõõteriista töötamist.

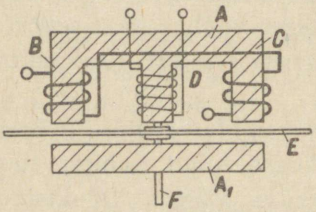
Joonisel 149 on näidatud voolude sinusoidid pinge- ja voolukatsades i_V ja i_A. Need voolud on nihutatud nurga 90°— φ võrra üksteisest, kuna I_A jääb U-st maha nurga φ võrra ning I_V jääb U-st maha 90°-se nurga võrra.

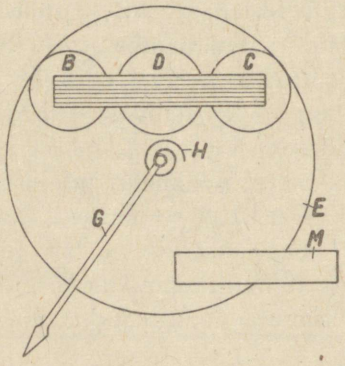
Diagramm on jaotatud seitsmeks momendiks, milledeks samal joonisel on näidatud neil momentidel katsasid läbivate voolude i_A ja i_V mõjul südamikul tekkivate pooluste paigutus, kusjuures antud momendil positiivset voolu loeme voolavaks mähise algusest tema lõpu poole. Algused on märgitud tähtedega a ja b, lõpud aga — x ja y.

Siis momendil 1 äärmiste katsade vool I_A omab väheldast positiivset väärtust ja järelikult voolab mähise algusest lõpu poole; korgivinna-reegli järgi võib hõlpsalt leida, et äärmiste südamikkude alumistes osades tekivad kaks nõrka poolust: vasemal — põhja- ja paremal lõunapoolus.

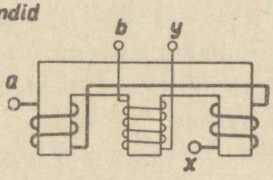
Samal momendil keskmise katsa vool i_V on negatiivne, järelikult on suunatud lõpust b alguse y poole ja tekitab keskmise südamiku alumises osas nõrka lõunapoolust.

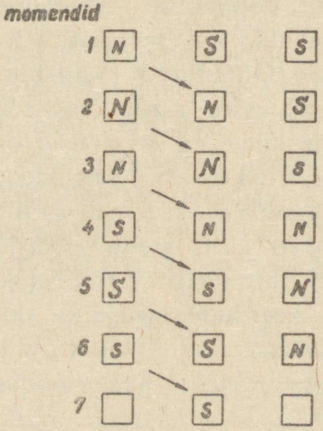






Joon. 148.





Joon. 149.

Momendil 2 äärmiste katsade vool I saavutab positiivse maksimumi ja äärmistel südamikel tekib kaks tugevat poolust — põhja- ja lõunapoolus, keskmisel südamikul aga — nõrk põhjapoolus, sest vool i_V sellel momendil omab väheldast positiivset väärtust (vt. diagrammi) jne.

Diagrammi ja joonise edasisest vaatlusest nähtub, et poolused kogu aeg nihkuvad paremale, s. t. tekitavad selles suunas nihkuvat magnetvälja, mis lõigates ketast E indutseerib viimases Lenz'i reegli kohaselt pooluste liikumist takistada püüdvat voolu; kuid kuna pooluste liikumine on esile kutsutud hoopis välisel põhjusel, siis seetõttu kettas olevad voolud ise nihkuvad ühes poolustega ja seega sunnivad ketast pöörlema pooluste liikumise suunas.

Pöördmomendi keskmine väärtus osutub sel juhul võrdeliseks vahelduvvoolu aktiivse võimsusega, s. t. mõõteriista võib kasutada vattmeetrina ja ta omab ühtlast skaalat.

Võrreldes elektrodünaamilist ja induktsioon-vattmeetrit omavahel võib öelda, et esimene sobib täpseteks mõõtmisteks, kuid omab kõiki seda süsteemi riistade puudusi, välja arvatud skaala ebaühtlus; induktsioon-mõõteriistad täpseteks mõõtmisteks küll ei sobi, kuid tehnilisteks mõõtmisteks on nad tänu suurte ülekoormuste talumisele, üsna sagedasti kasutusel.

64. Keerdvoolu võimsuse mõõtmine.

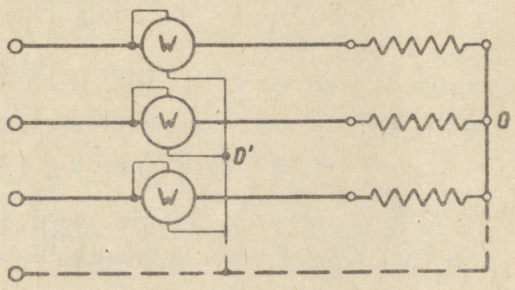
Keerdvoolu võimsuse mõõtmist võib teostada ühefaasiliste vattmeetrite abil, millede arv oleneb koormuse iseloomust.

a) Üldjuhus — igasugune koormus kolme- või neljajuhtmelises süsteemis. Võimsuse mõõtmist igasugusel koormusel võib teostada kolme ühefaasilise vattmeetri abil, lülides neid joonisel 150 toodud lülitusskeemi kohaselt.

Iga vattmeeter mõõdab ühe faasi võimsust ja seepärast keerdvoolu võimsus sel juhul on

$$N = N_1 + N_2 + N_3 ,$$

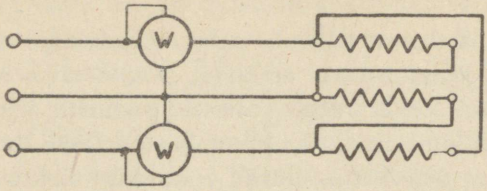
kus N_1, N_2, N_3 on üksikute vattmeetrite hälbed.



Joon. 150.

Kolmejuhtmelise süsteemi ja kättesaamatu nullpunkti korral kõigi kolme vattmeetri pingeringide otsad ühendatakse kokku, moodustades seega kunstlikku nullpunkti 0'.

b) Igasugune koormus kolmejuhtmelises süsteemis. Sel juhul võimsust võib mõõta kahe vattmeetriga joonisel 151 toodud lülitusskeemi kohaselt (seda meetodit nimetatakse Aron'i meetodiks), kusjuures keerdvoolu võimsus sel juhul kujundub kahe vattmeetri hälvete algebralise summana, s. t.



Joon. 151.

$$N = \pm N_1 \pm N_2 .$$

Tõepoolest, tähtlülituses keerdvoolu momentvõimsus võrdub

$$N = i_I \cdot u_I + i_{II} \cdot u_{II} + i_{III} \cdot u_{III}$$

Aroni skeemi järgi lülitud vattmeetrid aga mõõdavad järgmist võimsust:

$$N_w = i_1 \cdot u_{12} + i_3 \cdot u_{32};$$

kuid

$$u_{32} = - u_{23},$$

järelikult

$$N_w = i_1 \cdot u_{12} - i_3 \cdot u_{23};$$

kuid

$$u_{12} = u_I - u_{II}; \quad u_{23} = u_{II} - u_{III}$$

ja

$$i_1 = i_I; \quad i_2 = i_{II}; \quad i_3 = i_{III},$$

seepärast

$$N_w = i_I (u_I - u_{II}) - i_{III} (u_{II} - u_{III}) =$$

$$= i_I \cdot u_I - i_I \cdot u_{II} - i_{III} \cdot u_{II} + i_{III} \cdot u_{III} =$$

$$= i_I \cdot u_I - u_{II} (i_I + i_{III}) + i_{III} \cdot u_{III},$$

kuid kolmejuhtmelises süsteemis

$$i_I + i_{II} + i_{III} = 0,$$

kust

$$i_{II} = - (i_I + i_{III}).$$

Asetades selle eelmisesse avaldisse, saame:

$$N_w = i_I \cdot u_I + i_{II} \cdot u_{II} + i_{III} \cdot u_{III};$$

tõepoolest, vattmeetrid näitavad keerdvoolu koguvõimsust.

Joonisel 151 näidatud kolmnurklülituses

$$N = u_I \cdot i_I + u_{II} \cdot i_{II} + u_{III} \cdot i_{III},$$

vattmeetrid aga mõõdavad

$$N_w = i_1 \cdot u_{12} + i_3 \cdot u_{32};$$

kuid

$$i_I = i_1 + i_{III}; \quad i_{III} = i_3 + i_{II}$$

ja

$$u_I = u_{12}; \quad u_{II} = u_{23}; \quad u_{III} = u_{31},$$

kust

$$i_1 = i_I - i_{III}; \quad i_3 = i_{III} - i_{II}.$$

Asetades eelmisse avaldisse i_1 ja i_3 asemele nende väärtused, saame:

$$N_w = (i_I - i_{III}) \cdot u_{12} + (i_{III} - i_{II}) \cdot u_{32} =$$

$$= i_I \cdot u_{12} - i_{III} \cdot u_{12} + i_{III} \cdot u_{32} - i_{II} \cdot u_{32} =$$

$$= i_I \cdot u_{12} + i_{III}(u_{32} - u_{12}) - i_{II} \cdot u_{32};$$

kuid

$$u_{32} = -u_{23}$$

ja

$$u_{12} + u_{23} + u_{31} = 0,$$

kust

$$u_{12} + u_{23} = -u_{31},$$

mis, pärast asetamist eelmisse avaldisse, annab

$$N_w = i_I \cdot u_{12} + i_{II} \cdot u_{23} + i_{III} \cdot u_{31},$$

või

$$N = i_I \cdot u_I + i_{II} \cdot u_{II} + i_{III} \cdot u_{III},$$

s. t. selgi juhul vattmeetrid mõõdavad koguvõimsust.

Mõõtmisel Aron'i meetodil on võimalikud kolm järgmist juhtu:

1. N_1 ja N_2 on suuremad nullist, s. t. mõlema vattmeetri osutid annavad positiivseid hälbeid; sel juhul

$$N = N_1 + N_2.$$

See juhus esineb ühtlasel koormusel väikeste, kuni 60° faasinihkenurkade puhul.

2. Üks vattmeetritest, näiteks teine, üldse ei anna hälvet (osuti seisab nullil): keerdvoolu võimsus sel juhul võrdub ühe vattmeetri hälbega.

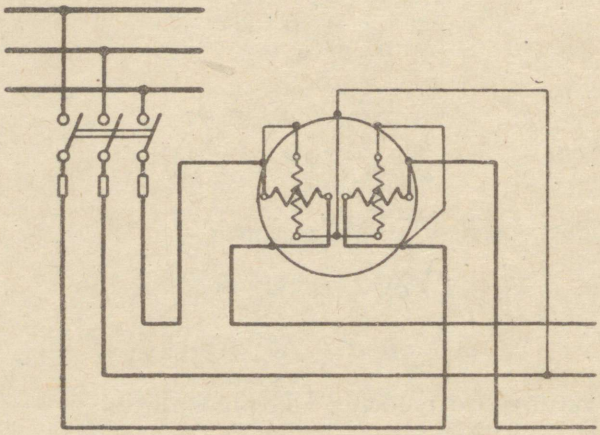
3. Ühe vattmeetri osuti kaldub nullist vasakule (negatiivne hälve); sel juhul muudetakse voolu suund vattmeetri ühes vooluringis (vahetades ringi tema otsad) ja keerdvoolu võimsuse saamiseks suuremast hälbest arvatakse väiksem hälve maha.

See juhus vastab ühtlase koormuse faaside suurtele nihkenurkadele ($\varphi > 60°$).

Oma lihtsuse tõttu Aron'i meetod on kõige sagedamini kasutatav võimsuse mõõtmise viis, mida rakendatakse ka ebaühtlase koormuse puhul, kuna tavaliselt pole täit kindlust koormuse ühtluses.

Erilise ümberlüliti kasutamisel võib Aron'i meetodil mõõta võimsust ka ühe vattmeetriga, lülitades teda ühte või teise faasi.

Tehniliste mõõtmiste jaoks kahe ühefaasilise vattmeetri asemel on kindlasti mugavam üks kolmefaasiline vattmeeter; seepärast sagedasti kaks ühefaasilist vattmeetrit ehitatakse kokku ühisesse kesta, kusjuures nende pöörlevad süsteemid seotakse mehaaniliselt ja sel teel saadakse keerdvoolu-vattmeeter, mille lülitusskeem (näidatud joonisel 152) põhimõtteliselt ei erine kahe ühefaasilise vattmeetri lülitusskeemist.



Joon. 152.

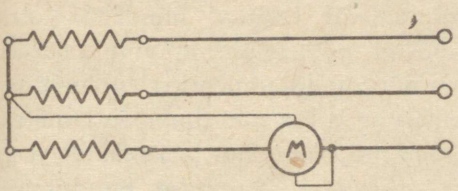
Aron'i meetod on kõlblik ainult kolmejuhtmelisele süsteemile, sest nulljuhtme olemasolu puhul võrrand $i_I + i_{II} + i_{III} = 0$, mida me eespool kasutasime, pole enam õige.

c) Ühtlane koormus ja kättesaadav nullpunkt. Sel juhul kolme vattmeetri asemel võib kasutada ainult ühte, lülitades teda joonisel 153 toodud skeemi kohaselt, sest $N_1 = N_2 = N_3$ ja keerdvoolu võimsus võrdub vattmeetri kolmekordistatud hälbega:

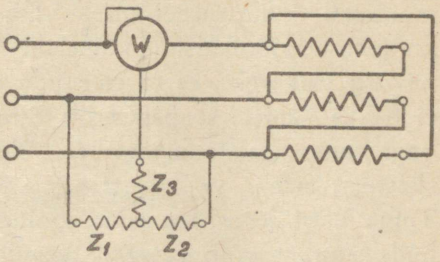
$$N = 3 \cdot N_w .$$

Niisuguste vattmeetrite skaalal märgitakse mõnikord kolmekordistatud väärtused.

d) Ühtlane koormus ja mitte kättesaadav nullpunkt. Sel juhul moodustatakse kunstlik nullpunkt takistuste z_1, z_2 ja z_3 erilise valiku teel (joon. 154).



Joon. 153.



Joon. 154.

Keerdvoolu võimsuse saamiseks tuleb ka sel juhul vattmeetri hälvet kolmekordistada, s. t.

$$N = 3 \cdot N_w,$$

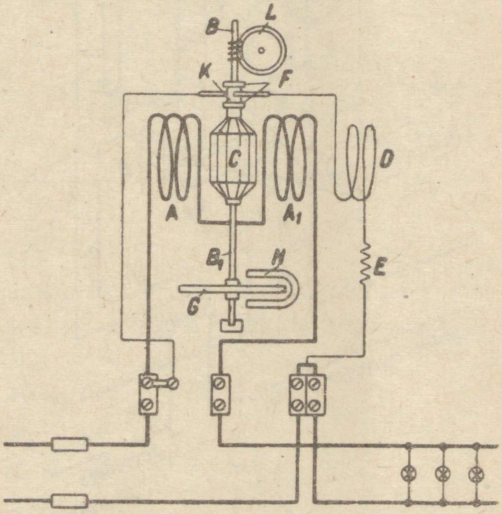
või kasutatakse erilist vattmeetrit, mis on gradueeritud keerdvoolu süsteemi koguvõimsusele.

65. Alalisvoolu töö mõõtmine.

Elektrivoolu töö mõõtmist teostatakse tavaliselt voolulugejate abil, mis oluliselt on samad vattmeetrid, kuid peale võimsuse arvestavad veel ka aega. Selleks neid varustatakse pöörete lugemismehhanismiga.

Alalisvoolu töö mõõtmisel kasutatakse tavaliselt elektrodünaamilist voolumõõtjat, mis peale pöörete lugemismehhanismi erineb seda süsteemi vattmeetrist veel sellepoolest, et pöörlev katsa voolujuhtivate vedrukeste asemel on varustatud kollektoriga ja harjadega, mille tagajärjel ta omab võimalust pidevaks liikumiseks ühes suunas.

Joonisel 155 on näidatud niisuguse voolumõõtja skeem. Siin on C — voolulugeja teljel BB_1 asetsev

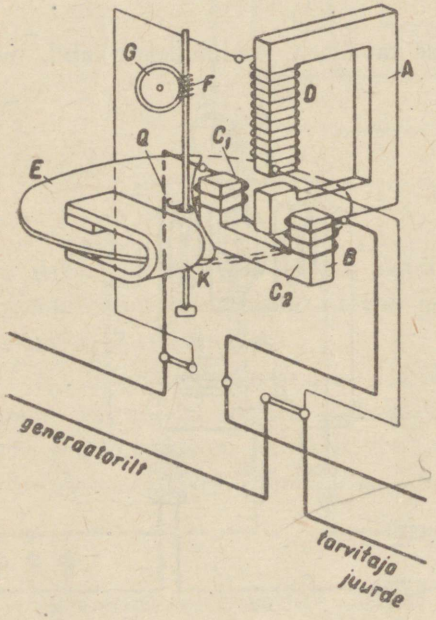


Joon. 155.

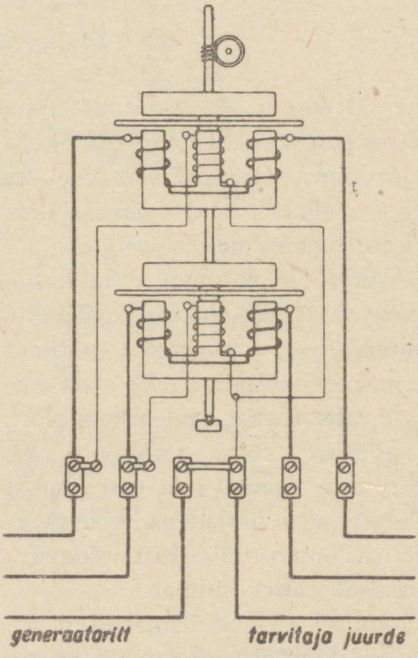
pöörlev katsa, mis on lülitatud koormusele paralleelselt, nagu vattmeetri pingekatsa. A ja A_1 on kaks voolukatsat, K — kollektor, G — alumiiniumketas pidurdamiseks, H — pidurdamismagnet, E — eeltakistus pingeringis, L — pöörete lugemismehhanismile liikumist edasiandev tigu, D — hõõrdumismomendi kompenseerimiseks lisa-pöördmomenti tekitav nõndanimetatud kompensatsioonikatsa. Väikestel koormustel pöördmoment võib osutuda niivõrd väikeseks, et ta ei suuda ületada hõõrdumismomenti ja voolumõõtja ei hakka käima; seepärast on vajalik temale anda lisa-pöördmomenti, milleks ongi kompensatsioonikatsa D. Ta on lülitatud pingeringi ja järelikult, nagu skeemist näha, voolab temas vool ka igasuguse koormuse puudumisel. Tema vool, koostöös sama vooluga pöörlevas katsas, tekitab pöördmomenti, mille suurust võib katsa D asendi muutmisega reguleerida nii, et ta parajasti võrdub hõõrdumismomendiga.

66. Vahelduvvoolu töö mõõtmine.

Vahelduvvoolu töö mõõtmiseks kasutatakse tavaliselt nihkuva magnetväljaga induktsioonsüsteemilisi voolumõõtjaid. Sellise voolumõõtja skeem on näidatud joonisel 156. Erilisi selgitusi ta ei vaja, kuna oluliselt väga vähe erineb samasüsteemilise ühefaasilise vattmeetri skeemist.



Joon. 156.



Joon. 157.

67. Keerdvoolu töö mõõtmine.

Kolmejuhtmelises süsteemis kasutatakse tavaliselt kahe kettaga Aron'i lülituses töötavaid induktsioon-voolumõõtjaid (joon. 157).

Neljajuhtmelises süsteemis keerdvoolu töö mõõtmiseks kasutatakse kolme kettaga voolumõõtjaid, mis kujutavad endast kolme ühefaasilist voolulugejat ühises kestas.

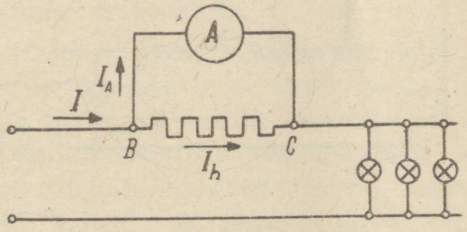
XV peatükk.

MÕÕTEPIIRKONNA LAIENDAMINE.

68. Ampermeetrite mõõtepiirkonna laiendamine.

Ei ole võimalik igat süsteemi ampermeetrite otsene lülitamine suuremate voolutugevustega ahelatesse. Nii näiteks magnetelektrilisi, termilisi ja elektrodünaamilisi riistu nende konstruktsiooni iseärasuste tõttu — peen traat raamikesel, peen kuumustraat jne. — ei ole võimalik ehitada suuremate voolutugevustele. Seepärast nende riistadega suuremate voolude mõõtmiseks tuleb kasutada abiseadmeid. Neist kõige sagedamini kasutatakse šunte ja voolutransformaatoreid.

A. **Šundid.** Šundiks ehk harutakistuseks nimetatakse takistust (puhtaktiivset), mis lülitatakse järjestikku ahelasse ning millele paralleelselt lülitatakse ampermeeter või mingi muu mõõteriista vooluahel.



Joon. 158.

Šundi töötamise põhimõtet selgitab joonis 158. Mõõdetav vool I punktis B hargneb kaheks: ampermeetri vool I_A ja šundi (harutakistuse) vool I_h. Šundi takistust on võimalik valida nii, et mõõteriista läbiks vool I_A, mis moodustaks teatava täpse osa mõõdetavast voolust, näiteks 0,1; 0,01; 0,001 jne., ning selle osa järgi võib hinnata täisvoolu suurust (sealjuures mõõteriista skaalale võib märkida täisvoolutugevusele vastavad arvud).

Šundi arvutus ei tekita raskusi. Nimelt;

$$I = I_A + I_h \quad \text{ja} \quad \frac{I_A}{I_h} = \frac{R_h}{R_A}, \quad \text{kust}$$

$$R_h = \frac{I_a}{I_h} \cdot R_A .$$

Ühendades mõõteriista mitmesuguste šuntidega, võib sama mõõteriista kasutada väga mitmesuguste voolutugevuste mõõtmiseks.

Näide 28. On olemas magnetelektriline mõõteriist katsa takistusega $R_A = 5\ \Omega$. Mõõteriista mõõtepiirkond on 15 mA.

Milline peab olema selle mõõteriista šundi takistus voolutugevuste mõõtmiseks kuni 1,5 A?

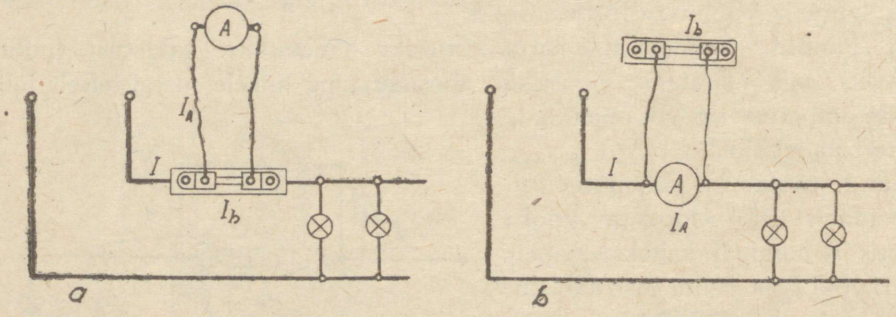
Valemist

$$R_h = \frac{I_A}{I_h} \cdot R_A = \frac{I_A}{I - I_A} \cdot R_A$$

saame:

$$R_h = \frac{0{,}015}{1{,}5 - 0{,}015} \cdot 5 = 0{,}0505\ \Omega.$$

Tehnilistes riistades šundid voolutugevustele alla 100 A tavaliselt ehitatakse mõõteriistaga ühise katte sisse — sisešuntidena; suurematele voolutugevustele valmistatakse neid välisšuntidena ning ühendatakse mõõteriistaga kalibreeritud erijuhtmetega, nagu on näidatud joonisel 159, kus on toodud šuntide õige (joon. 159-a) ja väär (joon. 159-b) lülitus. Lülitus *b*



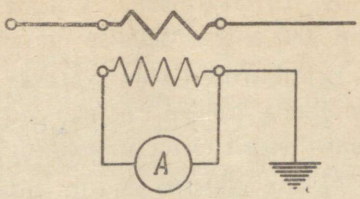
Joon. 159.

on väär sellepärast, et ahelasse on otseselt lülitatud šundi asemel ampermeeter ja kalibreeritud juhtmeid läbib vool, millele nad ei ole arvutatud, ning voolu jaotus mõõteriistas ja šundis kujuneb ebaõigeks; peale selle ampermeetri klemmid ei ole arvestatud ühendamiseks nii jämedate juhtmetega.

B. **Voolutransformaatorid.** Vahelduvvoolu puhul hoidutakse šuntide kasutamisest, sest sageduse ja temperaaturi muutused toovad kaasa muutusi šundi (puhtaktiivse) ja mõõteriista (induktiivse) takistuste vahekorras.

Harilikult vahelduvvoolu ampermeetrite mõõtepiirkonna laiendamiseks kasutatakse mõõtetransformaatoreid (voolutransformaatorid), millede pri-

maarmähised lülitatakse järjestikku mõõdetava voolu ahelasse, kuna sekundaarmähis ühendatakse mõõteriistaga (joon. 160). Seejuures, kui seade lülitatakse kõrgepingeahelasse, siis seadme kere ja transformaatori sekundaarahel maandatakse.



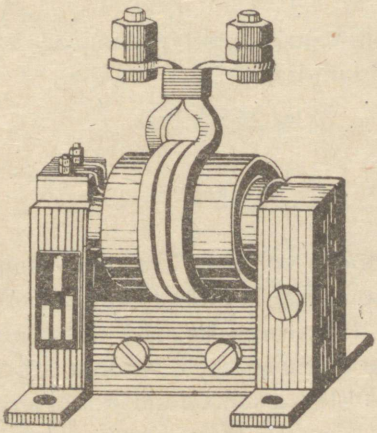
Joon. 160.

Transformaatorite teooriast on teada, et madala sekundaarahela takistuse puhul [1] võib lugeda voolutugevused transformaatori mähistes pöördvõrdelisteks keerdude arvudega, s. o.

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{w_2}{w_1}.$$

Kõik voolutransformaatorid ehitatakse normaalselt viieamprilisele (harvem 10 A) sekundaarvoolule, kusjuures primaarvool ulatub tuhandetesse ampritesse (kuni 5000 A). Seepärast, vastavalt eeltoodud vahekorrale, sekundaarmähise keerdude arv on tavaliselt palju suurem primaarmähise keerdude arvust. Viimane mõnedes voolutransformaatorites väheneb üheainsa keeruni.

Joonisel 161 on kujutatud mitmekeeruline katsatüüpi transformaator: siin suure juhtme ristlõikega, kuid väikse keerdude arvuga primaarkatsa on asetatud sekundaarkatsale (suur keerdude arv, väike juhtme ristlõige) ja eraldatud viimasest isoleerkihiga.


Joon. 161.

Tuleb märkida, et voolutransformaatoreid kasutatakse mitte ainult mõõteriistade mõõtepiirkonna laiendamise, vaid ka teeninduspersonali julgestamise otstarbel, kuna välditakse vajadust ühendada mõõteriistu vahetult kõrgepingeahelasse. Riistad lülitatakse primaarahelast hästi isoleeritud sekundaarahelasse, milles pinge on väga madal.

Primaarmähisest voolu läbimisel sekundaarmähis peab olema ühendatud vastava riistaga või otsesidestatud. Vastasel korral sekundaarahela klemmidel võib esineda väga kõrge, teeninduspersonalile ja mähiste isolatsioonile ohtlik pinge.

[1] Harilikult voolutransformaatorite sekundaarahela takistus, millesse lülitatakse ampermeeter, on väike.

69. Voltmeetrite mõõtepiirkonna laiendamine.

A. **Eeltakistused.** Voltmeetrite mõõtepiirkonna laiendamiseks pingetele kuni 750 V kasutatakse harilikult eeltakistusi.

Eeltakistused valmistatakse mikaniitplaatidena, portselanrullidena või eri raamidena, millele on mähitud peen isoleeritud traat manganiinist, konstantaanist vms. suure eritakistusega ja väikese temperatuuriteguriga materjalidest

Nende takistus ulatub sadadesse tuhandetesse oomidesse. Neid valmistatakse, samuti nagu šunte, nii sisseehitamiseks kui ka riistast lahus ülespanemiseks.

Eeltakistuste arvutus on äärmiselt lihtne. Olgu meil riist, mis on arvutatud pingele U_1 ja millele on vaja valida eeltakistus nii, et riista saaks lülitada pinge alla $U_2 > U_1$. Siis vahe $U_2 - U_1$ osutub liigseks pingeks, mida tuleb kaotada eeltakistuses R. Kuna $U_1 = I_V R_V$ ja $U_2 - U_1 = I_V \cdot R$, siis jagades mõlemad võrrandid, saame:

$$\frac{U_1}{U_2 - U_1} = \frac{I_V \cdot R_V}{I_V \cdot R} = \frac{R_v}{R},$$

kus I_V on riista ja seega ka eeltakistust läbiva voolu tugevus; siit

$$R = R_V \cdot \frac{U_2 - U_1}{U_1} = R_V \cdot \left(\frac{U_2}{U_1} - 1\right).$$

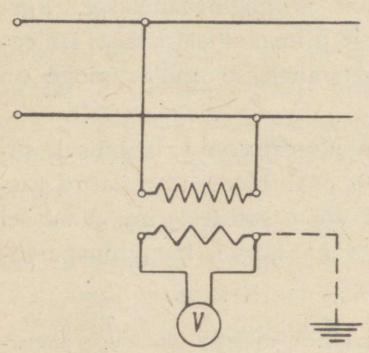
Näide 29. Leida eeltakistuse suurus voltmeetrile mõõtepiirkonnaga 25 V ja sisetakistusega 2000 Ω, et tõsta mõõtepiirkonda kuni 250 V.

$$R_V = 2000\ \Omega;\quad U_1 = 25\ \text{V};\quad U_2 = 250\ \text{V};$$

järelikult

$$R = 2000 \left(\frac{250}{25} - 1\right) = 2000 \cdot 9 = 18\,000\ \Omega.$$

B. **Pingetransformaatorid.** Teiseks abinõuks voltmeetri mõõtepiirkonna laiendamisel on pinge-mõõtetransformaatorite kasutamine. Pingetransformaatorid on normaalselt ette nähtud vahelduvvoolu kõrgepingetele ja taotlevad kahte eesmärki: a) annavad võimaluse madalamale pingele arvestatud riista lülitada kõrgema pingega ahelasse, b) tõstavad riista teenindamise ohutust, kui mõõtmisi teostatakse kõrgepingeahelates, sest riist on sel puhul ühendatud transformaatori sekundaarmähisega. Viimane aga on hästi isoleeritud kõrgepingeahelasse lülitatud



Joon. 162.

primaarmähisest. Ohutuse eesmärgil riista kere ja sekundaarahelad maandatakse.

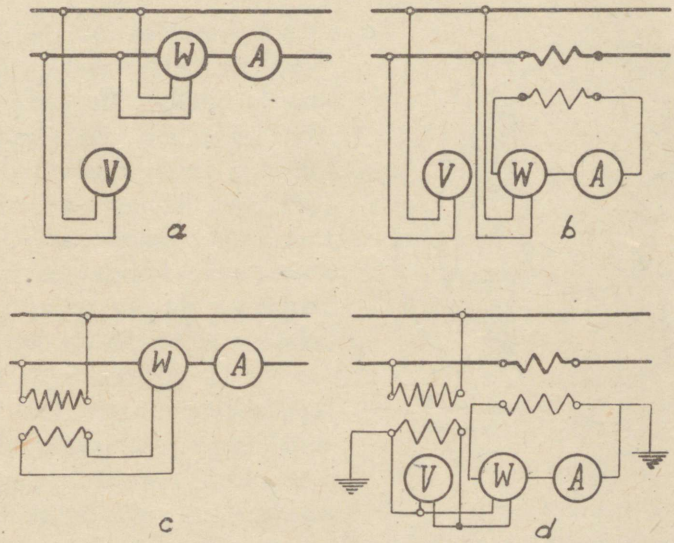
Pingetransformaatoritel on harilikult primaarmähises suurem keerdude arv kui sekundaarmähises, misjuures sekundaarahel arvutatakse tavaliselt pingele 100—110 V (harvem 220 V), s. o. pingetransformaatorid tegelikult kujutavad endast väikesi pinget alandavaid transformaatoreid.

Joonisel 162 on kujutatud voltmeetri lülitusskeem pingetransformaatori kaudu.

Nagu skeemist selgub, lülitatakse primaarmähis võrku paralleelselt, kuna sekundaarmähisega ühendatakse mõõteriist. Seejuures ühe transformaatoriga võib ühendada mitu riista.

70. Vattmeetrite ja voolumõõtjate mõõtepiirkonna laiendamine.

Vattmeetrite ja voolumõõtjate mõõtepiirkonna laiendamiseks nende vooluosad lülitatakse voolutransformaatorite, pingeosad aga pingetransfor-



Joon. 163.

maatorite kaudu. Joonisel 163 on toodud elektrimõõteriistade lülitusskeemid järgmise nelja erijuhuse jaoks:

a) madal pinge (120—220 V) ja mitte suur voolutugevus; on lubatav kõikide riistade lülitamine ilma transformaatoriteta;

b) madal pinge, kuid suurem voolutugevus; kõik riistade vooluosad on lülitatud voolutransformaatorite kaudu, pingeosad — otseselt;

c) madal pinge, mis aga on suurem vattmeetri nimipingest, näiteks 220 V, kui vattmeeter on arvutatud pingele 110 V;

d) kõrgepinge; kõik riistad sõltumata voolutugevusest on lülitatud mõõtetransformaatorite kaudu ning nende sekundaarahelad maandatud.

Mõõteriistade skaalade gradueerimisel mõnikord arvestatakse ette teatava kindla transformeerimise koefitsiendiga transformaatori kasutamist.

Kui aga mõõtetransformaatori kaudu lülitatakse riist, mille skaala on arvestatud võrku otselülitamisele, siis riista näited tuleb korrutada mõõtetransformaatori transformeerimise koefitsiendiga. Joonisel 163-d toodud skeemi järgi lülitatud vattmeetri näited tuleb ilmselt korrutada kummagi mõõtetransformaatori transformeerimise koefitsientide korrutisega.

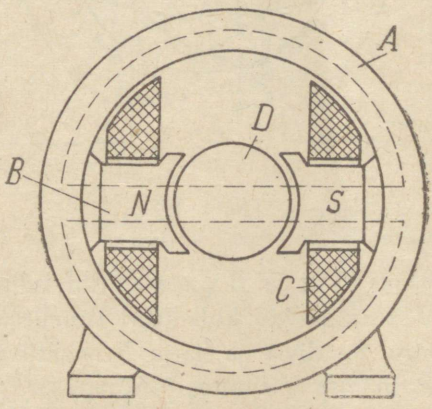
XVI peatükk.

ÜLDISED OMADUSED.

71. Töötamise põhimõte.

Voolu elektromagnetilistele omadustele pühendatud peatükis vaatlesime vooluga juhtme liikumist magnetväljas. See nähe on elektrimootorite töötamise aluseks. Kõigepealt peatume alalisvoolu-mootorite konstruktsioonil ja omadustel.

Joonisel 164 on näidatud alalisvoolu-mootor lõikes. Mootori magnetsüsteem koosneb valatud teras- või malmikkest *(A)*, poolustest *(B)*, mis on koostatud lehtterasest ja milledele on asetatud ergutuskatsad *(C)*, ning ankrust *(D)*. Ankur on samuti koostatud teraslehtedest, mis ühelt poolt kaetud lakiga või üle kleebitud siidpaberiga pöörisvoolude piiramiseks, nagu see oli kirjeldatud p. 22.



Joon. 164.

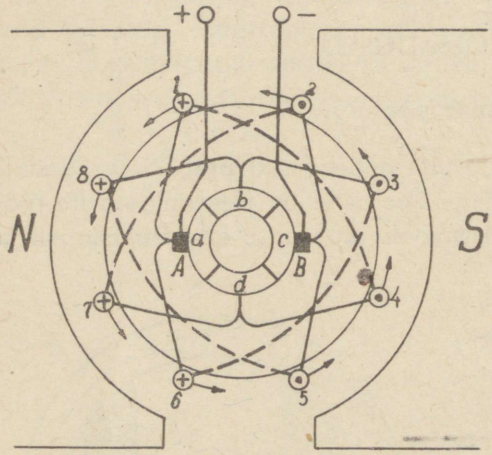
Vool, läbides ergutuskatsade mähise, tekitab magnetvoo, mis läbib mootori magnetsüsteemi. Selle voo jõujooned täidavad õhupilu pooluste ja ankru vahel. Siin asuvad voolukandvad juhtmed. Joonisel 165 on toodud mootori ankrumähise lihtsaim skeem.

Ankru välispinnal asuvad kaheksa juhet *(1—8)*, mis on koondatud ühiseks nn. trummmähiseks. Kollektoril on ainult neli lamelli *(a — d)*. Mähis on kujundatud järgmiselt: ankru esimesel lauppinnal kollektori lamelliga a ühendatud juhe *(1)* ühineb ankru tagumisel lauppinnal juhtmega *(4)*, mis on joodetud lamellile *d*. Juhtmed *(1)* ja *(4)* koos laupühendustega moodusta-

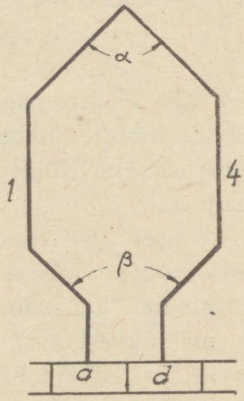
vad ankrumähise esimese sektsiooni, mis on eraldi näidatud joonisel 166, kus α on tagumine laupühendus (joonisel 165 näidatud punktiiriga) ja β-esimesed laupühendused, mis on ühendatud kollektori lamellidega.

Lamellist d algab mähise teine sektsioon, mis hõlmab juhtmeid *(7)* ja *(2)* ning lõpeb lamellil c. Kolmas sektsioon suundub lamellist c lamellile b ning koosneb juhtmetest *(5)* ja *(8)*. Viimane, juhtmeid *(3)* ja *(6)* hõlmav sektsioon, algab lamellil b ja lõpeb lamellil a, millest algas meie mähis.

Sel viisil mähis on suletud. Alalisvoolumootorite ankrumähised on alati suletud mähised.



Joon. 165.



Joon. 166.

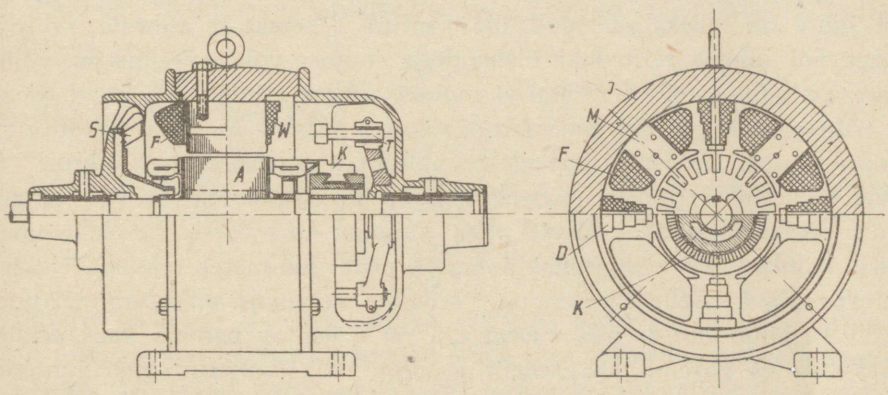
Harjad A ja B on asetatud selliselt, et joonisel kujutatud ankru asendis nad puudutavad kollektori lamelle a ja c. Ühendame harja A alalisvoolu võrgu positiivse ja harja B negatiivse klemmiga ning vaatleme voolude jaotust mähise üksikutes juhtmetes.

Võrgu positiivselt juhtmelt vool suundub harja A, sealt kollektori lamellile a ja siin hargneb kahte harru. Pool voolust suundub juhtmete *1—4—7—2* ja kollektori lamelli c kaudu harja B ning siit võrgu miinusesse. Voolu teine pool, läbides juhtmeid *6—3—8—5*, kollektori lamelli c ja harja B, pöördub samuti võrku. Seega igast juhtmest voolab läbi pool võrgust ankrusse suunduvast voolutugevusest, kusjuures voolude suunad juhtmetes on joonisel 165 vastavalt märgitud ristidega ja punktidega.

Kuna ankur on asetatud kahe pooluse N ja S vahele, siis igale juhtmele ankrupinnal avaldab mõju elektromagnetiline jõud. Juhtmetele mõjuva jõu suunda on lihtne määrata vasaku käe reegli abil.

Nagu selgub joonisest 165, kõik elektromagnetilised jõud tekitavad samasuunalisi pöördmomente, käesoleval juhul kellaosuti pöörlemisele vastassuunas. Selles suunas alustab pöörlemist mootori ankur.

Vaadeldud mootori töötamise põhimõte lubab järeldada, et alalisvoolumasin on pöörduv masin. Tõesti, eespool (p. 23) nägime, et sama masin, kui selle ankrut ringi ajada mingi jõumasinaga, näiteks soojus-jõumasinaga või hüdroturbiiniga, tekitab elektrienergiat, töötades generaatorina. Praegu aga oleme selgusele jõudnud, et ühendades masina klemmid võrguga ja toites ankrut ja ergutusmähiseid alalisvooluga, hakkab masin pöörlema ja tekitab töötades mootorina mehaanilist energiat.



Joon. 167.

Joonisel 167 on näidatud neljapooluselise mootori piki- ja ristlõige. Lehtterasest valmistatud hambuline ankur *A* omab ristlõikel selgelt nähtavaid uurdeid, kuhu sängitatakse kollektori lamellidega *K* ühendatud ankrujuhtmed.

Kollektori vastu surutakse joonisel mitte näidatud harjad. Neid kinnitatakse traaversile *T*, asetatult erilistesse harjahoidjatesse. Harjade arv on harilikult võrdne pooluste arvuga.

Masina peapoolused *M* kinnitatakse valatud ikkele *J*. Peapooluste polariteet on alati vahelduv, s. o. põhjapoolusele järgneb alati lõunapoolus jne. Pooluste südamikkudele on asetatud ergutuskatsad *F*. Kõrvuti peapoolustega kaasaegsetel masinatel on harilikult nn. abipoolused *D*, millede arv on võrdne peapooluste arvuga. Abipooluste mähised *W* lülitakse ankruahelaga järjestikku. Abipooluste ülesandeks on tagada masina sädelemisvaba töötamist selle kooormuse muutumisel laiades piirides. Tähega *S* on pikilõikel tähistatud masina jahutusõhu voolu tekitav ventilaator.

Neljapooluselised mootorid on praegusel ajal kõige enam levinud mootori tüübiks. Võimsaid ja aeglaselt pöörlevaid mootoreid ehitatakse tihti suurema, kuid muidugi alati paaris pooluste arvuga.

72. Voolutugevus mootori ankrus.

Eelmises punktis vaatlesime mootori ankru pöörlemist põhjustava pöördmomendi tekkimist. Mootori pöörlev ankur ei erine millegagi generaatori pöörlevast ankrust. Erinevus on ainult ankru pöörlemist põhjustavate jõudude iseloomus. Esimesel juhul need jõud on kahe magnetvälja — ergutusvälja ja ankrujuhtmeid ümbritseva välja — vastastikuse mõju tulemusega, teisel juhul on selleks välisjõud, üle kantud generaatori ankrule siduriga, rihmaga või mingit teist liiki ülekandega soojus- või veejõumasina võllilt. Pöörlemise põhjus mingil määral ei mõjuta ankrus esinevaid nähteid. Seega kõik nähted, mis esinesid generaatori ankrus, peavad esinema ka pöörleva mootori ankrus. Siin peatume elektromotoorse jõu tekkimisel ankrus.

Mootori ankur pöörleb magnetväljas, mille tekitavad ergutuse amperkeerud. Ankrujuhtmed lõikavad välja jõujooni ning järelikult, elektromagnetilise induktsiooni põhiprintsiibi alusel, peab juhtmetes tekkima elektromotoorne jõud. Selle suurus on võrdeline sekundis ankrujuhtme poolt lõigatavate jõujoonte arvuga, suund aga on määratav parema käe reegliga.

Rakendades parema käe reeglit joonisel 165 kujutatud ankrujuhtmete kohta näeme, et neis juhtmeis indutseeritud EMJ on vastupidiselt suunatud juhtmeid läbivale voolule ja seega vastupidiselt ka ankrusse voolu saatvale võrgupingele.

Seepärast mootori ankru juhtmeis tekkiv EMJ kannab *vastuelektromotoorse jõu* nimetust.

Selle suurus määratakse elektromagnetilise induktsiooni põhiprintsiibi alusel valemiga, mis oli tuletatud generaatori ankrutele, nimelt.

$$E = \Phi \cdot \frac{p \cdot n}{60} \cdot \frac{z}{a} \cdot 10^{-8} \text{ (volti)}, \qquad (74)$$

ehk

$$E = K_E \cdot \Phi \cdot n,$$

kus

$$K_E = \frac{p \cdot z}{a60} \cdot 10^{-8}$$

hõlmab antud mootori konstantsuurusi.

Seega ankrujuhtmetes voolavatele elektrilaengutele avaldavad samaaegselt mõju võrgupinge U, millega on ühendatud mootor, ja ankrus indutseeritud vastu-EMJ.

Vaadeldes kinnist ahelat: võrk — mootori ankur — võrk ja rakendades sellele Kirchhoff'i teist seadust, võime kirjutada:

$$U - E = I_a \cdot R_a,$$

kus $I_a \cdot R_a$ — pingekaotus ankrus, kust voolutugevus mootori ankrus —

$$I_a = \frac{U - E}{R_a}. \tag{75}$$

Tutvume nüüd mootori käivitamise momendil esinevate nähetega. On ilmne, et mootori ankrut võrguga ühendava vinnaklüliti sisselülitamise momendil, kui ankur veel ei pöörle ja sellel asuvad juhtmed ei lõika magnetilisi jõujooni, ankrus ei indutseeru mingisugust vastu-EMJ. Käivitamise momendil

$$n = 0,$$

kust [vastavalt valemile (74)]

$$E = 0,$$

järelikult käivitamise momendil voolutugevus ankrus on määratav valemiga

$$I_a = \frac{U}{R_a}. \tag{76}$$

Ankru takistuse R_a väga väikese väärtuse tõttu paigalseisva ankru vahetul ühendamisel võrguga saavutab vool väga kõrged väärtused, mis mitmekordselt ületavad antud mootorile soojenemistingimuste järgi lubatuid. Samuti ka mootorile elektrienergiat juhtivad juhtmed osutuvad käivitamise momendil liigselt ülekoormatuks. Selle vältimiseks käivitamise momendil vähendatakse voolutugevust ankrus, alandades ankruklemmidele antavat pinget. Seda võib saavutada lülitades käivitamisajaks ankruga järjestikku reostaadi.

Põhjalikumalt vaatleme mootorite käivitusseadmeid mootorite eritüüpidele pühendatud punktides.

73. Pöördmoment.

Kui ühele juhtmele ankru välispinnal mõjuv jõud on F kg ja ankru läbimõõt D cm, siis ühele ankrujuhtmele mõjuv moment on

$$M' = F \cdot \frac{D}{2} \text{ (kg} \cdot \text{cm)} = F \cdot \frac{D}{2} \cdot 10^{-2} \text{ (kg} \cdot \text{m)},$$

ja kogu ankrule

$$M = z \cdot M' = F \cdot \frac{D}{2} \cdot z \cdot 10^{-2} \text{ (kg} \cdot \text{m)},$$

kus z — juhtmete arv ankrus.

Ühele ankrujuhtmele mõjuv jõud F on elektromagnetilise jõu valemi järgi:

$$F = \frac{B \cdot I \cdot l}{9810\,000} \text{ (kg)}.$$

Siin B on induktsioon mootori õhupilus gaussides.

l on ankru pikkus cm ja I — voolutugevus ühes juhtmes.

Väljendame induktsiooni B magnetvoo Φ kaudu.

Kui mootori pooluste arv on $2p$, siis ühe pooluse magnetvoog Φ jaguneb õhupilus, läbides osa ankru silindrilisest pinnast, mis võrdub

$$Q = \frac{\pi \cdot D \cdot l}{2 \cdot p} \text{ (cm}^2\text{)},$$

kust induktsioon

$$B = \frac{\Phi}{Q} = \frac{\Phi}{\frac{\pi D l}{2p}} \text{ (gaussi)}.$$

Vaadeldes voolude jaotust ankrumähises joonisel 165 nägime, et võrgust ankrusse suunduv vool I_a hargneb kahte harru nii, et voolutugevus igas juhtmes on võrdne poole võrgust võetava voolutugevusega.

Mitmepooluselistes masinates paralleelharude arv, milledesse jaguneb vool ankrumähises, on harilikult suurem kui kaks. Olgu see alati paarisarvuline paralleelharude arv võrdne $2a$.

Siis voolutugevus I igas paralleelharus, seega voolutugevus igas ankruuhtmes, on

$$I = \frac{I_a}{2a}.$$

Sisse asetades saadud induktsiooni ja voolutugevuse avaldised, saame elektromagnetilise jõu suuruse:

$$F = \frac{\Phi}{\frac{\pi \cdot D \cdot l}{2p}} \cdot \frac{I_a}{2a} \cdot \frac{1}{9{,}81 \cdot 10^6} \text{ (kg)}.$$

Asetades selle väärtuse, pärast taandamist, pöördmomendi avaldisse, saame

$$M_a = \frac{p \cdot \Phi \cdot I_a}{\pi \cdot D \cdot a \cdot 9{,}81 \cdot 10^6} \cdot \frac{D}{2} \cdot z \cdot 10^{-2} \text{ (kg} \cdot \text{m)}.$$

ehk

$$M_a = \frac{p \cdot z}{2\pi \cdot \alpha \cdot 9{,}81 \cdot 10^8} \cdot \Phi\, I_a \text{ (kg} \cdot \text{m)}.$$

Tähistades tähega K_M antud mootori konstantsuurused, ja nimelt:

$$K_M = \frac{p \cdot z}{2 \cdot \pi \cdot 9{,}81 \cdot 10^8},$$

saame mootori ankrule mõjuva pöördmomendi lõpliku avaldise:

$$M_a = K_M \cdot \Phi \cdot I_a. \tag{77}$$

Vastavalt sellele avaldisele pöördmoment oleneb mootori konstruktsioonist (tegur K_M) ning on võrdeline magnetvoo suurusega ja ankru voolutugevusega.

Valem (77) määrab voolutugevuse mootori ankrus. Tõepoolest, mootori stabiilne töö, s. o. töötamine teatud püsiva pöörete arvuga, on võimalik ainult siis, kui pöördmoment on võrdne ankrule rakendatud koormusmomendiga. Oletame, et me käivitame tööpinki käitava väiksema mootori. Vastavalt valemile (76) voolutugevus ankrus saavutab võrku lülitamise momendil võrdlemisi õige kõrge väärtuse ning mootor arendab vastavalt suure pöördmomendi, ületades tunduvalt väikese takistusmomendi, mis on määratud tööstusmasina ja mootori hõõrdejõududega.

Mootor alustab tööd kiirendusega. Vastavalt pöörete arvu tõusule kasvab vastu-EMJ [valem (74)], voolutugevus ankrus väheneb [valem (75)] ja koos sellega väheneb pöördmoment. Arusaadavalt pöörete arvu kasv võib kesta ainult niikaua, kuni vähenev pöördmoment muutub võrdseks takistusmomendiga. Nende momentide võrdsuse saavutanud, mootor jääb töötama teatud püsiva kiirusega, misjuures voolutugevuse ankrus määrab täielikult valem (77), milles M_a tähendab mootorile rakendatud takistusmomenti.

Kui suurendada mootori koormust, sundides näiteks tööpinki võtma treiteraga laastu, siis kaob momentide tasakaal. Takistusmoment suureneb. Tagajärg avaldub mootori aeglustunud pöörlemises, pöörete arv väheneb, millele vastavalt väheneb vastu-EMJ. Voolutugevus mootori ankrus kasvab ja vastavalt kasvab pöördmoment. Arusaadav on, et pöörete arvu vähenemine kestab seni, kui kasvav pöördmoment võrdsustub takistusmomendiga. Momentide tasakaalu saavutamisel mootor hakkab töötama püsiva pöörete arvuga, veidi madalamaga endisest ja endiselt valemiga (77) määratava voolutugevusega ankrus.

Nii näeme, et voolutugevus mootori ankrus täiel määral sõltub mootori mehaanilisest koormusest.

74. Pöörete arv.

Mootori pöörete arvu avaldist võib tuletada väljudes vastu-EMJ avaldisest.

Nagu teada,

$$E = \Phi \cdot \frac{p \cdot n}{60} \cdot \frac{z}{a} \cdot 10^{-8} \text{ (volti)};$$

kust

$$n = \frac{60 \cdot a}{p} \cdot \frac{E}{\Phi \cdot z} \cdot 10^{8} \text{ (pööret/min.)}.$$

Suurus

$$\frac{60 \cdot a}{p \cdot z} \cdot 10^{8}$$

on püsiv antud mootorile, oleneb ainult selle konstruktsioonist ega olene töörežiimist. Tähistades selle tähega

$$K_n = \frac{60 \cdot a}{p \cdot z} \cdot 10^{8},$$

saame pöörete arvu avaldise järgmisel kujul:

$$n = K_n \cdot \frac{E}{\Phi}.$$

Asendades selles avaldises E võrgupinge ja ankrus pingekaotuse kaudu

$$E = U - I_a \cdot R_a$$

saame lõplikult:

$$n = K_n \cdot \frac{U - I_a \cdot R_a}{\Phi} \text{ (pööret/min.)}. \qquad (78)$$

Valemist selgub, et mootori pöörete arv sõltub peaasjalikult võrgupingest ja magnetvoo suurusest. Pingekaotus $I_a \cdot R_a$ on tähtsusetu võrreldes võrgupingega, mistõttu ta avaldab väga vähe mõju masina pöörete arvule

Pinge ja eriti magnetvoo mõju pöörete arvule kasutatakse mootori pöörete reguleerimiseks, mida põhjalikumalt seletatakse mootorite eritüüpe käsitlevates punktides.

XVII peatükk.

HARUVOOLUMOOTOR.

Mootoreid, samuti kui generaatoreid liigitatakse ergutusmähise lülitusviisi järgi.

Haruvoolumootorites ergutusmähised on lülitatud võrku paralleelselt ankrumähistega, peavoolumootorites ergutus- ja ankrumähised on lülitatud järjestikku; kompaundmootorite poolustele aga on asetatud kaks sõltumatut mähist, milledest üks on lülitatud järjestikku ja teine paralleelselt ankruga.

75. Voolutugevus, pöödmoment ja pöörete arv.

Joonisel 168 on toodud haruvoolumootori põhimõtteline lülitusskeem. Ankru harjad ja ergutusmähise klemmid on ühendatud võrku, milles on püsiv pinge U. Võrguvool I hargneb ankruvooluks I_a ja ergutusvooluks I_e.

Need voolutugevused Kirchhoff'i seaduse järgi on järgmises vahekorras:

$$I = I_a + I_e. \tag{79}$$

Vaatleme lahus mõlemaid, võrrandi parempoolsesse ossa kuuluvaid voolutugevusi.

Ankru voolutugevus I_a määratakse eelmises punktis toodud valemiga:

$$I_a = \frac{U - E}{R_a}.$$

Voolutugevus elektromagnetite mähises I_e määratakse vastavalt Ohmi seadusele

$$I_e = \frac{U}{R_e}, \tag{80}$$

kus R_e on elektromagnetite mähise takistus.

Ergutusvoolutugevus I_e on väga väike võrreldes ankru töövooluga I_a. Edaspidisest näeme, et voolutugevusele I_e vastav energia kulub täielikult soojuse eraldamisele ja seega moodustab ebasoovitava energiakao, mis alandab mootori kasutegurit.

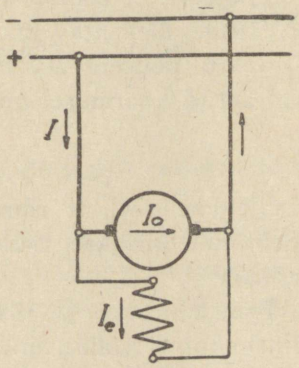
Selle kao piiramiseks mähise takistus R_e valitakse küllalt suur, millele vastavalt ergutusvoolu tugevus I_e on väike (harilikult 4 kuni 1% mootori täiskoormuse voolust). Vajalikus suuruses magnetvoogu saadakse ergutusmähise suure keerdude arvu arvel.

Valemi (80) parempoolses osas asuvad mõlemad suurused, võrgupinge U ja ergutusmähise takistus R_e (kui me ei muuda mingeid takistusi ergutusmähise ahelas), jäävad mootori töötamisel püsivateks.

Järelikult ka ergutusvoolu tugevus jääb muutumatuks ega olene koormusest.

Kuid ergutusvoolu tugevuse püsivus põhjustab ergutusmagnetvoo püsivust.

Haruvoolumootori ergutusmähiste magnetvoog ei olene koormusest.



Joon. 168.

See äärmiselt tähtis haruvoolumootori omadus määrab kõik mootori teised omadused.

Mootorite, niisama kui generaatorite omadused avalduvad kõige piltlikumalt mootorite karakteristikutes. Vaatleme haruvoolu mootori pöördmomendi ja pöörete arvu karakteristikuid.

Pöördmomenti mootori ankrul määrab eelmises punktis tuletatud valem:

$$M_a = K_M \cdot \Phi \cdot I_a.$$

Pöördmoment mootori võllil on veidi väiksem. Mootori tühijooksul on ta kasulik pöördmoment võrdne nulliga

$$M = 0.$$

Sealjuures aga ankru ümbermõõdule peab olema rakendatud teatav pöördmoment M_0 laagrite hõõrdumise ja mõnede teiste pöörlemise takistuste ületamiseks. Neid takistusi võib küllalt suure täpsusega pidada püsivateks ja olenematuteks koormusest. Järelikult ka moment ankru ümbermõõdul M_0 on samuti püsiv ega olene koormusest.

Kasulikku momenti mootori võllil võib ette kujutada vahena

$$M = M_a - M_0.$$

Selgitame näite varal mootori pöördmomendi muutumist sõltuvalt koormamise tingimustest.

Näide 30. Oletame, et mootor töötab rihmajami kaudu transmissioonile, mis käitab mitut tööstusmasinat. Mootor on lülitatud võrku pingega 110 V, ankrutakistus $R_a = 0{,}1\ \Omega$ ja takistusmoment tühijooksul on $M_0 = 0{,}3$ kg · m.

Oletame, et töötab ainult osa tööstusmasinaid, kusjuures rihmaga mootori võllile ülekantav takistusmoment $M_{tm_1} = 1{,}35$ kg · m. Neis tingimustes ankru pöörete arv $n = 1\,225$ pööret/min, võrgust ankrusse suunduv vool antud koormusel on

$$I_{a_1} = 20\ \text{A}.$$

Oletame veel, et rihmade üleviimisega vabadelt rihmaseibidelt tööseibidele rakendatakse tööle kõik antud transmissioonilt töötavad tööstusmasinad.

Transmissiooni ja rihma kaudu tööstusmasinate koormus kandus üle elektrimootori võllile, mille tagajärjel takistusmoment mootori võllil kasvas kuni $M_{tm_2} = 3$ kg · m.

Määrame voolutugevuse ankrus ja pöörete arvu täiskoormusel. Vastavalt mehaanika põhiseadustele stabiliseerunud liikumisel pöördmoment peab võrduma takistusmomendiga.

Siit järgneb, et pöördmoment mootori võllil enne koormuse suurendamist oli

$$M_1 = M_{tm1} = 1{,}35 \text{ kg} \cdot \text{m}.$$

ja moment ankrul

$$M_{a1} = M_1 + M_0 = 1{,}65 \text{ kg} \cdot \text{m}.$$

Pärast koormuse suurendamist pöördmoment mootori võllil osutus väiksemaks rakendatud takistusmomendist

$$M_1 < M_{tm2},$$

mille tagajärjel mootor hakkas töötama aeglasemalt ja tema pöörded vähenevad.

Pöörete arvu vähenemine toob kaasa vastu-EMJ vähenemise, nagu see selgub valemist (74), mis omakorda kutsub esile võrgust ankrusse voolava voolutugevuse suurenemise vastavalt valemile

$$I_a = \frac{U - E}{S_a},$$

kus võrgupinge U ja ankrutakistus R_a jäävad püsivateks ega sõltu mootori töötamise režiimist.

Ankru voolutugevuse suurenemine põhjustab mootori pöördmomendi suurenemise, kuna püsiva magnetvoo puhul pöördmoment on võrdeline voolutugevusega ankrus [valem (77)].

Mis piirini kestab siis mootori pöörete arvu vähenemine?

Pöörete arvu vähenemine kestab niikaua, kuni kasvav mootori pöördmoment muutub võrdseks takistusmomendiga. Sellest momendist, kui

$$M_2 = M_{tm},$$

liikumine muutub ühtlaseks, s. o. mootor jätkab pöörlemist püsiva pöörete arvuga.

Nii näeme, et vastu-EMJ on selleks regulaatoriks, mis määrab mootori koormusele vastava pöördmomendi, võtab võrgust ankrusse voolutugevust vastavalt koormusele, reguleerides seega mootori poolt võrgust võetavat võimsust.

Määrame voolutugevuse ankrus uuel koormusel.

Tasakaalu tingimusest järgneb, et

$$M_2 = M_{tm2},$$

kust antud pöördmoment

$$M_{a2} = M_2 + M_0 = 3 + 0{,}3 = 3{,}3 \text{ kg} \cdot \text{m}.$$

Pöördmomendi valemist järgneb, et

$$\frac{I_{a1}}{I_{a2}} = \frac{M_{a1}}{M_{a2}},$$

kust

$$I_{a2} = \frac{M_{a2}}{M_{a1}} \cdot I_{a1},$$

mis meie ülesande jaoks annab voolutugevuse ankrus:

$$I_{a2} = \frac{3{,}3}{1{,}65} \cdot 20 = 40 \text{ A}.$$

Mootori pöörete arvu uuel koormusel leiame vahekorrast

$$n_1 : n_2 = K_n \frac{U - I_{a_1} \cdot R_a}{\Phi} : K_n \frac{U - I_{a_2} \cdot R_a}{\Phi},$$

või pärast koondamist:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{U - I_{a_1} \cdot R_a}{U - I_{a_2} \cdot R_a},$$

kust

$$n_2 = \frac{U - I_{a_1} \cdot R_a}{U - I_{a_2} \cdot R_a} \cdot n_1$$

ehk, asendades tähed väärtustega:

$$n_2 = \frac{110 - 40 \cdot 0{,}1}{110 - 20 \cdot 0{,}1} \cdot 1225 = 1202 \text{ pööret/min}.$$

On lihtne arvutada mootori voolutugevust ja pöörete arvu tühijooksul. Endast mõistetavalt tühijooksul takistusmoment võllil on võrdne nulliga:

$$M_{tm3} = 0$$

ja ankru pöördmoment võrdub

$$M_{a3} = M_0 = 0{,}3 \text{ kg} \cdot \text{m}.$$

Siit ei ole raske määrata voolutugevust ja mootori pöörete arvu tühijooksul. Teostage need arvutused.

Joonistel 169 ja 170 on kujutatud haruvoolumootori karakteristikud. Joonisel 169 on toodud pöördmomendi ja joonisel 170 pöörete arvu olenevused ankru voolutugevusest.

Mõlemad graafikud on lineaarsed, kuna moment

$$M_a = K_m \cdot \Phi \cdot I_a$$

ja pöörete arv

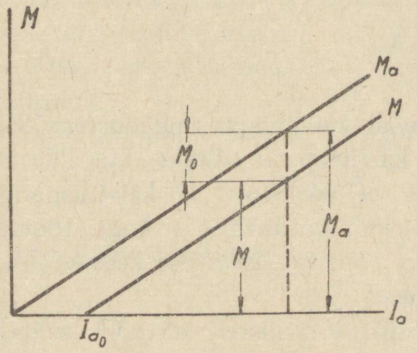
$$n = K_n \cdot \frac{U - I_a \cdot R_a}{\Phi}$$

on esimese astme funktsioonid voolutugevusest (kõik valemisse kuuluvad muud suurused on püsivad).

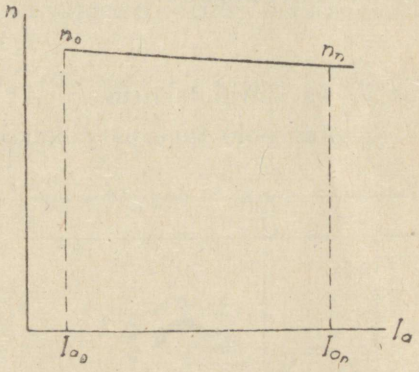
Joonisel 169 sirge M_a ordinaadid kujutavad endast pöördmomente mootori ankrul. Lahutades neist ordinaatidest sirglõigu M_0, mis vastab mootoris endas esinevale hõõrdemomendile, saame mootori võllil mõjuva kasuliku pöördmomendi M ordinaadid. See moment stabiliseerunud mootori töötamisel on võrdne mootori võllile rakendatud koormuse takistusmomendiga.

Graafiku lineaarsus vihjab haruvoolumootori väga tähtsale omadusele ja nimelt:

Haruvoolumootori poolt tarvitatava voolu tugevus on proportsionaalne koormuse takistusmomendiga.



Joon. 169.



Joon. 170.

Joonlõik I_{a_0} on ilmselt voolutugevus ankrus tühijooksul, kuna ta vastab nulliga võrdsele kasulikule pöördmomendile.

Punkt n_0 joonisel 170 annab tühijooksu pöörete arvu, punkt n_n — pöörete arvu mootori normaalsel koormusel.

Nagu selgub karakteristikust, pöörete arvu langus koormuse suurendamisel nullist normaalkoormuseni ei ole suur. See nähtub ka pöörete arvu valemist. Koormuse muutumisel muutub pingelangus ankrus $I_a R_a$; kuid see suurus ankru takistuse R_a väiksuse tõttu on väga väike võrreldes mootori klemmipingega U, mistõttu selle muutus ei avalda kuigi olulist mõju kogu avaldise suurusele.

Mootori pöörete arvude vahe tühijooksul ja nimikoormusel ei ületa 6% ning ainult väikevõimelistel mootoritel (kuni 5 kW) ulatub kuni 10—12%.

Seega võime määrata haaruvoolumootori tähtsaima omaduse:

Haruvoolumootori pöörete arv jääb koormuse muutudes peaaegu püsivaks.

Selle omaduse tõttu haruvoolumootor on eriti otstarbekohane muutuval koormusel pöörete arvu püsivust nõudvate mehhanismide, esijoones transmissioonide ja üksikute tööpinkide käitamiseks.

76. Käivitamine.

Tundma õppides mootorite üldomadusi nägime, et vastu-EMJ puudumise ja ankru väikese takistuse tõttu voolutugevus ankrus mootori vahetu võrku lülitamise momendil saavutab kõrgeid, temale ohtlikke väärtusi.

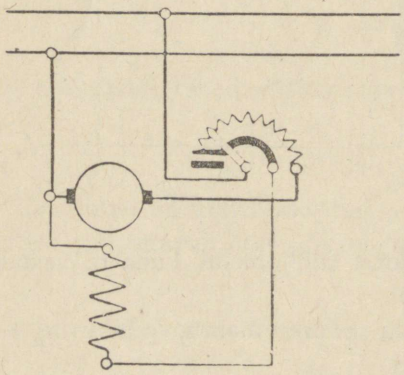
Harilikult lülitatakse järjestikku ankruga käivitusreostaat (käiviti) vastavalt joonisel 171 toodud skeemile.

Ettelülitatud käivitiga voolutugevus ankrus käivitamise momendil on määratud valemiga:

$$I_a = \frac{U}{R_a + R_k},$$

kus R_k on käiviti takistus.

Käivitusvoolu tugevus valitakse sõltuvalt käivitamise tingimustest. Sagedatel käivitamistel näiteks, kui lülitusaja kestus ei ole suur ja käivitusperiood moodustab tunduva osa kogu töötsüklist, on soovitav käivituse kestuse lühendamine.



Joon. 171.

Seepärast sellistel juhtudel valitakse suurem käivitusmoment, mis ületab mootori normaalmomenti 2—2,5-kordselt. Samakordselt ületab ka käivitusvool voolutugevust mootori normaalkoormusel.

Harvatoimuvate käivituste korral, kui mootori käivituskestusel ei ole suuremat tähtsust, reostaat valitakse selliselt, et käivitusvool ületaks normaalkoormuse voolu 1,3—1,5-kordselt.

Peab juhtima tähelepanu käiviti õigele lülitamisele. Käiviti pöördkontakt on ühendatud võrguga. Pöördkontakti viimisega tühikontaktile peavad katkestuma mootori mõlemad — ankru ja ergutuse — vooluringid, kus-

juures ergutusvooluring peab jääma suletuks omainduktsiooni EMJ vältimiseks, mis kindlasti tekib järsul voolukatkestusel ergutusmähises. Mähise suure keerdude arvu tõttu omainduktsiooni EMJ võib kergesti ulatuda elektromagnetite mähiste isolatsioonile ohtlikkude väärtusteni.

Joonisel 171 kujutatud skeemil ergutusmähise ahela sulgemine on tagatud ergutusmähise võrgust vooluga toitmiseks ettenähtud kontaktsegmendi ühendamisega käiviti esimese kontaktiga. Pideme üleviimise momendil tühikontaktile ergutusmähis lahutatakse võrgust, kuid ahel: ergutusmähis — ankur — käiviti jääb suletuks iseendale. Vool ja seega magnetvoog kaovad aeglaselt mitte tekitades suuri omainduktsiooni EMJ väärtusi. Elektromagnetite mähiste sisselülimine peab olema selline, et käivitamisel oleks tagatud suurim voolutugevus ergutusmähises võimalikult suurema magnetvoo tekitamiseks. See on tarvilik käivitamisel maksimaalse pöördmomendi saavutamiseks ja vastuelektromotoorse jõu kiireima kasvu tagamiseks.

Selgitame näite varal, kuidas arvutatakse käiviti takistust.

Näide 31. Oletame, et on tarvis valida käiviti mootorile võimsusega 4 kW. Mootori kasutegur olgu $\eta = 0{,}85$. Võrgupinge = 110 V, ankrutakistus $R_a = 0{,}12\ \Omega$. Lubatav voolutugevus käivitamisel võrdub poolteisekordse normaalvoolutugevusega.

Kõigepealt määrame voolutugevuse I_n, mis vastab mootori normaalsele koormusele.

Mootori poolt võrgust võetav võimsus

$$N_W = \frac{N}{\eta};\quad N_W = \frac{4}{0{,}85} = 4{,}7\ \text{kW}.$$

Määrame voolutugevuse

$$I_n = \frac{N_W}{U} = \frac{4700}{110} = 42{,}7\ \text{A}.$$

Ülesande tingimuste kohaselt käivitusvool võib tõusta poolteisekordse nimivoolu väärtuseni, s. o.

$$I_k = 1{,}5 \times 42{,}7 = 64\ \text{A}.$$

Vastu-EMJ puudumise tõttu maksimaalset voolutugevust ankrus käivitamisel (käiviti lülituskangi üleviimise momendil tühjalt kontaktilt töökontaktile) saab määrata valemist

$$I_{ka} = \frac{U}{R_a + R_k},$$

kust

$$R_k = \frac{U}{I_{ak}} - R_a.$$

Voolutugevuse I_{ak} määramine teostub ergutusvoolu tugevuse lahutamise teel mootori kogu voolutugevusest I_k. Kuid silmas pidades, et ergutusvool on suhteliselt väga nõrk, võib lugeda, et

$$I_{ak} = I_k,$$

ja siis

$$R_k = \frac{110}{64} - 0{,}12 = 1{,}60\ \Omega.$$

Arvutame, mitmekordselt ületaks käivitusvool mootori nimivoolu selle käivitamisel otseselt, ilma käivitita võrku lülitamisel.

$$I_{k\,\max} = \frac{U}{I_a} = \frac{100}{0{,}12} = 917\ \text{A}$$

$$\frac{I_{k\,\max}}{I_n} = \frac{917}{42{,}7} = 21,$$

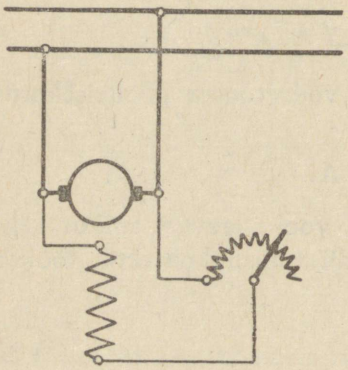
s. o. käivitusvool ületaks mootori normaalvoolu enam kui kahekümnekordselt, mis on arusaadavalt täiesti lubamatu.

Vaatamata sellele väikese võimsusega (kuni 1 kW) mootoreid siiski mõnikord käivitatakse otseselt võrku lülitamisega, s. o. ilma käivitita.

77. Pöörete arvu reguleerimine.

Haruvoolumootori kasutamine tööstusmasina individuaalseks käitamiseks on eriti otstarbekohane, kuna sellega on võimalik saavutada pidevat ja lihtsat tööstusmasina töökiiruse reguleerimist mootori pöörete arvu muutmise teel. Vaadeldes mootori pöörete arvu avaldist

$$n = K_n \cdot \frac{U - I_a \cdot R_a}{\Phi},$$



Joon. 172.

märkame, et pöörete arvu on võimalik muuta kas muutes mootori klemmidele antud pinget U, või muutes magnetvoo Φ suurust. Viimane viis leiab harilikult kasutamist. Selleks lülitatakse järjestikku ergutusmähisega haruvoolu- ehk reguleerimisreostaat (joon. 172).

Pöörete arvu avaldisest nähtub, et pöörete arv on pöördvõrdeline magnetvooga.

Minimaalse mootori pöörete arvu saavutame reostaadi kangi äärmise vasaku seisuga, kuna sellele seisule vastab magnetvoo maksimaalne väärtus. Enne mootori käivitamist tuleb kontrollida, kas regu-

leerimisreostaadi kang asub minimaalsele takistusele vastavas asendis. Sellega täidame varemmainitud tingimuse käivitamisest maksimaalse magnetvooga. Ainult käivitusperioodi lõppedes võib nihutada reostaadi kangi paremale, suurendades takistust ergutusvoolu ringi. Ergutusvoolu vähenemine ja sellest põhjustatud magnetvoo kahanemine kutsub esile silmapilkse EMJ languse ja järsu voolutugevuse hüppe ankrus, mille tagajärjel mootori pöördmoment kasvab ja põhjustab muutumatu takistuspöördmomendi puhul pöörete arvu suurenemist. Vastu-EMJ taas kasvab peaaegu endise väärtuseni, jäädes maha võrgupingest 2—4% võrra.

Uue suurema pöörete arvuga mootori poolt tarvitatav voolutugevus on siiski suurem ja seega ka võimsusetarvitus on suurem kui enne. See on täiesti loomulik, kuna kasulik võimsus võrdub

$$N = M \cdot \omega \tag{81}$$

ja pöörete arvu suurenemisel peab kasvama.

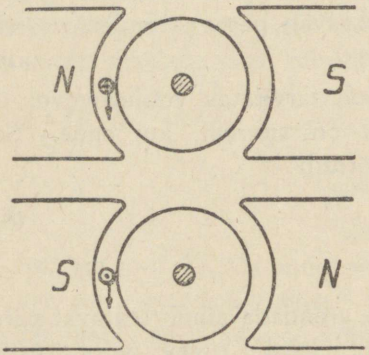
Kuna soojenemisest tingitult mootor võib arendada ainult teatavat piiratud võimsust (kestval ülekoormusel ankrut läbiv tugev vool tõstab ankru temperatuuri isolatsioonile ohtliku väärtuseni), siis on ilmne, et mootori pöörete arvu tõstmine täiskoormusega töötamisel on võimalik ainult mootorile rakendatud takistusmomendi vähendamise eeltingimusel.

Tavaline pöörete arvude suhe normaaltüübilistel mootoritel on 1:2 või 1:3.

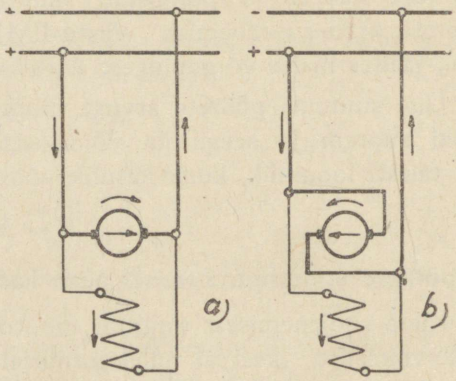
Nagu eespool oli näidatud, on võimalik saavutada mootori pöörete arvu muutumist mootori klemmipinge reguleerimisega. Püsiva pinge korral võrgus, kuhu on lülitatud mootor, võib seda teostada lülitades reostaadi järjestikku ankruga, samuti nagu lülitatakse käiviti. Kuid reostaat pöörete arvu reguleerimiseks, olles kestvalt lülitatud ahelasse, peab evima suure ristlõikega juhtmeid ülekuumenemise ärahoidmiseks, mis oleks vältimatu tavalise käiviti kestval sisselülitamisel. Selline reguleerimisviis leiab harva kasutamist ja ainult väikese võimsusega mootorite juures, kuna mootori täiskoormuse vool, läbides reostaadi takistust, põhjustab selles suuri võimsuse kadusid ja viib alla seadme kasuteguri. Pöörete arvu valemist selgub, et näiteks pöörete arvu vähendamiseks 20% võrra on vaja ka ankrupinget vähendada samuti 20% võrra. Järelikult see osa peab kustuma reostaadis pingelangusena. Korrutades seda ankru voolutugevusega, saame 20% võimsuse kaotust reostaadis, mis on arusaadavalt äärmiselt ebaotstarbekohane.

79. Pöörlemissuuna muutmine.

Selleks, et muuta mootori ankru pöörlemise suunda, on vaja muuta magnetvoo jõujoonte suunda või voolu suunda ankrus. Samaaegne magnetvoo ja ankruvoolu suundade muutmine ei muuda pöörlemissuunda (joon. 173). Siit järgnevad haruvoolumootori reverseerimise reeglid.



Joon. 173.



Joon. 174.

Haruvoolumootori pööörlemissuuna muutmiseks tuleb ümber lülitada ergutusmähis, jättes voolutugevuse suuna ankrus endiseks, või, jättes samaks voolusuuna elektromagnetite mähistes, ümber lülitada harjad.

Harilikult haruvoolumootoreid reverseeritakse muutes voolu suunda ankrus.

Joonisel 174 — a ja b on toodud mootori lülitused kahe erineva ankru pöörlemissuuna jaoks.

79. Pidurdamine.

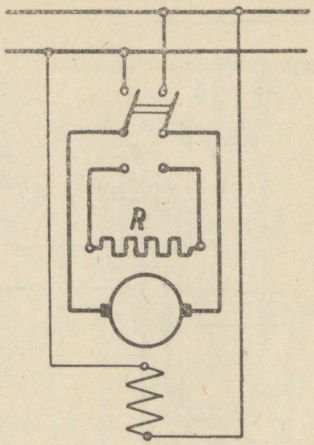
Mootori seismapanekuks on vaja käiviti kang üle viia tühikontaktile ja lahutada vinnaklüliti.

Kuid sealjuures mootor ja sellega ühendatud mehhanismid (näiteks tööstusmasina spindel) pöörlevad teatud aja inertsi mõjul edasi. Selline nähtus põhjustab otstarbetut ajakaotust ning teatud juhtudel ei ole üldse lubatav, näiteks siis, kui nõutakse mootoriga käitatava mehhanismi täpset seadmist (lõiketera seadmine, mille etteandmine suurtel tööstusmasinatel toimub erimootoriga).

Sellistel juhtudel rakendatakse elektrilist pidurdamist.

Joonisel 175 on kujutatud haruvoolumootori ümberlülitamise skeem töörežiimilt pidurdamisrežiimile. Kui ümberlüliti lülitada ülemisse asen-

disse, on mootor lülitatud võrku ja töötab normaalselt. Üle viies ümberlüliti kangi alumisse asendisse, me lahutame ankru võrgust ja ühendame selle pidurdamistakistusele, kusjuures ergutusmähis jääb lülitatuks võrku. Pööreldes inertsi mõjul ankru juhtmed lõikavad pooluste magnetvoo jõujooni ja neis indutseerub edasi EMJ (mis mootori töötamisel oli vastu-EMJ).



Joon. 175.

Ankru voolutugevus ümberlüliti ülemise asendi puhul

$$I'_a = \frac{U - E}{R_a},$$

pärast ümberlülitamist võrdub:

$$I''_a = \frac{-E}{R_a + R},$$

ja voolusuund muutub vastupidiseks vastavalt EMJ suunale.

Vastupidine voolu suund endise magnetvoo suuna juures muudab pöördmomendi suunda, mis töötab nüüd pöörlemissuunale vastu, muutudes seega pidurdavaks momendiks. Mootor kiiresti peatub.

Kui pidurdustakistus võtta võrdne nulliga, otsesidestades ümberlüliti alumised kontaktid, siis pidurdusvool ja pidurdusmoment kasvavad väga suureks ja mootori seismajäämine toimub silmapilkselt. See on lubatud ainult väikestel mootoritel võimsusega kuni 1 kW, kuna liig tugev vool ja tugev sädelemine kollektoril ohustavad mootorit ja pidurdamisel esinev järsk tõuge võib purustada mootorit tööstusmasinatega ühendavaid osi.

80. Haruvoolumootori lülitusskeem.

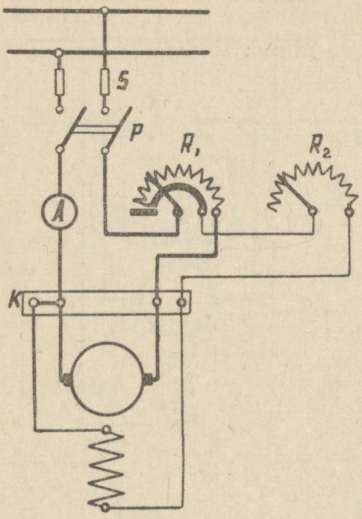
Mootori ühendamist võrguga ja reostaatidega teostatakse kaabliga. See ühendatakse mootori niinimetatud klemmidelauale kinnitatud klemmidega.

Haruvoolumootoril on klemmidelaual 4 klemmi. Kahega neist on ühendatud harjade juhtmed ja kahe teisega ergutusmähiste juhtmed.

Joonisel 176 on kujutatud haruvoolumootor koos klemmidelauaga võrku lülitatult.

Siin S on sulavkaitsmed, P — vinnaklüliti, R_1 — käiviti, R_2 — reguleerimisreostaat. Võrku on lülitatud ampermeeter mootori poolt võrgust tarvitatava voolutugevuse mõõtmiseks.

Käivitil on kolm klemmi: üks pöördkontakti ühendamiseks võrguga, teine — käivitustakistuse alguse ühendamiseks ankruga ja kolmas — käivitustakistuse alguse ühendamiseks ergutusahelaga.



Joon. 176.

Käivitil on tühikontakt, mis ei ole ühendatud käiviti takistusega. Pöördkontakti seadmine tühikontaktile katkestab voolu ja mootor jääb seisma.

Reguleerimisreostaadil on kaks klemmi, mis ühendatakse vabas järjestuses ergutusahelasse. Reguleerimistakistusel ei ole kunagi tühja kontakti, sest haruvoolu katkestamine kutsuks esile magnetvoo kadumise (välja arvatud nõrk voog jäävmagnetismi mõjul). Selle tagajärjel kaoks vastu-EMJ ja vool kasvaks väga kõrge väärtuseni, mis põhjustaks kaitsmete läbipõlemist.

Kui mootori koormus on väga madal, siis järsk magnetvoo vähenemine kutsub esile sama järsu ankru pöörete arvu suurenemise (pöörete arvu avaldises murru nimetaja läheneb nullile, murru väärtus, s. o. pöörete arv läheneb lõpmatusele). Sellejuures arendatav tsentrifugaaltung võib välja rebida mähised ankru uuretest ja hävitada ankru. Mootor jookseb end puruks. Samad nähted esinevad iga kord, kui vool haruringis järsku katkeb (ergutusahela juhtme katkemine).

XVIII peatükk.

PEAVOOLU- JA KOMPAUNDMOOTORID.

81. Peavoolumootor, voolutugevus, pöördmoment, pöörete arv.

Joonisel 177 on kujutatud peavoolumootori põhimõtteline lülitusskeem. Elektromagnetite ja ankrumähised on lülitatud võrku järjestikku. Nii ankrut kui ka ergutusmähist läbib sama vool I.

Voolutugevus määratakse analoogiliselt eelmisele

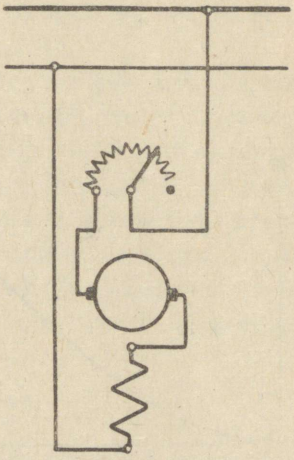
$$I = \frac{U - E}{R_a + R_e}.$$

Siin on nimetajas ankru- ja ergutusmähiste takistuste summa, kuna vool läbib järjestikku mõlemad takistused.

Erinevusena haruvoolumootorist, koormusest olenev vool läbib mitte ainult ankru, vaid ka ergutusmähise.

Seega võime kindlaks määrata peavoolumootori järgmise väga tähtsa omaduse.

Peavoolumootori magnetvoog muutub koos koormusega. Peavoolumootori ergutusmähist läbivast suurest voolutugevusest tingituna tuleb valmistada see mähis väga väikese takistusega, et vältida liigseid energiakadusid mähises. Harilikult on ergutusmähise takistus R_e ka umbes sama suur kui ankru takistus R_a.



Joon. 177.

Katsad valmistatakse suure ristlõikega juhtmest, sageli vasklattidest, väga väikese keerdude arvuga. Vajalik magnetvoog saadakse mähist läbiva suure voolutugevuse arvel.

Pöördmomenti mootori ankrul määrab endiselt valem

$$M_a = K_M \cdot \Phi \cdot I,$$

kuid siin muutuvad olenedes koormusest nii Φ kui ka I.

Madalatel koormustel, kui voolutugevus ei ole suur, mootori magnetring on küllastamata ja magnetvoog Φ on võrdeline ergutusmähise amperkeerdudega, s. o. võrdeline voolutugevusega. Kõrgematel koormustel on magnetring küllastatud ja magnetvoog palju ei muutu.

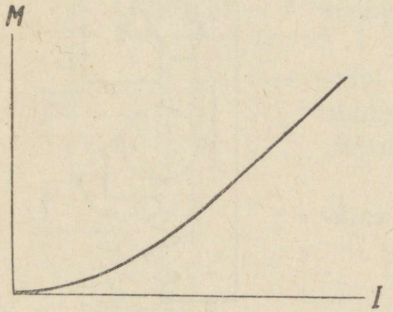
Joonisel 178 on kujutatud peavoolumootori pöördmomendi karakteristik sõltuvalt voolutugevusest.

Mootori magnetringi küllastumine suurematel koormustel veidi ühtlustab haru- ja peavoolumootorite erinevust (sest küllastuse seisukorras magnetvoog peaaegu ei muutu ning pöördmoment muutub võrdeliseks voolutugevuse esimese astmega nagu haruvoolumootorilgi).

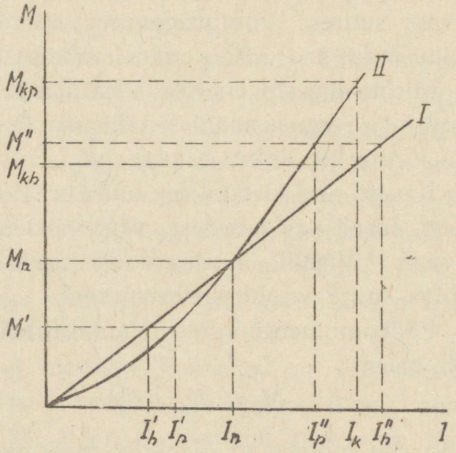
Võrdleme haru- ja peavoolumootorite momentide karakteristikuid. Joonisel 179 on kujutatud mõlemad karakteristikud. Karakteristik I vastab haruvoolu- ja karakteristik II peavoolumootorile. Võrdluseks on võetud mootorid samade nimimomentide ja -voolutugevustega, s. o. samavõimelised mootorid, võrdsete pöörete arvudega nimikoormusel ja ühesuguste klemmipingetega.

Oletame, et mootori koormus muutub piirides M' kuni M''. Karakteristikutest selgub, et haruvoolumootori puhul voolutugevuse kõikumine võrgus $(I'_h - I''_h)$ on tunduvalt suurem kui peavoolumootori puhul $(I'_p - I''_p)$.

Oletame, et mõlemale mootorile oleme lubanud käivitusvoolutugevuse I_k, mis ületab mootorite nimivoolutugevuse. Näeme, et peavoolumootori käivituse pöördmoment M_{kp} on suurem haruvoolumootori käivituse pöördmomendist M_{kh}. Järelikult peavoolumootor koormatult käivitub kergemini kui haruvoolumootor ja arendab käivitamisel suuremat kiirust.



Joon. 178.



Joon. 179.

Pöörete arvu avaldis peavoolumootorile omandab järgmise kuju:

$$n = K_p \frac{U - I(R_a + R_e)}{\Phi},$$

kus $I\ (R_a + R_e)$ on pingekaotus mootoris, mis on väike võrreldes võrgupingega U.

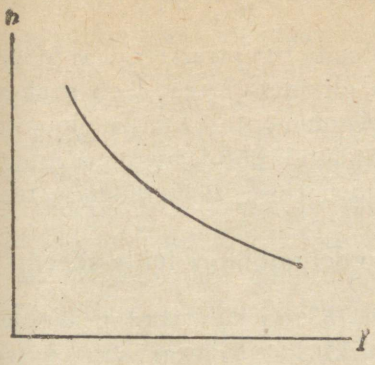
Koormuse kasvuga kasvab ka voolutugevus I ja sellega koos magnetvoog Φ. Murru lugeja veidi väheneb, samal ajal nimetaja suureneb ja kogu murru väärtus, s. o. pöörete arv, langeb tunduvalt.

Pöörete arvu sõltuvus voolutugevusest on kujutatud joonisel 180. Kõrgete koormuste puhul (suured voolutugevused) pöörete arvu kõver muutub sirgeks, kuna magnetahela küllastudes magnetvoog muutub peaaegu püsivaks.

Toodud karakteristikutest järgneb peavoolumootori põhiomadus:

Peavoolumootori pöörete arv muutub tugevasti koormuse muutumisel.

Seepärast peavoolumootor ei ole otstarbekohane selliste mehhanismide käitamiseks, mis nõuavad pöörete arvu püsivust muutlikul koormusel, nagu näiteks transmissioonid ja üksikud tööstusmasinad.



Joon. 180.

Seevastu seal, kus puudub selline nõue, head käivitusomadused ja tugevate ülekoormuste võimalus teevad väga soovitavaks peavoolumootori rakendamise. Peamisteks peavoolumootorite rakendamisaladeks on elektrisõidukid ja tõste-transportseadmed, kraanad, vintsid jne.

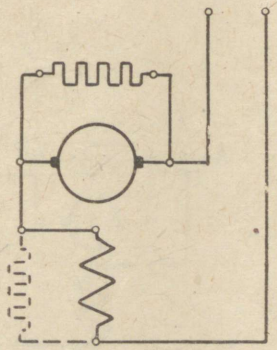
Mootori magnetvoo liigne kahanemine väga madalatel koormustel tõstab mootori pöördeid selle ankrule ohtlike väärtusteni. Seepärast peavoolumootoreid ei tohi käitada tühjalt. Käitatava koormusega mootor peab olema ühendatud siduriga, hammasratasülekandega vms. kindla ajamiga, kuid mitte rihmaga, kuna rihma katkemine toob kaasa mootori puruksjooksmise.

82. Pöörete arvu reguleerimine.

Mootori pöörete arvu muutmist saavutatakse ankru pinge või magnetvoo muutmisega.

Pingega reguleerimisel lülitatakse mootorile järjestikku reostaat, mis on arvutatud kestvale koormusele mootori töövooluga (joon. 177). Suurte energia kaduде tõttu ei ole see viis majanduslikult otstarbekohane. Siiski väikevõimelistel mootoritel kasutatakse võrdlemisi sageli reguleerimist reostaadiga mootori peaahelas.

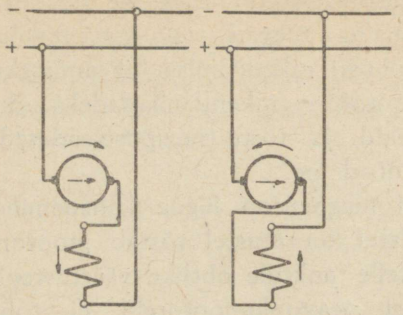
Reguleerimiseks magnetvoo muutmisega lülitatakse takistus paralleelselt ankrumähisega (joon. 181). Seega suureneb vool ergutusmähises, kuna ankrut läbivale voolule lisandub vool, mis läbib harutakistust. Magnetvoog suureneb ja mootori pöörete arv väheneb. Arusaadavalt mida väiksem on harutakistus, seda suurem on voolutugevus ergutusmähises ja seda enam alanevad mootori pöörded.



Joon. 181.

Lülitades takistuse paralleelselt mootori ergutusmähisega, nagu see on näidatud samal joonisel punktiiriga, vähendame magnetvoogu, kuna ergutusmähist läbib nüüd ainult osa ankruvoolust. Ergutusmähise šunteerimisel tõuseb mootori pöörete arv.

83. Pöörlemissuuna muutmine.



Joon. 182.

Peavoolumootori reverseerimise (pöörlemissuuna muutmise) reegel on analoogiline haruvoolumootori omaga. Joonisel 182 on näidatud pöörlemissuuna muutmine ergutusmähise ümberlülimise teel.

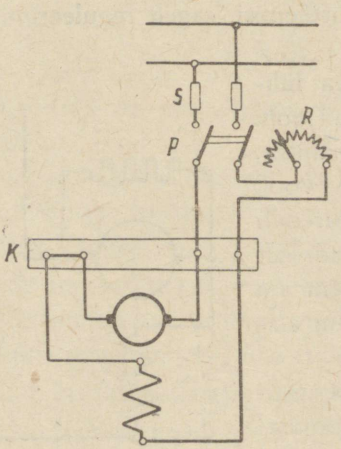
84. Peavoolumootori lülitusskeem.

Joonisel 183 on kujutatud peavoolumootori täielik lülitusskeem koos käivitamiseks ja reguleerimiseks kasutatava reostaadiga. Tähistused on samad, mis olid haruvoolumootori skeemis. Käivitil on ainult kaks klemmi.

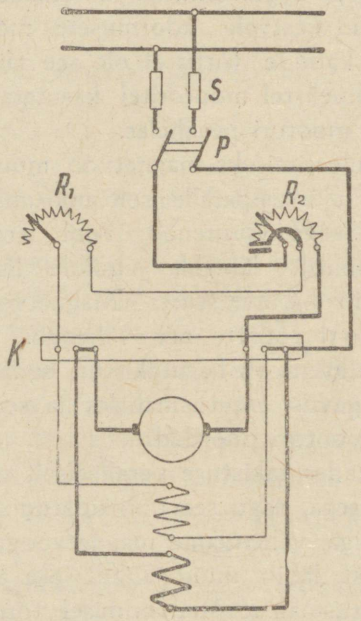
Pöördkontakti seadmisega tühikontaktile katkeb mootori vooluahel. Kuid ohtlikku ülepinget siin tekkida ei saa, sest ergutusmähise keerdude arv on väike ja seega temas indutseeruv omainduktsiooni EMJ on tähtsusetu.

85. Kompaundmootor.

Liiga järsud pöörete kõikumised ja puruksjooksmise võimalus piiravad



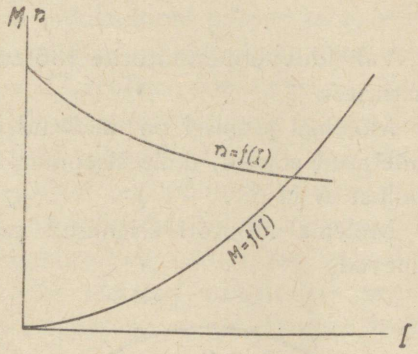
Joon. 183.



Joon. 184.

peavoolumootori rakendusala. Selle mootori heade käivitusomaduste ja ülekoormamise võimaluse ühendamine väiksema pöörete arvu kõikumisega ja suurema töökindlusega, mis on omased haruvoolumootorile, on lahendatud segaergutusega ehk kompaundmootoris. Mootori skeem on kujutatud joonisel 184. Mootori konstruktsiooni iseloomustab kahe ergutusmähise — pea- ja haruvoolu mähise olemasolu igal poolusel.

Pöördmoment suurte voolutugevuste puhul ankrus (tugev koormus, käivitamine) on väga kõrge, tänu peavoolu mähise poolt tekitatavale tugevale magnetvoole. Mootori pöörete arv ei saa kasvada üle teatava mootorile mitteohtliku piiri, kuna isegi koormuse täielikul puudumisel (kui voolutugevus peavoolumähistes on lähedane nullile) koormusest mitte olenev haruvoolumähise magnetvoog on küllalt suur, et ära hoida mootori puruks jooksmist. Käiviti ja reguleerimisreostaadi lülitused on näidatud skeemil ja on analoogilised nende lülitusega haruvoolumootorite juures. Pöördmomendi ja pöörete arvu karakteristikud $M_a = f(I)$ ja $n = f(I)$ kompaundmootori jaoks on toodud joonisel 185.

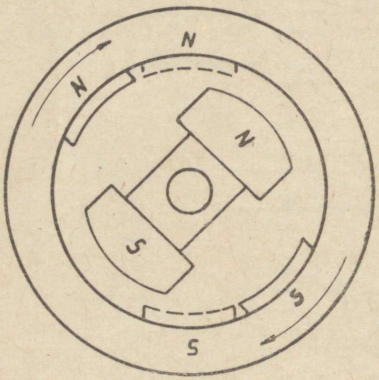


Joon. 185.

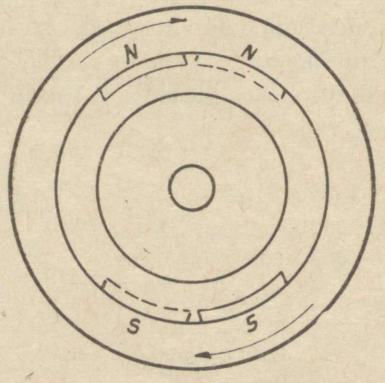
Vahelduvvoolumootorite töötamise põhimõte selgub jooniste 186 ja 187 vaatlusest.

Mõlemal joonisel on näidatud lõikes paigalseisev väline terassilinder, niinimetatud staator, mille sisepinnal libisevad kaks kiirelt pöörlevat magnetpoolust *N* ja *S*.

Mõlema mootori sisemised pöörlevad osad, niinimetatud rootorid, on erinevad.



Joon. 186.



Joon. 187.

Joonisel 186 on rootoriks kahepooluseline elektromagnet. Staatori pinnal libisevate ja rootori pooluste vastastikul mõjutusel kistakse viimased kaasa staatori pooluste pöörlemissuunas. Rootori *N*-poolus järgneb staatori *S*-poolusele ning rootori *S*-poolus staatori *N*-poolusele.

Rootori pöörlemine toimub staatori pinnal pooluste pöörlemise kiirusega. Sel põhimõttel töötavaid mootoreid nimetatakse sünkroonmootoriteks (sõna „sünkroonne" tähendab samaaegne).

Staatori pinnal libisevate pooluste poolt tekitatud pöörleva magnetvoo teine kasutamise võimalus on näidatud joonisel 187.

Siin rootoriks on võllile kinnitatud metallsilinder.

Silindrit läbivad magnetjõujooned pööreldes indutseerivad silindri keres niinimetatud pöörisvoolusid. Nende voolude koostööst pöörleva magnetvooga, mida tekitavad staatoril libisevad poolused, tekib magnetvoo pöörlemissuunas mõjuv moment.

Rootori pöörlemine magnetvoo suunas allub Lenz'i induktsiooni seadusele, millele vastavalt magnetvoost indutseeritud vool püüab alati hävitada induktsiooni põhjust. Käesoleval juhul on induktsiooni põhjuseks magnetvoo ja rootori suhteline liikumine. Induktsiooni põhjus kaob, kui rootor ja magnetvoog hakkaksid pöörlema sama kiirusega samas suunas. Kuid antud juhul rootor pöörleb alati aeglasemalt magnetvoost, sest induktsioon ja seega vool rootoris ning pöördmoment on võimalikud ainult magnetvoo ja rootori kiiruste vahe olemasolul. Seepärast sel põhimõttel töötavaid mootoreid nimetatakse „asünkroonseteks", mis tähendab „mittesamaaegseid".

Pöörlevat magnetvoogu vahelduvvoolumootorites tekitatakse kolmefaasilise ehk keerdvooluga, mis läbib staatorile asetatud paigalseisva keerdvoolumähise. Seepärast sellist pöörlevat magnetvoogu nimetatakse harilikult „keerdväljaks".

Alustame oma vaatlusi enam levinud asünkroonmootoriga.

XIX peatükk.

ASÜNKROONMOOTORID.

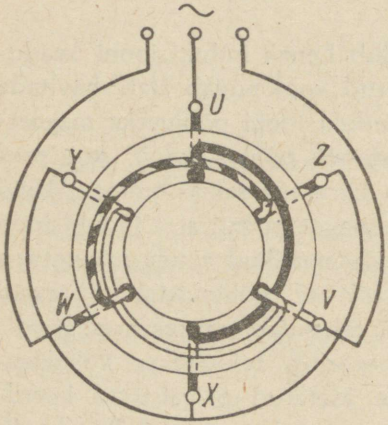
86. Keerdväli.

Joonisel 188 on näidatud lihtsaima staatori kolmefaasilise mähise skeem, mida on käsitletud juba eespool punktis 40.

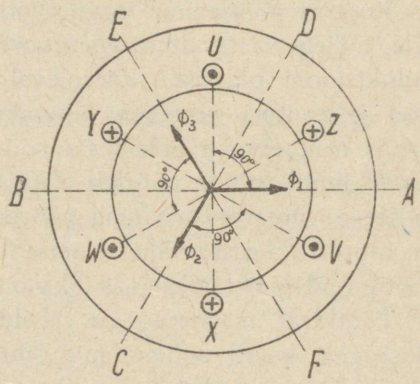
Kolmest katsast, igale faasile üks, on välja toodud ühendused kuuele klemmile. Kolme neist nimetame faaside algusteks ja tähistame tähtedega U, V ja W; ülejäänud kolme — faaside lõppudeks: X, Y ja Z.

Lülitame need mähised tähena ja ühendame keerdvoolu võrguga, nagu näidatud joonisel. Vaatleme mähise üksikutes juhtmetes voolude jaotust teatud aja momentidel. Lepime kokku lugeda voolusuunda mähise algusest lõpu poole positiivseks ja mähise lõpust alguse poole — negatiivseks.

Joonisel 189 on näidatud see mähis lõikes. Punktidega ja ristidega on märgitud positiivne voolusuund üksikute katsade juhtmetes. Iga vooluga katsa tekitab magnetvoogu, mille telg ühtub vastava katsa teljega. Joonisel 189 vektorid Φ_1, Φ_2 ja Φ_3 näitavad nende magnetvoogude positiivsete telgede suundi.



Joon. 188.



Joon. 189.

Nüüd vaatleme voolude ja magnetvoo vektorite paiknemist teatud ajamomentidel. Joonisel 190-a on kujutatud voolude jaotus, mis vastab positiivse voolumaksimumi momendile mähise esimeses faasis. See moment vastab faasinurgale $\alpha_1 = 90°$. Vastavalt meie kokkuleppele positiivne vool on suunatud mähise algusest selle lõppu.

Kasutades joonise 189 andmeid, kus on märgitud voolude ja magnetvoogude positiivsed suunad, võime märkida seda voolu suunda ka lõikes joonisel 190-a.

Vaadeldaval momendil vool faasis *1* on positiivne, s. o. ühtub joonisel 189 näidatud suunaga.

Vastavalt sellele joonisel 190-a ülemisele juhtmele märgime punkti ja alumisele — risti.

Voolud teises ja kolmandas faasis on võimalik määrata, kasutades voolu momentväärtuse avaldist:

$$i = I_m \cdot \sin \alpha .$$

Faasinurgad vaadeldaval momendil oleksid:

teisel faasil $\alpha_2 = \alpha_1 - 120° = 90° - 120° = -30°$;
kolmandal faasil $\alpha_3 = \alpha_1 - 240° = 90° - 240° = -150°$,

kust voolude momentväärtused:

$$i_2 = I_m \cdot \sin \alpha_2 = I_m \cdot \sin (-30°) = -\tfrac{1}{2} I_m,$$

$$i_3 = I_m \cdot \sin \alpha_3 = I_m \cdot \sin (-150°) = -\tfrac{1}{2} I_m.$$

Voolude momentväärtusi on võimalik saada graafiliselt, kasutades üksikute faaside voolude sinusoiddiagramme. Joonisel 191 on näidatud mootori üksikute katsade voolude sinusoidid. Normaal a vastab vaadeldavale momendile. Näeme, et sel momendil voolud teises ja kolmandas faasis on negatiivsed, mis ühtub eespoolsete arvutuste resultaatidega.

Katsades vooludega tekitatud magnetvoogude suurused on võrdelised voolude momentväärtustega. Seepärast voog Φ_1, mida tekitab katsa *1*, on sel momendil võrdne positiivse maksimumiga $\Phi_1 = \Phi_m$.

Katsades II ja III vooludega tekitatud vood on

$$\Phi_2 = -\tfrac{1}{2}\Phi_m \text{ ja } \Phi_3 = -\tfrac{1}{2}\Phi_m.$$

Vastavalt saadud väärtustele ongi ehitatud vektorid Φ, Φ_2 ja Φ_3 joonisel 190-a.

Vektorite suunad vastavad joonisele 189. Vektor Φ ühtub joonisel 189 antud suunaga, kuna voog Φ_1 on positiivne; vektorid Φ_2 ja Φ_3 aga on negatiivsetena suunatud vastupidiselt joonisel 189 näidatud suunale, mis oli loetud positiivseks.

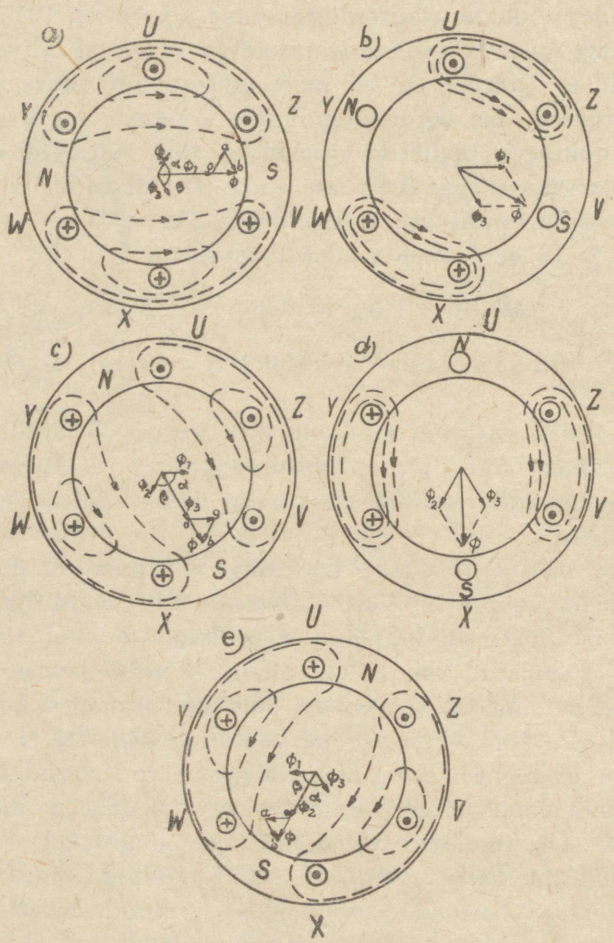
Kõigi kolme mähise üheaegse koostöö tulemusena masinas tekib liitmagnetvoog, mille vektor on võrdne osavoogude vektorite geomeetrilise summaga. Selline vektorite liitmine on näidatud joonisel 190-a. Vektori Φ_1 tipust on tõmmatud vektor *Oa*, mis on võrdne ja paralleelne vektoriga Φ_2, ja sellele liidetud vektor *ab*, mis on võrdne ja paralleelne voo vektoriga Φ_3. Vektor Φ on võrdne vektorite Φ_1, Φ_2 ja Φ_3 geomeetrilise summaga. Nagu näeme, resulteeriva magnetvoo suund ühtub faasi *1*, milles antud momendil valitseb maksimaalne vool, teljega. Samal joonisel on märgitud ka selle resulteeriva voo mõningad jõujooned.

Samade voolusuundadega juhtmeid haaravad ühised jõujooned.

Staatori rauast väljasuunduvad jõujooned moodustavad selle pinnal põhjapooluse *N*, ja rauda sissetungivad — lõunapooluse *S*. Nii siis vooluga läbitav vaatlusel olev mähis tekitab staatori pinnal kaks poolust vastavalt eespool vaadeldud joonisele 187. Tõestame, et need poolused libisevad staatori pinnal, s. o. et tegemist on keerdväljaga.

Joonisel 190-*b* on näidatud voolude jaotus staatori mähistes $^1/_{12}$ perioodi hiljem ($\frac{1}{600}$ sek. normaalsageduse 50 Hz puhul).

Voolude momentväärtused võib leida kas valemi $i = I_m \sin \alpha$ abil (sealjuures vastavad faasinurgad tuleb suurendada nurga võrra $\frac{1}{12} \cdot 360 = 30°$, ja on võrdsed: $\alpha_1 = 90° + 30° = 120°$; $\alpha_2 = -30° + 30° = 0°$ ja $\alpha_3 = -150° + 30° = -120°$) või voolude sinusoididest joonisel 191, kus sellele momendile vastab normaal *b*.



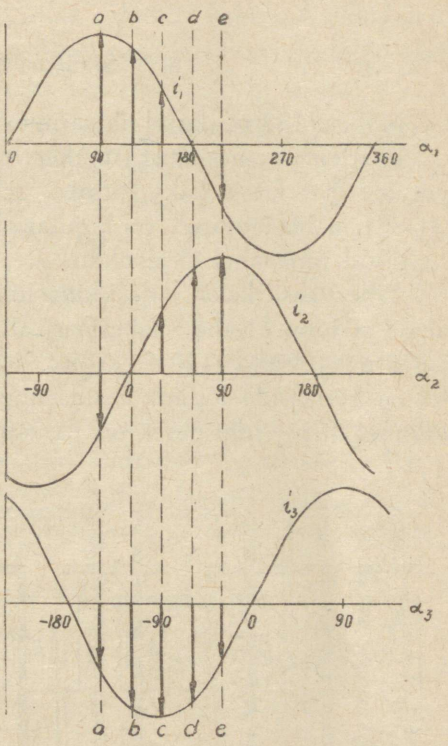
Joon. 190.

Jättes lugeja arvutada voolude väärtused, kasutame joonise 191 andmeid.

Jälgides normaali *b*, näeme, et vaadeldaval momendil vool esimeses faasis on positiivne, teises võrdne nulliga ja kolmandas negatiivne.

Kanname vastavad voolude suunad lõikele joonisel 190 *b*.

Vool faasis I on positiivne ja järelikult voolude suunad selle faasi juhtmetes ühtuvad joonisel 189 näidatud suundadega. Märgime ülemisele juhtmele punkti ja alumisele risti. Faasi II juhtmetes antud momendil ei ole üldse voolu. Vool faasi III juhtmetes on negatiivne, s. o. voolu suund on joonisel 189 näidatud suunale vastupidine. Seepärast faasi III parempoolsele juhtmele märgime punkti ja vasakpoolsele — risti.



Joon. 191.

Analoogiliselt ehitame ka voogude vektorid. Positiivse voo Φ_1 vektor suunalt ühtub voo Φ_1 vektoriga joonisel 189. Voog Φ_2 antud juhul puudub üldse ja negatiivse voo Φ_3 vektor on suunatud joonise 189 vektorile Φ_3 vastupidiselt.

Voogude Φ_1 ja Φ_3 vektorid on võrdelised vastavates faasides voolavate vooludega, ja need omakorda oma momentväärtuste poolest on võrdelised sinusoidi ordinaatidega joonisel 191. Nii siis voogude vektoreid joonisel 190-b võib kujutada võrdelistena sinusoidi ordinaatidega joonisel 191.

Üldist voogu Φ saame jällegi osavoogude Φ_1 ja Φ_2 geomeetrilise summana.

Võrreldes resulteerivate voogude vektorite asendeid joonisel 190-*a* ja *b* näeme, et voog on pöördunud kellaosuti liikumise suunas 30° nurga võrra. Poolused staatori pinnal on samuti nihkunud sama nurga võrra, s. o. oleme tõesti saanud keerdvälja ja staatori pinnal libisevad poolused.

Joonisel 190-c ja *e* on vaadeldud järgnevaid voo asendeid iga 30° järel $^1/_3$ perioodi vältel. Näeme, et voog pöörleb pidevalt samas, antud juhusel kellaosuti liikumise suunas, kusjuures voo suund voolu maksimumi momentidel mingis faasimähises ühtub selle mähise teljega. Kogu joonisel 190 vaadeldud ajavahemikus, s. o. $^1/_3$ perioodi kestel, on voo telg pööranud end

120° võrra, mis annab meie poolt vaadeldud kahepooluselise mähise puhul ühe täispöörde ühe faasi vältel või pöörete arvu minutis

$$n_1 = 60 \cdot f \text{ pööret/min.},$$

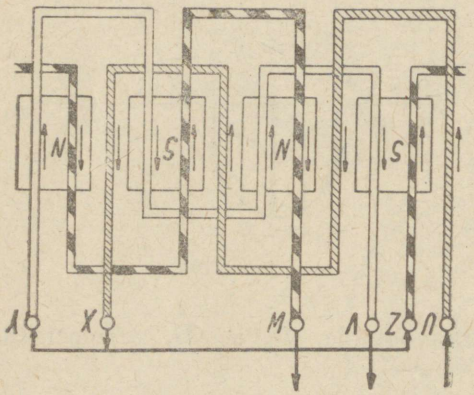
kus f on perioodide arv sekundis.

87. Staatori ja rootori mähised.

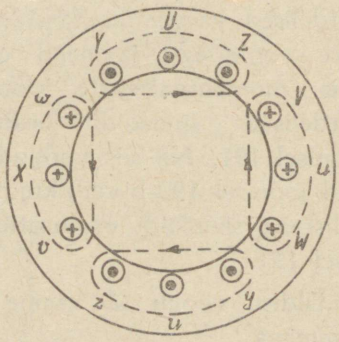
Joonisel 188 näidatud lihtsaim mähis koosneb kolmest ühesugusest katsast. Vaatleme samasugust, ühekeerulistest katsadest koosnevat mähist, kuid võtame igas faasis kaks katsat. Selline mähis oli kujutatud joonisel 111.

See mähis laotatult on kujutatud joonisel 192. Faaside üksikud katsad on lülitatud omavahel järjestikku.

Ühe faasi kaks järjestikku-lülitatud katsat omavad kahte väljavõtet: algus ja lõpp. Kahe naaberfaasi algused on nihutatud kahekordse poolusejaotuse $^1/_3$ võrra (120 elektrilist kraadi). Sama nurga võrra on nihutatud ka naaberfaaside lõpud. Samasuguse mähisega staator on lõikes näidatud joonisel 193. Juhtmetes on näidatud voolutugevuste suunad esimeses faa-



Joon. 192.



Joon. 193.

sis positiivse maksimumi momendil, mis vastab ordinaadile a joonisel 191. Samad voolude suunad on näidatud laotatud mähise skeemis joonisel 192.

Voolu positiivne suund on oletatud endiselt mähise algusest lõpu poole. Esimeses faasis vool läbib mähise selle algusest U lõpu X suunas, teises faasis vool on samal momendil negatiivne ja on suunatud lõpust Y alguse V poole ja kolmandas faasis samuti negatiivne ja suunatud lõpust Z algusse W. Saadud voolude jaotuse järgi on hõlpus saada ettekujutust voo jõu-

joonte jaotusest staatoris. Need on näidatud joonisel 193 punktiiriga. Nagu näeme, magnetvoog jaguneb nüüd nelja harru, tekitades staatori pinnal kahe pooluse asemele neli poolust. Määrame magnetvoo pöörete arvu sellise mähise puhul. Voolu maksimumiga mingis faasis magnetvoo telg ühtub vastava katsa teljega, nii et ajavahemikus $\frac{T}{3}$, mis vastab kahes naaberfaasis maksimaalsete voolude tekkimise ajavahemikule, magnetvoog pöörab end kahe naaberfaasi katsadevahelise nurga võrra.

Vaadeldaval mähisel see nurk on 60°. Nii siis ajavahemikul $\frac{T}{3}$ magnetvoog pöörab end 60° nurga võrra, perioodi vältel $3 \times 60° = 180°$ nurga võrra, s. o. teeb pool täispööret ja sekundis teeb 0,5 pööret.

Järelikult antud juhul pöörete arv minutis on

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{2} \text{ (pööret/min.)},$$

s. o. neljapooluseline magnetvoog pöörleb kaks korda aeglasemalt kahepooluselisest magnetvoost.

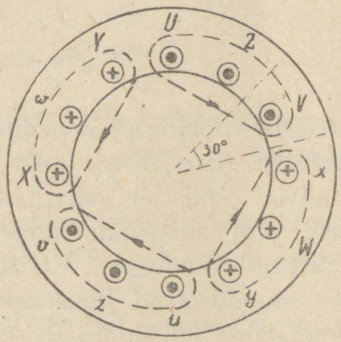
Joonisel 194 on näidatud voolude jaotus ja mähise jõujoonte skeem ühe kuuendiku perioodi võrra hiljem joonisel 193 vaadeldud momendist. Voolude jaotus vastab ordinaadile *c* joonisel 191. Võrreldes pooluste asendeid joonistel 193 ja 194 näeme, et viimased joonisel poolused vastaval ajavahemikul on nihkunud nurga võrra $30° = {}^1/_6 T$.

Voog pöörleb kaks korda aeglasemalt kui kahepooluseline.

Samal põhimõttel ehitatakse mähiseid ükskõik kui suurele pooluste arvule.

Tähistades pooluste paaride arvu p abil, saame voo pöörete arvu minutis:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p} \text{ (pööret/min.)}.$$

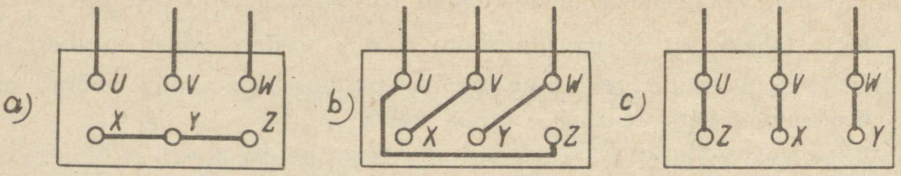


Joon. 194.

Mähise üksikute faaside väljavõtted ühendatakse mootori klemmidelaua klemmidega. Tavaline klemmide paigutus klemmidelaual on kujutatud joonisel 195.

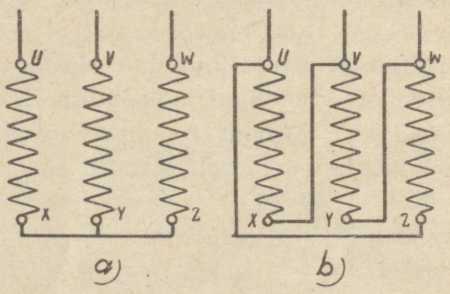
Mähiste kolm algust ja kolm lõppu on asutatud kahte ritta, kusjuures on võimalik kaks varianti. Joonisel 195-*a* ja *b* faasi alguse vastas asetseb faasi lõpp, joonisel 195-*c* iga faasi alguse vastas asub eelmise (või järgneva) faasi lõpp. Mähiseid on võimalik lülitada kas tähena või kolmnurgana. Tähtlülituseks on vaja kõik kolm lõppu (või algused) ühendada omavahel ja algused (või lõpud) lülitada võrku (joon. 195-*a*). Siis saame lülitusskeemi, mis on kuju-

tatud joonisel 196-*a*. Teisel juhul iga faasi lõpp ühendatakse järgmise faasi algusega, nagu see on näidatud joonisel 195-*b* ja *c* ning ühised punktid lülitakse võrku. Ühenduste skeem selliseks juhuks on antud joonisel 196-*b*.



Joon. 195.

Kolmnurklülituseks on klemmide asetus variant *c* järgi otstarbekohasem. Mõnikord mootori lülitust tähena või kolmnurgana teostatakse mootoris ja klemmidelauale tuuakse välja ainult kolm klemmi.



Joon. 196.

Vastavalt mootori töötamise põhimõttele (joon. 187) keerdväli mõjub silindrisele rootorile indutseerides selles voolu.

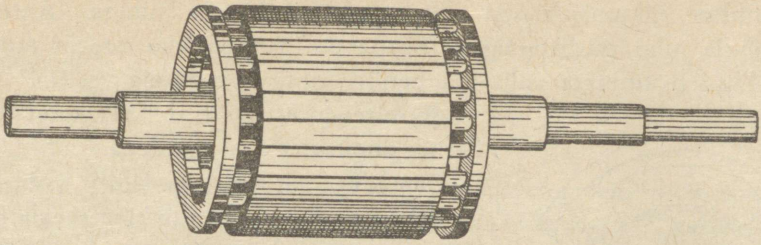
Püüdes vähendada magnetilist takistust, valmistatakse rootoreid ferromagnetilisest materjalist. Et saavutada maksimaalselt võimalikku pöördmomendi väärtust, peab jõudu rakendama võimalikult kaugemale keskpunktist. Seepärast rootori kere valmistatakse lehtterasest, mis takistab selles voolude indutseerimist, samal ajal valmistatakse rootori välispind hästi juhtivast materjalist, näiteks vasest. Õhupilu vähendamise eesmärgil voolukandvat pinda ei valmistata täissilindrina ümber rootori raudkere, vaid vask- või alumiiniumvarrastena, mis sängitatakse rootori teraslehtedesse stantsitud uuretesse. Vardad oma kummagi otsaga joodetakse rõngastesse, mis moodustavad lühistatud süsteemi, mistõttu selliseid konstruktsioone nimetatakse lühisrootoriteks.

Joonisel 197 on kujutatud lühisrootor. Selle mähis on lihtsaim rootorimähise tüüpidest.

Joonisel 198 on näidatud teistsugune asünkroonmootori rootori mähise ehitusviis. Rootori uuretesse sängitatakse isoleeritud vaskjuhtmed, mis moodustavad staatori mähisega analoogilise keerdvoolumähise.

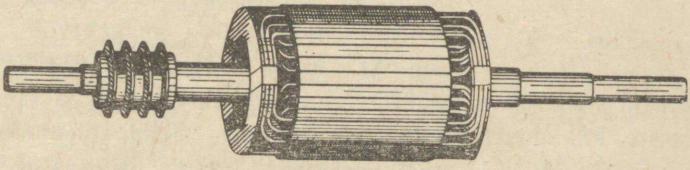
Rootori mähise pooluste paaride arv on võrdne staatorimähise pooluste paaride arvuga. Mähis võib olla lühistatud või, nagu seda tehakse tava-

liselt, lahtine. Lahtise mähise otsad tuuakse välja rootori võllile isoleeritult kinnitatud kolmele kontaktrõngale (joon. 198). Rõngastele asetatud



Joon. 197.

harjad võimaldavad lülitada järjestikku mähise faasidega käiviti takistuste sektsioone nagu sellega tutvume edaspidi, vaadeldes seda tüüpi mootorite käivitamist.



Joon. 198.

88. Pöördmoment ja pöörete arv.

Joonisel 199 on kujutatud asünkroonmootori lõige; selle mootori staatorimähis on teostatud joonisel 188 toodud skeemi järgi ja rootor on varustatud lühistatud varrastega analoogiliselt joonisele 197.

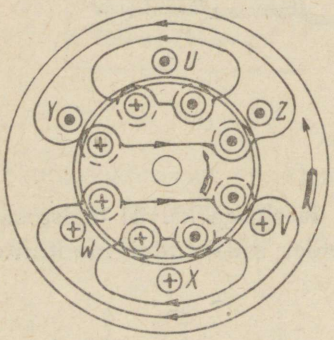
Magnetilise puiste vähendamise eesmärgil õhupilu staatori ja rootori raua vahel valmistatakse väga väiksena, umbes üks millimeeter, tavaliselt veelgi väiksem.

Staatori mähise võrku lülitamisega keerdvool tekitab keerdvälja, selle jõujooned lõikavad rootori uuretesse sängitatud vardaid ja indutseerivad neis EMJ. Kuid vardad koos lühisrõngastega moodustavad lühistatud süsteemi, milles indutseeritud EMJ mõjul tekib vool.

Seega voolu mootori rootorisse ei tooda juurde võrgust, vaid indutseeritakse selles endas, mistõttu selliseid mootoreid nimetatakse sageli induktsioonmootoriteks.

Määrame joonisel 199 näidatud rootoris indutseeritud voolu suuna.

Oletame, et keerdväli pöörleb kellaosuti liikumise suunale vastu. Rootori varrastes indutseeritud EMJ suuna määrame parema käe reegli abil. Rakendades seda reeglit antud juhusel tuleb meeles pidada, et parema käe pöial näitab juhtme liikumissuunda välja magnetjõujoonte suhtes. Antud juhul liigub väli ja juhe püsib paigal. Seepärast parema käe reeglit rakendades käe pöial tuleb suunata välja magnetjõujoonte liikumisele vastu.



Joon. 199.

Joonisel indutseeritud EMJ suunad on näidatud punktidega ja ristidega.

Samades suundades läbib vool rootori vardaid. Rakendades korgivinna-reeglit määrame jõujoonte suunad ümber rootori varraste. Need on märgitud joonisel punktiiriga. Keerdvälja jõujooned mööduvad varrastest ühtuva suuna poolt, s. o. meie näites ülalt rootori vasakpoolses ja alt selle parempoolss osas. Selle tulemusel tekivad mehaanilised jõud, mis mõjuvad varrastele. Need jõud põhjustavad rootori pöörlemist magnetvoo pöörlemise suunas. Koos rootori pöörete arvu kasvuga vahe rootori ja magnetvoo pöörete arvu vahel väheneb ja seega väheneb rootori varraste lõikamiskiirus jõujoonte poolt. Selle tulemusena väheneb rootoris indutseeritud EMJ, mis omakorda kutsub esile rootoris voolutugevuse kahanemise. Kuid voolutugevus rootoris ei saa kahaneda alla selle piiri, mille juures selle voolu ja keerdvälja koostööl sünnitatud pöördmoment muutub võrdseks rootorile rakendatud takistusmomendiga.

Seepärast rootori pöörete arv ei saa tõusta võrdseks magnetvoo nn. sünkroonpöörete arvuga. Ja tõepoolest, samas suunas pöörlevate magnetvoo ja rootori võrdsete kiiruste korral, magnetjõujoonte suhteline kiirus rootori varraste suhtes muutub nulliks, jõujooned ei lõika vardaid, rootoris indutseeritud vool kaob ning koos sellega kaob ka pöördmoment. On selge, et milline ka ei oleks rootorile rakendatud koormus, pöördmomendi tasakaal takistusmomendiga saabub enne, kui rootor saavutab sünkroonpöördeid, sest isegi tühijooksul on olemas kaod ja takistusmoment ei ole võrdne nulliga.

Rootor pöörleb alati veidi aeglasemalt magnetväljast. Koormuse kasvuga rootori pöörete arv veidi langeb, mille tulemusena kasvab rootori varraste lõikamise kiirus jõujoonte poolt (millede pöörlemiskiirus on alati püsiv) rootoris indutseeritud EMJ suurus kasvab ja koos sellega kasvavad voolutugevus ja pöördmoment. Taas saabub pöördmomendi ja takistusmomendi tasakaal, kuid veidi madalama rootori pöörete arvuga.

Magnetvoo ja rootori pöörete arvude vahet $n_1 - n$ nimetatakse libistuseks *(s)*. Tavaliselt libistus avaldatakse libistuse ja magnetvoo pöörete arvu suhtena

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \tag{82}$$

või protsentides

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \, 100\,\%.$$

Nii näiteks, kui normaalsageduse puhul neljapooluselise mootori rootori pöörete arv on $n = 1440$ pööret/min., libistus määratakse järgmiselt:

Magnetvoo pöörete arv on

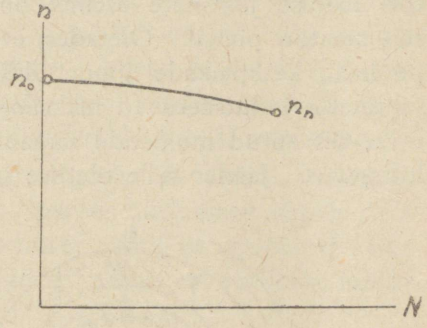
$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ pööret/min.},$$

libistus

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} = \frac{1500 - 1440}{1500} = 0{,}04$$

või protsentides:

$$s = 4\,\%,$$



Joon. 200.

Kaasaegsete lühistatud mootorite libistused normaalkoormusel kõiguvad piirides 3 kuni 6 %.

Libistuse valemist (82) võib leida järgmise asünkroonmootori pöörete arvu valemi:

$$n = (1 - s) \cdot n_1,$$

kus magnetvoo pöörete arv

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p};$$

siit

$$n = (1 - s) \cdot \frac{60 \cdot f}{p}. \tag{83}$$

Tühijooksul libistus on lähedane nullile ja rootori pöörete arv peaaegu saavutab magnetvoo pöörded.

Täiskoormusel libistus küünib, nagu oli mainitud, 4—6 %. Seega asünkroonmootori pöörete arv koormusega ei muutu palju. Joonisel 200 on graafiliselt näidatud pöörete arvu olenevus mootori kasulikust võimsusest. Punkt n_0 vastab tühijooksule, punkt n_n — nimikoormusele.

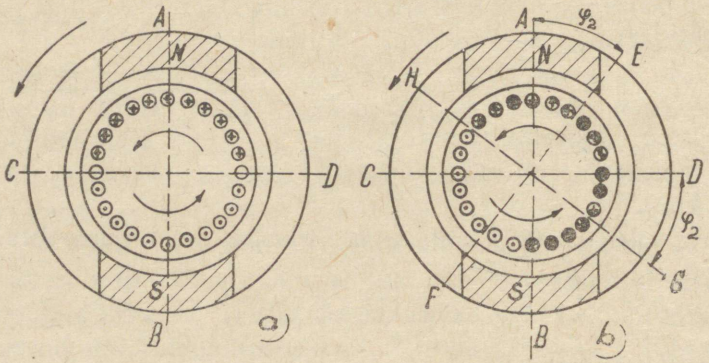
Asünkroonmootori pöördmoment tekib keerdvälja ja rootori voolutugevuse koostööl ja on võrdeline nende suurustega. Kuid, nagu varsti näeme, ta oleneb ka faaside nihkenurgast EMJ ja voolutugevuse vahel rootoris. Pöördmomendi üldine avaldis omab kuju:

$$M = K_m \cdot \Phi \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2. \tag{84}$$

Siin K_M on mootori konstruktsiooni elementidest sõltuv tegur, Φ — keerdvälja suurus, I_2 — voolutugevus rootoris ja φ_2 — faaside nihkenurk rootoris.

Vaatleme viimase teguri mõju pöördmomendi suurusele.

Joonisel 201-*a* ja *b* on kujutatud asünkroonmootor lõikes, kusjuures staatori mähise juhtmete asemel on näidatud momentaanne pooluste *N* ja *S* seis staatori pinnal. Oletades, et maksimaalne induktsioon õhupilus tekib pooluste keskpaikadel joonel *AB*, leiame, et sellel joonel asuvates rootori juhtmetes indutseeruvad maksimaalsed EMJ. Kui puuduks faaside nihe rootoris, siis antud momendil samades juhtmetes valitseks ka maksimaalne voolutugevus. Jäädes selle oletuse juurde, näitame voolude suunad juhtmetes



Joon. 201.

antud juhul. Pooluste teljele perpendikulaarne joon *CD* kujutab endast neutraaljoont. Arvestades, et voog pöörleb kellaosuti liikumisele vastassuunas ja rakendades parema käe reeglit leiame, et juhtmetes, mis asuvad pealpool joont *CD*, voolud on suunatud vaatleja poolt, ja juhtmetes, mis asuvad allpool joont *CD*, on suunatud vaatleja poole. Rakendades nüüd vasaku käe reeglit, leiame rootori juhtmetele mõjuvate elektromagnetiliste jõudude suunad.

Kõik need jõud loovad pöördmomendi ühises ja nimelt magnetvoo pöörlemise suunas.

Joonisel 201-b on kujutatud voolutugevuste jaotus, eeldades faaside nihet rootoris. EMJ maksimum esineb endiselt joonel *AB* asuvates juhtmetes, kuid voolu maksimum saabub samades juhtmetes veidi hiljem, sest vool jääb oma faasis maha EMJ-st. Vaatlusmomendil voolu maksimum esineb juhtmetes, mis asuvad joonel *EF*, mis on nihutatud joonest *AB* magnetvoo pöörlemissuunale vastu nurga võrra φ_2. Neutraaljoon nihkub vastavalt seisust *CD* seisu *GH*. Taas rakendades vasaku käe reeglit, leiame, et rootori faasidenihkumise nurga φ_2 piirides asuvatele juhtmetele sirgete *CD* ja *GH* vahel mõjuvad elektromagnetilised jõud töötavad üld-pöördmomendile vastu, nõrgendades seda.

Mida suurem on faaside nihkenurk rootoris, seda enam on selliseid vastutöötavaid juhtmeid ja seda väiksem on pöördmoment. See vastab täielikult pöördmomendi valemile (84). Faaside nihkenurga $\varphi_2 = 0$ korral valem annab momendi maksimaalse väärtuse, mis vastab joonisel 201-a kujutatud olukorrale, kui kõik jõud mõjuvad juhtmetele ühes ja samas suunas.

Nurga puhul $\varphi_2 = 90°$ valem (84) annab $M = 0$. Ja tõesti, vaadeldes joonist 201-b, märkame, et sirge *GH* asudes perpendikulaarselt sirgele *CD*, pooltele juhtmetest mõjuvad elektromagnetilised jõud on suunatud vastu teisele poolele juhtmetest mõjuvatele jõududele. Seega on rootorile mõjuv pöördmoment võrdne nulliga.

Jääb selgitada põhjusi, milledest oleneb faaside nihe rootoris.

Nagu teada, faaside nihkenurk oleneb vastava vooluringi, käesoleval juhul rootori aktiivse ja reaktiivse takistuste vahekorrast. Aktiivne takistus, sõltuv juhtmete materjalist, nende arvust, pikkusest ja ristlõikest, on antud rootoril püsiv suurus. Reaktiivne takistus on võrdeline sagedusega, ning sagedus rootoris oleneb pöörete arvust.

Üks periood rootori juhtmes vastab juhtmest magnetvoo ühe pooluste paari möödumisele, mis p pooluste paari puhul annab p perioodi ühe magnetvoo pöörde kohta rootori juhtmete suhtes. Kui magnetvoog teeb minutis n_1 pööret ja rootor samas suunas teeb samal ajal n pööret, siis magnetvoo pöörete arv rootori suhtes on $n_1 - n$, kust perioodide arv minutis on $p(n_1 - n)$, ja sekundis

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n)}{60}.$$

Jagades ja samal ajal korrutades avaldist suurusega n_1, saame

$$f_2 = \frac{p \cdot n_1}{60} \cdot \frac{n_1 - n}{n_1} = f \cdot s,$$

kuna esimene murdudest on võrdne võrgu sagedusega

$$f = \frac{p \cdot n_1}{60}$$

ja teine — libistusega.

Seega voolu sagedus rootoris on võrdeline libistusega.

Faaside nihet rootoris võib määrata takistuste kolmnurgast (joonis 202):

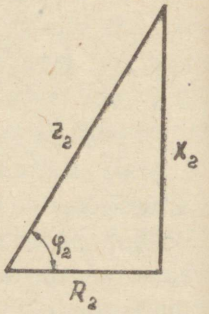
$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}},$$

kuid

$$X_2 = 2 \cdot \pi \cdot f_2 \cdot L_2 = 2 \cdot \pi \cdot s \cdot f \cdot L_2 ;$$

siit

$$\cos \varphi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot s \cdot L_2)^2}} \qquad (85)$$



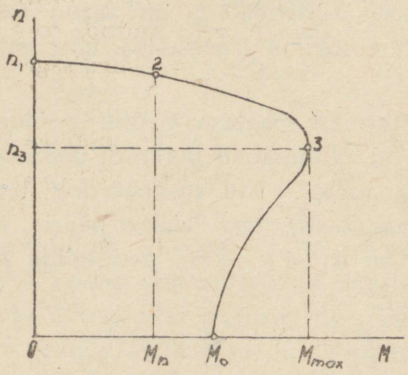
Joon. 202.

Seega $\cos \varphi_2$ suureneb libistuse vähenemisega, s. o. rootori pöörete arvu suurenemisega.

Teine momendi valemisse kuuluv muutuv suurus, ja nimelt rootori voolutugevus I_2 oleneb samuti libistusest.

Nagu oli selgitatud käesoleva punkti algul, voolutugevus rootoris kasvab libistuse suurenemisega, mis vastab rootori pöörete arvu kahanemisele.

Nüüd on lihtne selgitada pöördmomendi muutumist sõltuvalt mootori pöörete arvu muutumisest.



Joon. 203.

Joonisel 203 on näidatud mootori vastav karakteristik.

Mootori käivitamise momendil, kui $n = 0$, libistus omab maksimumi ($s = 1$); $\cos \varphi_2$, nagu nähtub valemist (85), omab sealjuures minimaalset väärtust. Seepärast, vaatamata võrdlemisi suurele voolutugevusele rootoris, mootori käivitusmoment M_0 ei ole suur.

Pöörete arvu kasvuga $\cos \varphi_2$ suureneb ja moment kasvab, kuid ainult teatud piirini. Umbes $s = 0{,}1 - 0{,}2$ juures pöördmoment saavutab maksimaalse väärtuse (punkt 3 karakteristikus). Edasi enam kui $\cos \varphi_2$ suurenemine mõjub rootori voolutugevuse vähenemine, mis on tingitud rootori juhtmete jõujoontest lõikamisekiiruse kahanemisest. Mootori pöördmoment hakkab kahanema. Kui $n = n_1$, siis magnetvoog

ja rootor pöörlevad sama kiirusega, rootorijuhtmete lõikumine jõujoontega puudub, rootoris ei indutseeru voolu ja pöördmoment on võrdne nulliga. Karakteristiku punkt 2 vastab mootori normaalmomendile. Maksimaalse momendi M_{max} väärtust nimetatakse mootori „vääratusmomendiks" ja see määrab mootori ülekoormamise võimaluse.

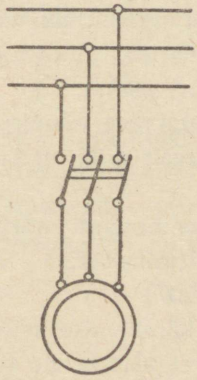
Mootori ülekoormatavus on maksimaalse momendi suhe normaalse momendiga. Kaasaegsetel asünkroonmootoritel see suhe on võrdne umbkaudselt

$$\frac{M_{max}}{M_n} = 1{,}8\,.$$

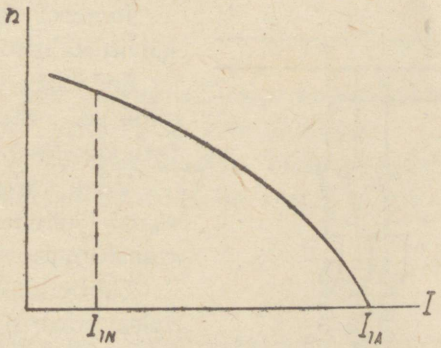
89. Asünkroonmootorite käivitamine.

Joonisel 204 on näidatud lühistatud rootoriga asünkroonmootori lihtsaim lülitusskeem. Käivitamine toimub staatori mähist võrguga ühendava vinnaklüliti abil.

See käivitusviis on ekspluatatsioonis väga otstarbekohane lihtsa aparatuuri ja lihtsa käivitustoimingu tõttu, kuid sellisel staatori vahetul võrku lülitamisel, kui rootor seisab paigal, voolutugevus sisselülitamise momendil ulatub väga kõrgete väärtusteni.



Joon. 204.



Joon. 205.

Joonisel 205 on kujutatud staatori voolutugevuse muutumise kõver sõltuvalt pöörete arvust.

Käivitusvool I_{1A} vastab rootori pöörete arvule null. Käivitusvoolu suhe voolutugevusega nimikoormusel I_{1N}, nn. mootori käivitusvoolu tegur, ulatub seitsmeni.

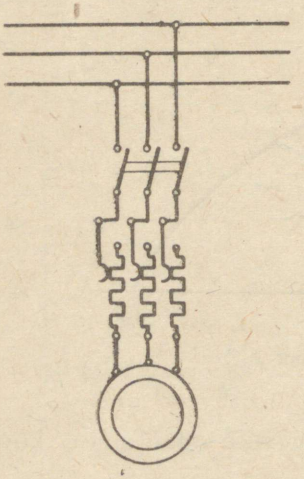
Tugev käivitusvool ei kesta kaua ja seega ei saa põhjustada ohtlikku soojusefekti mähistes ja võrgu juhtmetes. Kuid käivitusvoolu tõukest tingitud võrgu pinge kõikumised häirivad teiste samasse võrku lülitatud voolutarvitajate korralikku töötamist. Seepärast vahetu võrku lülitamise teel käivitatavate mootorite võimsus on piiratud. Viimase ajani meie elektrijaamad lubasid ainult väikevõimeliste mootorite vahetut lülitamist. Kuid jaotusvõrkude võimsuste suurenemisega vahetult võrku lülitada lubatud mootorite võimsuste piiri tõstetakse. Käesoleval ajal see võimsus sõltub transformaatori võimsusest, mis toidab seda süsteemi, mille osaks on juurdelülitatav mootor.

Teiseks vahetu lülitamise puuduseks on väike käivitusmoment. Kuid see omab tähtsust ainult koorma all käivitamisel. Sagedamini esineva juhuse jaoks, kui mootorit käivitatakse tühjalt (või ühendatult mittekoormatud transmissiooni võlliga või tööstusmasinaga), käivitusmoment on küllaldane mootori kiirendamiseks.

Käivitusprotsessi parandamist saavutatakse järgmiste viisidega: staatori pinge alandamisega või takistuse lülitamisega rootori ahelasse.

90. Käivitamine staatori pinge alandamisega.

Lihtsaimaks abinõuks mootori käivitusvoolu tugevuse vähendamiseks on staatorile antava pinge alandamine, mida võib saavutada mitmel viisil.



Joon 206.

Joonisel 206 on näidatud mootori skeem käivitustakistustega staatori ahelas.

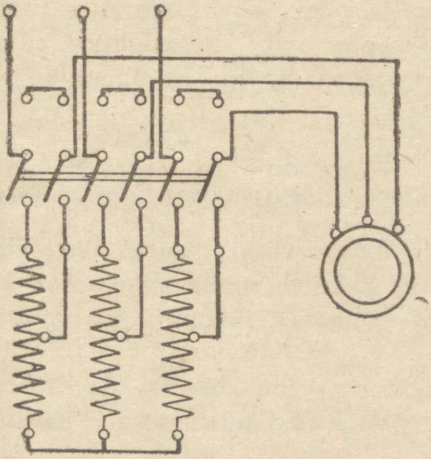
Seda käivitusviisi kasutatakse äärmiselt harva, kuna see vähendab tunduvalt niigi madalat mootori käivitusmomenti.

Veidi väiksem käivitusmomendi nõrgenemine esineb käivitamisel transformaatoriga või autotransformaatoriga (joon. 207).

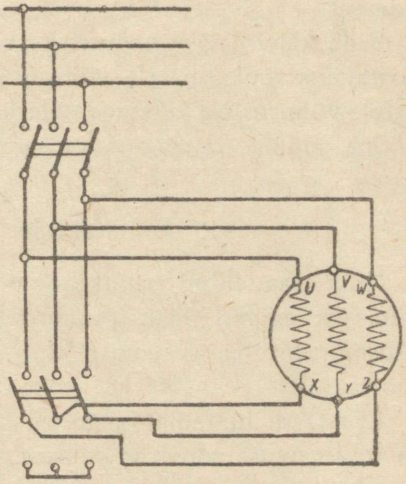
Ümberlüliti alumises, käivitamise seisus lülitatakse staatori mähis pinget alandavale autotransformaatorile. Ümberlüliti ülemine, tööseis ühendab staatori vahetult võrguga, lahutades sellest autotransformaatori.

Kõige sagedamini kasutatav käivitamisviis pinge alandamise teel on staatori mähiste ümberlülitamine tähelt kolmnurgale. Kuid see käivitusviis on rakendatav ainult mootoritele, mis normaalselt töötavad kolmnurgaks lülitatud staatori mähistega.

Joonisel 208 on toodud mootori lülitusskeem käivitamiseks ümberlülitamisega tähelt kolmnurgale vastava ümberlüliti abil. Ümberlüliti alumine seis vastab mähiste lülitusele tähena ja on mootori käivitusseisuks. Ülemine ümberlüliti seis annab mähiste lülituse kolmnurgana ja vastab mootori tööreżiimile.



Joon. 207.



Joon. 208.

Ümberlüliti alumises seisus on staatori iga faasi mähise klemmidel pinge

$$U_f = \frac{U}{\sqrt{3}},$$

kus U on võrgu pinge. Voolutugevus võrgus selle tagajärjel väheneb kolm korda, võrreldes käivitamisega otse kolmnurgana sisselülitamisel.

Arusaadavalt, kui voolutugevus võrgus staatori otsesel kolmnurgana sisselülitamisel on $I_\triangle$, siis voolutugevus staatoris on seejuures võrdne

$$I_{f\triangle} = \frac{I_\triangle}{\sqrt{3}}.$$

Lülitamisel tähena staatori faasipinge alandamine toob kaasa võrdelise voolu vähenemise staatori mähises

$$I_{fY} = \frac{I_{f\triangle}}{\sqrt{3}}.$$

Vool võrgus on võrdne nüüd vooluga staatori mähises

$$I_Y = I_{fY} = \frac{I_{f\triangle}}{\sqrt{3}} = \frac{I_\triangle}{\sqrt{3}\,\sqrt{3}}$$

ehk

$$I_Y = I_\Delta : 3 .$$

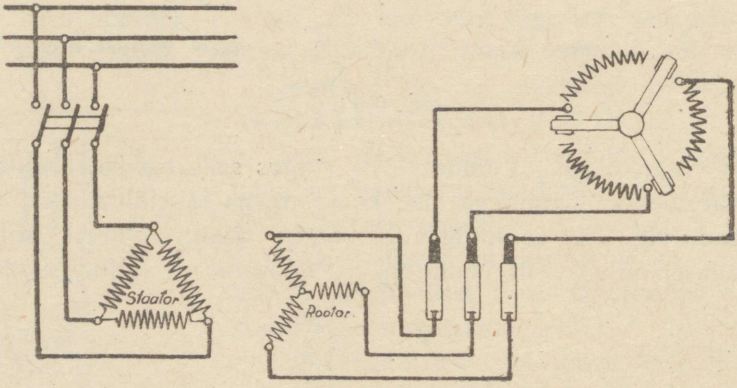
Seega mootori käivitamisel tähena lülitamine vähendab käivitusvoolu tugevust kolm korda, kuid niisama mitu korda väheneb ka käivitus-pöördmoment.

Selle käivitusviisi eemusteks on lihtne ja odav käivitusaparatuur, mida teostatakse väiksematele võimsustele kolmepooluselise ümberlülitina, suurematele võimsustele ja sagedatele käivitamistele aga kontrollertüübilise ümberlülitina, mõnikord paigutades selle õlisse.

91. Käivitamine reostaadiga rootori ahelas.

Kõik vaadeldud asünkroonmootorite käivitusviisid staatori pinge alandamisega evivad ühist puudust: nendega kahaneb tunduvalt mootori käivitusmoment ja seepärast ei ole nad kõlblikud mootori käivitamiseks koorma all.

Reostaadi lülitamine rootori ahelasse mitte ainult ei vähenda käivitusvoolu tugevust soovitud suuruseni, vaid ühtlasi suurendab mootori käivitusmomenti.

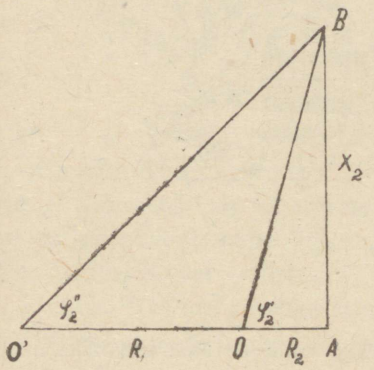


Joon. 209.

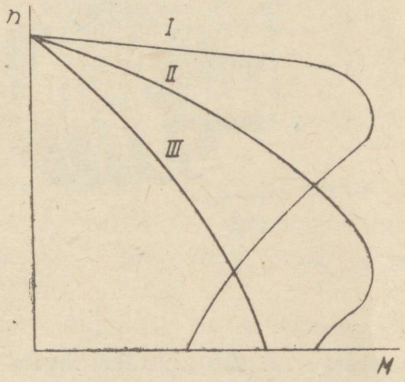
Faasimähisega rootori ahelasse, mis on varustatud kolme kontaktrõngaga ja harjadega, lülitatakse käiviti, nagu on näidatud joonisel 209. Kolm käiviti liikuvat kontakti on seotud käepidemega ja libisevad kinnistel sektsioonide kontaktidel lühistades kolm kontakti korraga.

Nägime, et kõrge voolusageduse tõttu rootoris käivitamisel tekib selles suur faaside nihe ja pöördmoment, mis on võrdeline $\cos \varphi_2$-ga, ei ole suur.

Sisse viies käivitusajaks rootori ahelasse reostaadi, s. o. aktiivse takistuse, vähendame faaside nihet ja suurendame cos φ_2, suurendades ühtlasi käivitusmomenti. Joonisel 210 on näidatud rootori ühe faasi takistuse kolmnurgad ilma käivitita ($\triangle OAB$) ja sisselülitatud käivitiga ($\triangle O'AB$). Aktiivtakistus suurenes sisselülitatud reostaadi tõttu, reaktiivne takistus arusaadavalt ei ole muutunud, faaside nihkenurk φ_2 vähenes, cos φ_2 vastavalt suurenes ja käivitusmoment kasvas vaatamata käivitusvoolu kahanemisele. Joonisel 211 on kujutatud kolm mootori karakteristikut: *I* — reostaadita, *II* ja *III* — reostaadiga rootori ahelas. Käivitusmoment teisel juhul on suurem kui esimesel, kuid käivitusreostaadi takistuse liigsel suurendamisel käivitusmoment väheneb uuesti (kõver *III*), kuna voolutugevuse vähenemise mõju muutub efektiivsemaks cos φ_2 suurenemise mõjust.



Joon. 210.



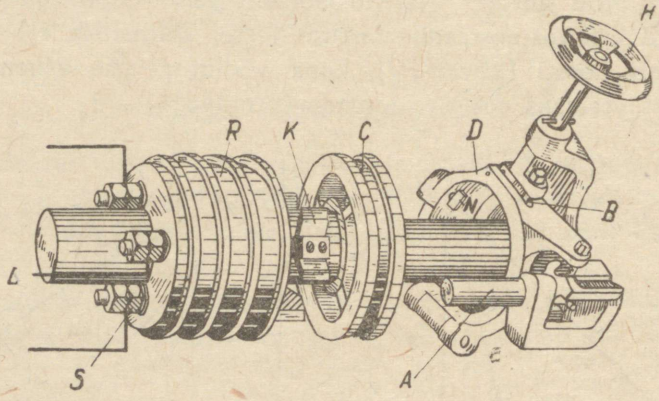
Joon. 211.

Harjade ja kontaktrõngaste kulumise vähendamiseks ja harjade ning kontaktrõngaste üleminekukadude piiramiseks mootori rootor sageli varustatakse seadmega, mis võimaldab pärast rootori kontaktrõngaste lühistamist tõsta harjad.

Joonisel 212 on kujutatud selline seade lahtimonteeritult. Käsiratta *H* pööramisel varb *B* nihutab rõngast *D* vasakule. Selle rõnga nukid *N*, mis kokkumonteeritud seadmel asuvad lühistusrõnga *C* soones, paigutavad rõnga *C* vasakule. Rõngas nihkub kontaktidele *K* ja lühistab neid. Kontaktid *K* on ühendatud poltidega *S*, milledele on juurde toodud rootorimähise otsad *L*. Igaüks neist poltidest on ühendatud ühega kolmest kontaktrõngast *R*. Tihvt *A*, mis on nihutatav sama käsirattaga *H*, tõstab harjasid. Arusaadavalt võib kontaktrõngaid lühistada ainult pärast seda, kui käiviti käsikang on käivitamisprotsessis viidud viimase lühistava kontaktini.

Mootori peatamisel seade peab olema viidud käivitusseisu, s. o. harjad peavad olema alla lastud kontaktrõngastele, mis taastab rootori ühenduse käivitiga, ja kontaktrõngad peavad olema lahutatud omavahelisest lühisest.

Vaatamata sellele, et reostaat rootori ahelas märgatavalt parandab mootori käivitusomadusi, vähendades voolutõuget ja suurendades pöördmomenti, on viimasel ajal märgata ikka enam püüet piirata nende mootorite kasutamist praktikas, asendades neid lühisrootoritega mootoritega.



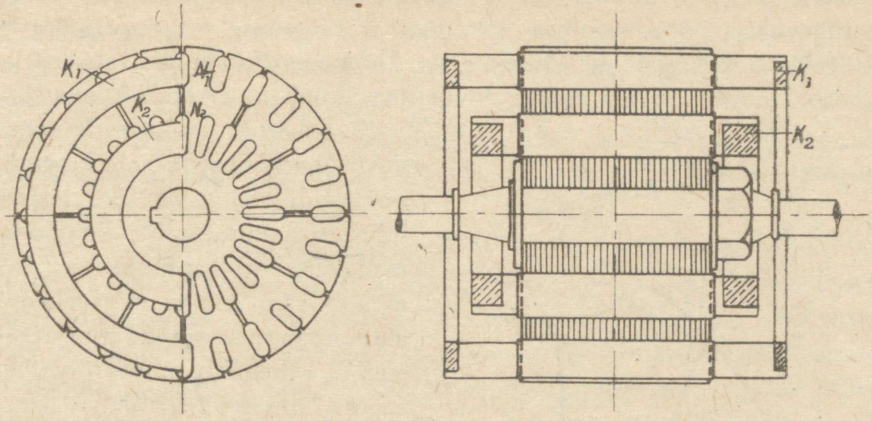
Joon. 212.

Seletatav on see kontaktrõngaid ja käivitit omava faasirootoriga mootorite kõrgema hinnaga, võrreldes samavõimeliste lühisrootoriga mootoritega. Ka on nad vähem otstarbekohased ekspluatatsioonis, kuna nõuavad harjade ja kontaktrõngaste hooldamist, samal ajal kui lühistatud mootor, ilma libisevate kontaktideta voolu juurdejuhtimiseks pöörlevatele osadele, nõuab ainult minimaalset laagrite hooldamist. Lõpuks faasirootoriga mootorid veidi suurema õhupilu tõttu nõuavad suuremat reaktiivset magnetiseerimise voolu, mis suurendab faasinihet, vähendades mootori võimsustegurit ja suurendades energia kadusid. Selle tagajärjel lühistatud rootoriga mootori kasutegur on veidi parem.

92. Eritüübilised asünkroonmootorid.

Lühistatud rootoriga mootorite käivitusomaduste parandamise püüe on viinud mootorite mitmesuguste eritüüpide tekkimisele. Viimastest me tutvume ainult Boucherot' ja sügavuuretega mootoritega, mis on kõige enam levinud ja mida toodetakse meie tööstustes.

Boucherot' süsteemi mootoritel on harilik staator, rootor aga on varustatud kahe iseseisva lühistatud mähisega (joon. 213). Esimese mähise vardad on sängitatud uuretesse N_1 rootori pinnal ja lühistatud kahe rõngaga



Joon. 213.

K_1 rootori lauppindadel. Teise mähise vardad N_2 sängitatakse sügavalt rootori keres asuvatesse uuretesse. Need vardad on samuti lühistatud rootori lauppindadel kahe lühistusrõngaga K_2. See mähis omab normaalset arvutatud aktiivset takistust.

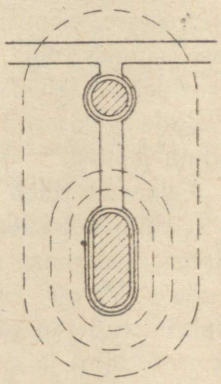
Joonisel 214 on näidatud magnetiliste jõujoonte jaotus rootori uuretesse sängitatud varraste ümber. Sisemistesse uuretesse sängitatud varraste ümber sulgub palju enam jõujooni kui välisvarraste ümber. Seepärast omab sisemine mähis palju kõrgemat omainduktsiooni tegurit.

Reaktiivne takistus on võrdeline omainduktsiooni teguriga ja sagedusega, mis omakorda oleneb libistusest

$$x_2 = 2 \cdot \pi \cdot f_2 \cdot I_2 ,$$

kus

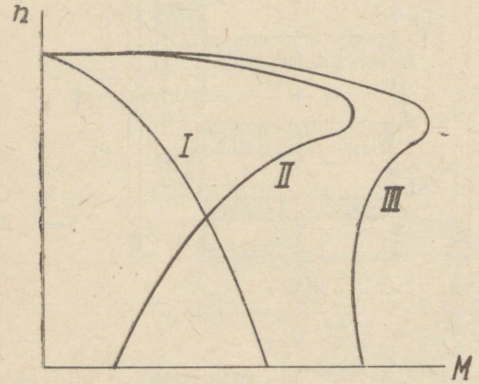
$$f_2 = s \cdot f .$$



Joon. 214.

Suure voolusageduse tõttu rootoris käivitamisel sisemise mähise reaktiivne takistus on väga suur ja selle kaudu voolab tähtsusetult väike voolutugevus. Töötab peaasjalikult välismähis, mille reaktiivne takistus ei ole suur. Kuid see mähis on ehitatud võrdlemisi suure aktiivse takistusega, mille tagajärjel mootor võtab võrgust väiksemat voolu ja käivitusmoment on kaunis suur. Seega tekitab käivitusprotsessis pöördmomenti välismähis (kõver I joonisel 215), mistõttu seda mähist nimetatakse käivitusmähiseks.

Pöörete arvu suurenemisel rootori voolusagedus väheneb, koos sellega väheneb sisemise mähise reaktiivne takistus, ja vooluga selles mähises tekitatav pöördmoment (kõver *II* joonisel 215) kasvab. Samaaegselt koos indutseeritud EMJ vähenemisega vähenevad ka välismähisega tekitatud voolutugevus ja pöördmoment. Normaalsel töötamisel mootori pöördmomenti tekitab peaasjalikult sisemine nn. töömähis (kõver *III* joonisel 215). Boucherot' mootoreid ehitatakse võimsusega kuni mitu tuhat kilovatti.

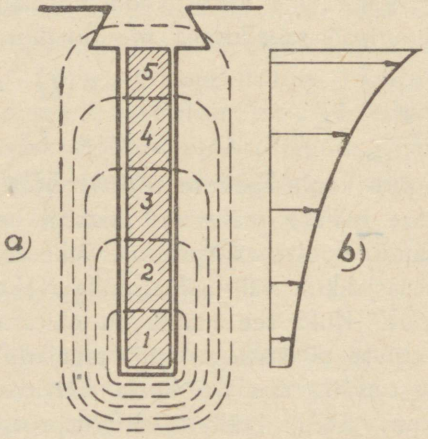


Joon. 215.

Boucherot' mootorid omavad veidi madalamat võimsustegurit ja on veidi kallimad normaalsetest lühistatud mootoreist, kuid odavamad faasirootoriga mootoreist. Töömähise sängitamine sügavale rauda suurendab rootori induktiivset takistust ja vähendab mootori võimsustegurit, mis on 2—3% madalam kui normaalsetel lühistatud mootoritel. Samal põhimõttel töötavad Boucherot' mootoritest lihtsama konstruktsiooniga sügavuuretega mootorid. Normaalsetest lühistatud mootoreist need erinevad rootori uurete kujuga.

Joonisel 216-*a* on näidatud üks rootori uure sellesse sängitatud rootori mähise vardaga. Kõik rootori vardad on lühistatud lühistusrõngastega. Nagu näha jooniselt, mähise vardad on kitsa ja kõrge ristlõikega ning sängitatud sügavatesse uuretesse. Uurded on lahtised. Jaotame mõttes varda üksikutesse elementidesse selle kõrguse suunas ning vaatleme üksikutes varda elementides valitsevate voolude tekitatud magnetiliste jõujoonte jaotust.

Eelnevalt tuleb märkida, et iga jõujoon valib võimalikult väiksema takistusega teekonna, eelistades seepärast rauda. Varras on kolmest küljest ümbritsetud rauaga; neljandast küljest on uure lahti ja siin jõujoontel tuleb paratamatult läbida õhku. Seepärast jõujoon, mis aheldab ükskõik missuguses varda elemendis liikuvat voolu, all ja külgedel aheldab varrast püsides rauas,



Joon. 216.

kuid ülalt lõikab varrast kõige lühema teekonnaga läbides õhku. Tulemusena saame jõujoonte jaotuse, nagu see on näidatud joonisel 216-*a*. Varda üksikud elemendid on aheldatud erineva jõujoonte arvuga. Suurima jõujoonte arvuga on aheldatud kõige sügavam varda element ja samal ajal rootori välispinnal asuv varda element on aheldatud minimaalse jõujoonte arvuga. Selle tagajärjel üksikute elementide omainduktsiooni tegurid ja järelikult ka reaktiivsed takistused on erinevad.

Suurim reaktiivne takistus on sügavale sängitatud varda elementidel, mis on aheldatud suurema jõujoonte arvuga. Rootori välispinna poole varda reaktiivne takistus väheneb.

Erinevus varda üksikute elementide takistuses põhjustab samasuguse erinevuse ka voolutiheduses piki varda kõrgust, kuna voolutugevused varda üksikutes elementides on pöördvõrdelised vastavate elementide takistustega. Joonisel 216-*b* on näidatud voolu jaotus varda kõrguses. Maksimaalne voolu tihedus valitseb seega rootori välispinnal, väiksem — uurde põhjas.

Vool surutakse välja rootori välispinnale ja kogu varda ristlõige uurde sügavuses jääb ära kasutamata.

Varda kasulik voolukandev osa just nagu väheneb, mis on samaväärne varda aktiivse takistuse suurenemisega. Arusaadavalt esineb nimetatud nähe eriti teravalt maksimaalse voolusageduse puhul rootoris, s. o. käivitamisel, kuna reaktiivne takistus on võrdeline sagedusega. Seega mootori käivitamisel vool läbib peamiselt ülemisi elemente rootori mähise vardas, mille tagajärjel varraste aktiivne takistus käivitamisel on suur; see vähendab käivitusvoolu tugevust ja suurendab pöördmomenti. Pöörete arvu lähenemisega normaalsele reaktiivne takistus väheneb (sageduse vähenemise tulemusena), vool jaguneb peaaegu ühtlaselt üle kogu varda ristlõike, selle aktiivne takistus väheneb ja mootor töötab kui normaalne lühistatud mootor (väikeste kadudega rootoris).

Sügavuuretega mootorid omavad veidi suuremat rootori reaktiivset takistust ja seega väiksemat võimsustegurit kui normaalsed mootorid.

93. Pöörete arvu reguleerimine.

Asünkroonmootori pöörete arvu määratakse valemiga:

$$n = (1-s) \cdot \frac{60 \cdot f}{p}.$$

Seega pöörete arvu muutumine on sõltuv järgmise kolme suuruse muutumisest: staatori voolusagedus, keerdvälja pooluste arv ja libistus.

Kuna tavaliselt mootor lülitatakse suurt arvu mitmesuguseid seadmeid toitvasse üldisse võrku, siis mootorit toitva voolu sageduse muutmine ei ole võimalik. Jääb järele kahe ülejäänud suuruse muutmise võimalus.

Lihtsaimaks pöörete arvu reguleerimiseks selle vähendamise suunas on takistuse lülitamine rootori ahelasse vastavalt joonisel 209 toodud skeemile.

Mootori püsiva, mingi kindla pöördmomendi väärtusele vastava koormuse puhul on pöörete arv seda madalam, mida suurem on rootori ahelasse lülitatud takistus.

Joonisel 211 kujutatud pöörete arvude kõverad, sõltuvalt mitmesugustest takistustest rootori ahelas näitavad, et pöörete arvude muutus ei ole ühesugune erinevatel momentidel, s. o. mootori erinevatel koormustel. Reguleerimispiirid on laiemad suurematel koormustel kui madalamatel, mis on selle reguleerimisviisi suureks puuduseks.

Lisatakistuse lülitamine suurendab soojuskadusid rootori ahelas ja seega alandab tunduvalt mootori kasutegurit, mis väheneb protsentuaalselt peaaegu samavõrra, kui väheneb pöörete arv. Need lisakaod eralduvad soojusena sisselülitatud reostaadi takistuses. Seepärast traattakistustega käivitid, mis on arvutatud lühiajalisele koormusele, ei kõlba pöörete arvu reguleerimiseks. Kestva rootorivooluga koormamisel nad võivad läbi põleda. Reguleerimistakistused peavad olema arvutatud palju väiksemale voolutihedusele ja on seepärast palju raskemad ja kallimad. Mainitud puuduste tõttu asünkroonmootori pöörete arvu reguleerimist reostaadiga rootori ahelas kasutatakse võrdlemisi harva (peaasjalikult kraanaseadmetes).

Viimane eelmainitud pöörete arvu reguleerimisviisidest toimub staatori mähise ümberlülitamise teel erinevatele pooluste arvudele. Arusaadavalt selline pöörete reguleerimise viis võib anda ainult astmelist kiiruse reguleerimist, kuna pooluste paaride arv on alati täisarvuline. Magnetvoo pöörete arvu valemist

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p}$$

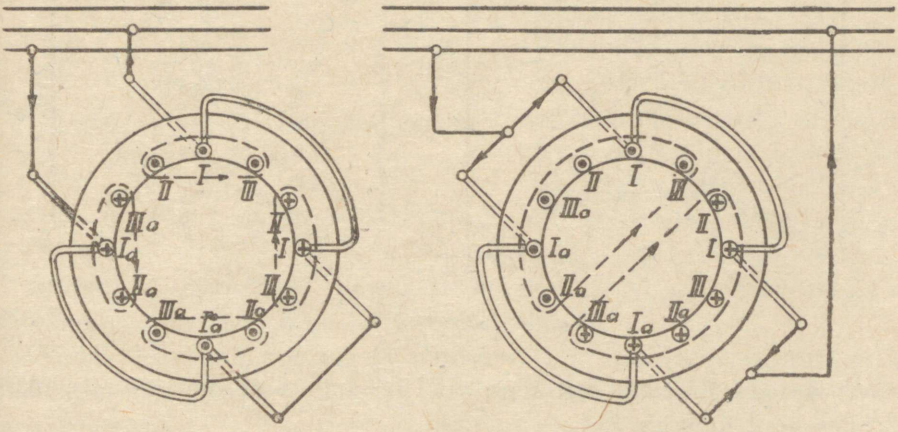
järgneb, et võrgusageduse puhul $f = 50$ Hz on võimalik saada ainult järgmisi magnetvoo pöörete arvusid: 3000, 1500, 1000, 750, 600, 500 jne. Rootori pöörete arvud erinevad neist mõne protsendi võrra.

Nii näiteks mootor pooluste paaride arvuga $p = 4$ teeb ligi 750 pööret min. ja pärast ümberlülitamist pooluste paaride arvule $p = 2$ pöörete arv on ligikaudu 1500 pööret/min.

Keerdvälja pooluste paaride arvu muutmist saavutatakse staatori mähise katsade ümberlülitamise teel. Joonisel 217-*a* ja *b* on kujutatud lõikes staatori mähis kahe katsaga faasi kohta. Igaühel kuuest katsast peavad olema

väljavõtted mootori klemmidelauale, et oleks võimalik katsade ümberlülitamine.

Skeemi selguse säilitamiseks joonisel on näidatud ainult esimese faasi katsade ühendused. Kahe teise faasi katsad on märgitud numbritega Joonisel 217-*a* iga faasi kaks katsat on lülitatud järjestikku.



Joon. 217.

Voolude jaotus üksikutes juhtmetes on näidatud joonisel punktidega ja ristidega. Juhtmete ümber tekkiva magnetvälja jõujooned moodustavad staatoris neli poolust.

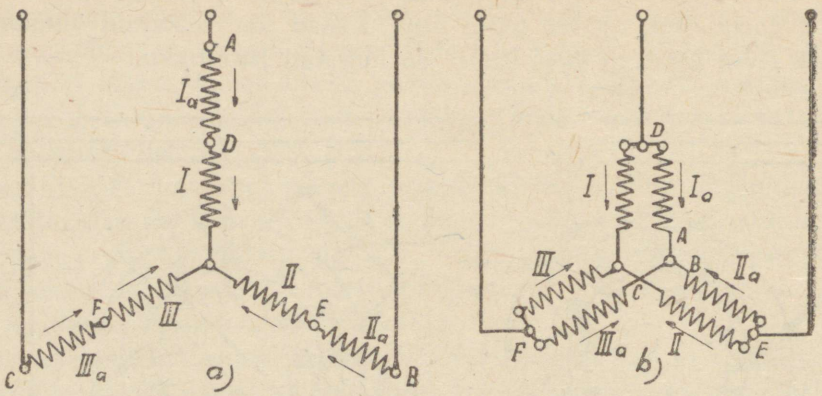
Joonisel 217-*b* iga faasi mõlemad katsad on lülitatud omavahel paralleelselt. Jälgides voolude jaotust, näeme, et nüüd voolu suund ühes katsas on muutunud vastupidiseks, samal ajal kui teises on see jäänud endiseks. Sama nähtus esineb pärast ümberlülimist ka kõikide teiste faaside katsades. Joonisel 217-*b* voolusuund märgiga a tähistatud katsades on muutunud vastupidiseks. Nüüd jõujooned juhtmete ümber moodustavad staatoris ainult kaks poolust.

Sel juhul rootori mähis teostatakse lühismähisena, kuna faasirootorit tuleks ümber lülitada üheaegselt staatori mähise ümberlülitamisega, mis äärmiselt raskendaks konstruktsiooni.

Joonisel 218 on näidatud staatori kõikide katsade ümberlülitamise skeem. Skeem a annab igas faasis katsade järjestikku-lülituse tähena lülitatud faasidega. Võrgujuhtmed ühendatakse punktidega *A*, *B* ja *C*.

Pärast ümberlülimist skeem omandab joonisel 218-*b* näidatud kuju. Võrgujuhtmed ühendatakse punktidesse *D*, *E* ja *F*. Mähise punktid *A*, *B*

ja *C* ühendatakse kokku, moodustades teise tähe nullpunkti. Mähised on lülitatud kahe paralleelselt ühendatud tähega.

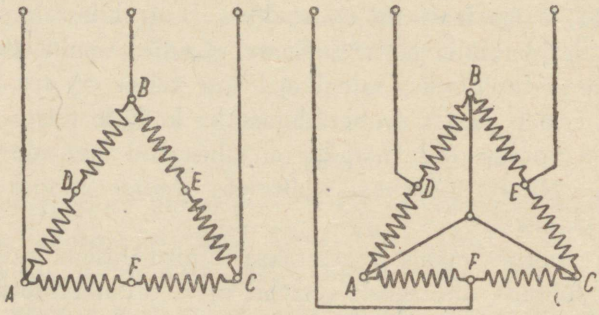


Joon. 218.

Märgiga *a* tähistatud katsades vool on muutnud oma suunda, märgita katsades vool jookseb endises suunas.

Esimene skeem vastab suuremale pooluste paaride ning järelikult väiksemale pöörete arvule.

Sagedamini kasutatakse ümberlülitamist Dalander'i skeemi järgi. Selle, joonisel 219 näidatud skeemi järgi staator lülitatakse ümber kolmnurgast (madalam pöörete arv) kahte paralleeltähte (kõrgem pöörete arv).

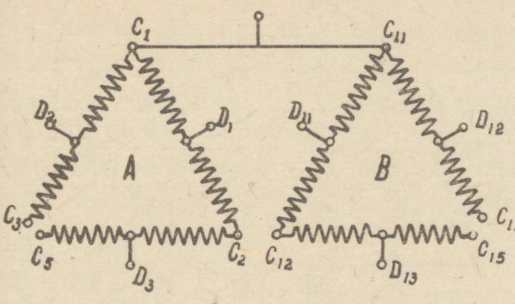


Joon. 219.

Tavaliselt kasutatavad kahe kiirusastmega mootorid omavad sünkroonpöördeid 1500 ja 750, harvem esinevad 3000—1500 ja 1000—500 pööret/min.

Ikka enam leiavad kasutamist mootorid kolme ja nelja kiiruse astmega. Neil mootoritel on staatoril kaks eri mähist, kusjuures nelja kiirusastmega

mootoril igaühte neist mähistest võib lülitada kahele kiirusele. Joonisel 220 on kujutatud nelja kiirusastmega mootori staatori mähise skeem.



Joon. 220.

Mähis *A* on ehitatud suuremale ja *B* väiksemale pooluste arvule. Mõlemad mähised on valmistatud lahtistena, kuna ühe mähise võrku lülitamisel keerdväli indutseerib ka teises mähises EMJ, milletõttu suletud mähises tekiksid seda mähist soojendavad voolud. Igaühte mõlemast mähisest on võimalik lülitada Dalander'i skeemi järgi kolmnurka või kaksiktähte.

Mitme kiirusastmega mootoreid kasutatakse praegu võrdlemisi tihti, näiteks metallide töötlemise masinate käitamiseks.

Ümberlülitatavate poolustega mootorid on veidi keerulisemad ja kallimad normaalmootoritest, omavad veidi väiksemat kasutegurit ja võimsustegurit.

Kokku võttes näeme, et keerdvoolu asünkroonmootorid pöörete reguleerimise suhtes jäävad maha alalisvoolumootoritest.

94. Reverseerimine.

Mootori rootori pöörlemissuund ühtub alati keerdvälja pöörlemissuunaga. Seepärast rootori pöörlemissuuna muutmiseks on vaja muuta magnetvoo pöörlemissuunda. Seda saavutatakse ükskõik missuguse kahe võrgujuhtme ümberlülimisega mootori klemmidelaual.

Joonisel 221 on näidatud asünkroonmootori võrku lülitamise skeem kolmepooluselise reverseeritava ümberlülitiga.

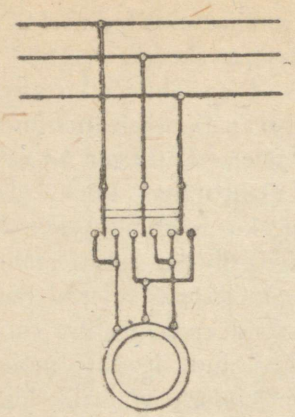
95. Võimsustegur.

Asünkroonmootorid tarvitavad võrgust voolu, mis jääb faasis maha võrgu pingest. Nende mootorite võimsustegur on alati väiksem ühest. Eespool oli põhjalikult selgitatud halva cos φ kahjulikku mõju elektrivõrgule.

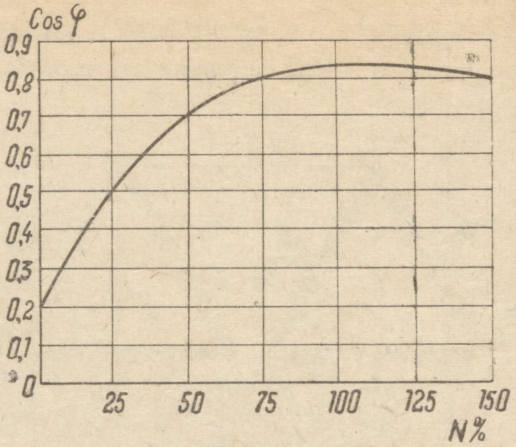
Eriti tugevat võimsusteguri halvenemist on märgata alakoormustel.

Joonisel 222 on näidatud cos φ kõver sõltuvuses koormusest. Tugevatel alakoormustel, nagu selgub diagrammist, on cos φ väga väike.

Seepärast on väga tähtis asünkroonmootori õige võimsuse valik. Peab püüdma mootoreid alati täielikult koormata.



Joon. 221.



Joon. 222.

Puudulikult koormatud asünkroonmootori võimsusteguri paranemist võib saavutada normaalselt kolmnurka lülitatud staatori mähise tähte ümberlülitamise teel.

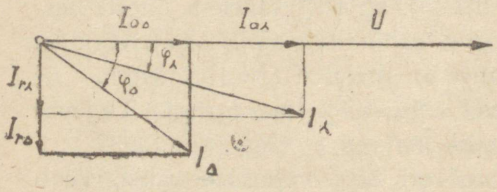
Seejuures pinge staatori faasil väheneb $\sqrt{3}$ korda. Kuna võimsus muutumatu koormuse puhul peab jääma samaks, siis samapaljukordselt peab kasvama aktiivne voolutugevus, s. o,

$$I_{aY} = \sqrt{3} \cdot I_{a\triangle}.$$

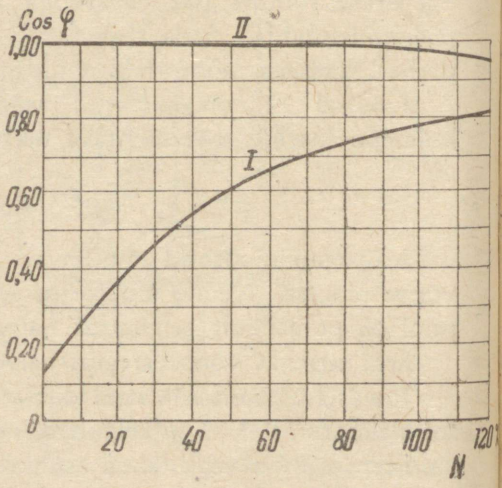
Reaktiivset voolutugevust võib lugeda võrdeliseks staatori faasipingega. Kuna tähte ümberlülimisel see pinge väheneb $\sqrt{3}$ korda, siis samavõrra väheneb ka reaktiivne voolutugevus, s. o.

$$I_{rY} = \frac{1}{\sqrt{3}} I_{r\triangle}.$$

Joonisel 223 on näidatud tähte ja kolmnurka lülitatud mootori aktiivne, reaktiivne ja näivvool.



Joon. 223.



Joon. 224.

Täielikult on võimalik kompenseerida faasinihet võrgus lülitades töötava mootoriga paralleelselt kondensaatoreid, nagu seda vaatlesime p. 39 all.

Joonisel 224 on toodud asünkroonmootori võimsusteguri kõverad kondensaatoriga ja kondensaatorita mootoritele, sõltuvalt mootori koormusest. Võimsate mootorite $\cos \varphi$ parandamiseks mõnikord kasutatakse erimasinaid, mis toidavad mootorit reaktiivvõimsusega ja seega vabastavad võrku reaktiivsest koormusest. Need on nn. faaside kompensaatorid, mida käesolevas kursuses ei vaadelda, kuna neid kasutatakse äärmiselt harva.

XX peatükk.

SÜNKROONMOOTORID.

96. Töötamise põhimõte.

Nagu nägime käesoleva osa alguses, sünkroonmootor erineb asünkroonmootorist rootori ehituse poolest. Sünkroonmootori rootoriks on elektromagnetiline süsteem, mille pooluste arv on võrdne staatori mähise keerdvälja pooluste arvuga.

Sünkroonmasina ehitust on põhjalikult vaadeldud *X* peatükis, kus tutvusime selle masina töötamisega elektrienergia generaatorina.

Sünkroonmootor kujutab endast samasugust masinat. Seepärast käesolevas peatükis ei vaatle me sünkroonmootori ehitust; tuletame vaid meelde, et selle masina staator on täiesti analoogiline asünkroonmootori staatoriga, rootor aga valmistatakse rattana nähtavate või peidetud elektromagnetiliste poolustega, millede mähised on ühendatud kahe rootori võllil asuva kontaktrõngaga. Nende rõngaste kaudu mähisesse suunatakse alalisvoolu, harilikult rootoriga samal võllil asuvast alalisvoolugeneraatorist, nn. ergutajast.

Staatori lülitamisel keerdvooluvõrku tekib keerdväli, mille staatori pinnal libisevad poolused haaravad kaasa rootori pooluseid; viimased alustavad pöörlemist keerdvälja pöörlemise suunas.

Rootori magnetvoog lõikab pöörlemisel staatori juhtmeid ning ergutab neis EMJ. See EMJ on nihutatud faasis võrgupinge suhtes peaaegu poole perioodi (180°) võrra ja seega töötab enamuses võrgupingele vastu. Sünkroonmootoris see EMJ on analoogiline alalisvoolu mootorite vastu-EMJ-ga.

Kuid voolutugevuse ja koos sellega pöördmomendi muutused sünkroonmootorites ei sõltu sellest vastu-EMJ-st, mis oleneb rootori pöörete

arvust ja on sünkroonmootoritel rangelt püsiv, vaid selle vastu-EMJ ja staatorile rakendatud pinge vahelisest faaside nihkenurgast.

Staatorisse võrgust suunduv voolutugevus oleneb nii staatorile rakendatud pingest u, kui ka staatori mähises indutseeritud elektromotoorsest jõust e. Vabaltvalitud ajamomendil voolutugevus staatori faasis on

$$i_1 = \frac{u+e}{z}.$$

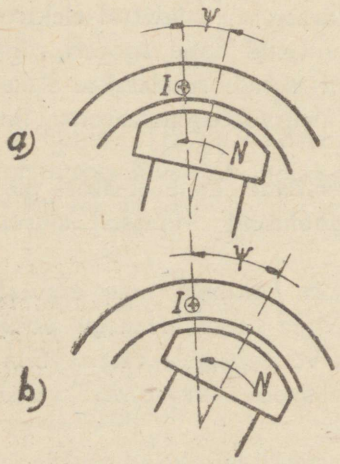
Siin lugejas seisab pinge ja EMJ algebraline summa ning nimetajas staatori mähise faasi näivtakistus. Kui, nagu see tõesti esineb suuremal osal perioodist, EMJ on suunatud pingele vastu, siis algebraline summa muutub aritmeetiliseks vaheks ja lugeja väärtus muutub väikeseks.

Seda võib näitlikult selgitada efektiivväärtuste vektordiagrammi varal. Üleminekul efektiivväärtustele tuleb algebraline summa asendada geomeetrilise summaga, millega eelmine avaldis omandab kuju:

$$I_1 = \frac{\bar{U}+\bar{E}}{z}.$$

Joonisel 225-a ja b on kujutatud kaks rootori asendit pinge maksimumi momendil esimeses faasis.

Joonis 225-a vastab mootori tühijooksule. Rootori pooluse keskkoht asub peaaegu selle mähise faasi juhtme all, milles valitseb antud momendil pinge maksimum. Joonisel 226-a on antud selle juhuse jaoks esimese faasi vektordiagramm. Rootori poolt indutseeritav EMJ saavutab faasis I maksimumi pooluse keskpunkti möödumisel selle faasi juhtmest.



Joon. 225.

Lihtne on määrata, rakendades parema käe reeglit, et selle EMJ suund on vastupidine võrgu pingele, mis langeb ühte joonisel 225-a ristiga-märgitud voolu suunaga.

Vaadeldaval momendil poolus ei ole jõudnud selle asendini ja vastavalt EMJ vektor E joonisel 226-a jääb maha sama nurga ψ võrra vektori U vastasasendist.

EMJ suurus oleneb rootori magnetvoost Φ ja on vabalt valitav vastava voolutugevuse valikuga ergutusmähises. Oletame, et antud juhul $E = U$. Voolutugevus staatori mähises on võrdeline suuruste E ja U geomeetrilise summaga.

Nagu näeme, U ja E suure faasinihke tõttu on see suurus väike.

Märgime saadud summa ΔU-ga:

$$\Delta \bar{U} = \bar{U} + \bar{E};$$

siis

$$I = \frac{\Delta U}{z}.$$

Kuna staatori mähise aktiivne takistus on väga väike, võrreldes ta reaktiivse takistusega, siis võime kirjutada, kui jätame aktiivse takistuse tähele panemata:

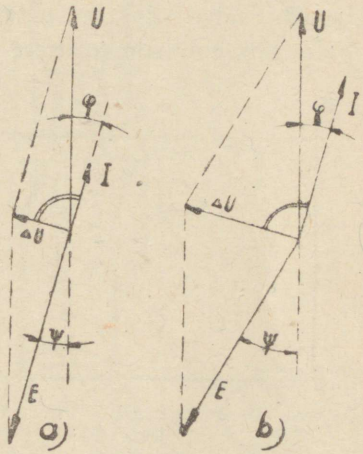
$$I = \frac{\Delta U}{x}.$$

Voolu I võib sealjuures lugeda faasis mahajäävaks teda tekitavast pingest ΔU veerandperioodi võrra.

Joonisel 226-a see vool on toodud vektorina I, mis jääb maha vektorist ΔU 90° võrra. Kuna ΔU väärtus on väike, siis ka see vool ei ole suur ning selle voolu ja rootori magnetvoo koosmõjul tekitatav pöördmoment on samuti väike, mis vastab väiksele takistusmomendile mootori tühijooksul.

Kui nüüd koormata mootorit, siis takistusmomendi suurenemine kutsub esile rootori püüde vähendada pöörlemiskiirust.

Rootor jääb veidi maha ja pinge maksimumi momendil esimeses faasis võtab joonisel 225-*b* kujutatud asendi.



Joon. 226.

On selge, et nüüd faasidenihe võrgupinge ja vastu-EMJ vahel suureneb, mis avaldub vektordiagrammis vektorite U ja E vahelise nurga ψ suurenemisega (joon. 226-b).

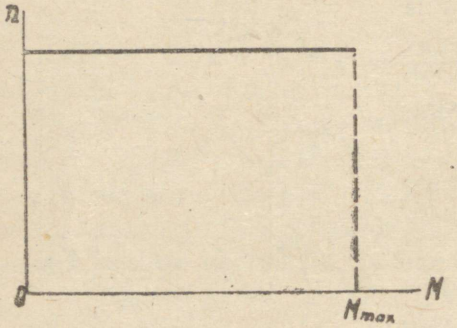
Nagu diagrammist selgub, nihkenurga ψ suurenemine toob kaasa vektori ΔU suurenemise ja sellega võrdelise voolutugevuse I kasvu. Pöördmoment kasvab, tasakaalustab suurenenud takistusmomenti ning rootor, olles pöördunud tühijooksu-seisuga võrreldes teatava väikese nurga võrra mahajäämise suunas, jookseb edasi endise pöörete arvuga. Seega näeme, et vastupidi alalisvoolu- ja asünkroonmootoritele, kus voolutugevuse ja pöördmomendi muutused on alati seotud indutseeritud EMJ suuruse, s. o. pöörete arvu muutusega, sünkroonmootorites voolutugevuse ja pöördmomendi muutused on ühenduses võrgupinge ja indutseeritud EMJ vahelise nihke-

nurga suurusega. Sealjuures selle nihkenurga muutused kutsub esile teatav rootori nihe staatori magnetvoo suhtes. Rootori pöörete arv ei muutu.

Koormuse suurendamisel ja sellest tingitud rootori nihkumisel kasvab faasinurk φ pinge ja voolu vahel. Mootori poolt võrgust võetav võimsus on

$$N = 3\,U \cdot I \cdot \cos\varphi\,, \qquad (86)$$

kus U ja I on vastavad pinge ja voolu faasiväärtused. Koormuse kasvades ja koos sellega nurga ψ suurenedes kasvab ka voolutugevus I ning väheneb $\cos\varphi$. Teatud nurga φ väärtuse juures avaldis (86) ja koos sellega pöördmomendi suurus (mida võib küllaldase täpsusega lugeda võrdeliseks võimsusega N, kuna nurkkiirus on püsiv) saavutavad maksimumi. Edasisel koormamisel nurk ψ ja koos sellega vool kasvavad, kuid võimsus ja pöördmoment $\cos\varphi$ vähenemise tagajärjel kahanevad, ning mootor jääb seisma — langeb välja sünkronismist. Kaasaegsetel mootoritel see vääratusmoment pole väiksem kahekordsest nimipöördmomendist.



Joon. 227.

Õeldust selgub sünkroonmootori põhiomadus — püsivate pöörete arvude säilitamine koormuse kõikumise nullist kuni vääratusmomendini.

Pöörete arv olenemata koormusest on alati

$$n = \frac{60 \cdot f}{p}. \qquad (87)$$

Joonisel 227 on toodud mootori kiiruse karakteristik.

Selle mootori pöörete arv on sõltuv toitevoolu sagedusest, ning püsiva võrguvoolu sageduse korral on pöörete arvu muutmine võimatu.

97. Käivitamine.

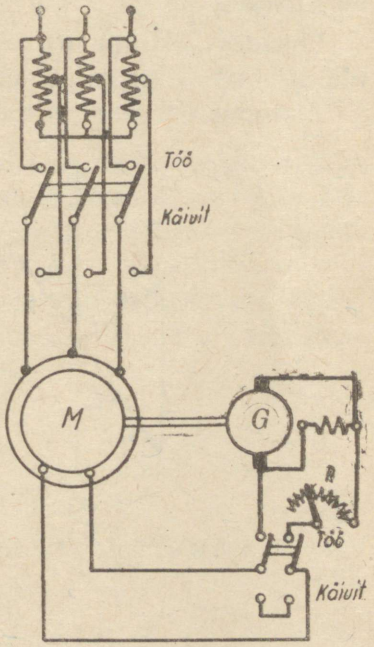
Sünkroonmootorite käivitamine on komplitseeritum teiste mootorite tüüpide käivitamisest.

Kui paigalpüsiva rootoriga mootori staatorisse lülitada vool, siis rootor ei alusta pöörlemist. Vaatleme joonist 225.

Juhtmes on märgitud vool, mis on suunatud vaatleja poolt põhjapooluse möödumisel sellest juhtmest. Rakendades vasaku käe reeglit, leiame, et juhtmele avaldab mõju paremale suunatud elektromagnetiline jõud.

Järelikult aktsiooni ja reaktsiooni põhimõttel pooluse mõjub omakorda jõud, mis on võrdne elektromagnetilise jõuga, kuid suunatud vastupidiselt antud juhul vasakule. Poolperioodi möödudes voolusuund juhtmes muutub aga vastupidiseks. Kui sel momendil juhtme kohal asub endiselt põhjapoolus, siis sellele mõjuv jõud muudab oma suunda ja rootor, taludes vahelduvaid mõlemasuunalisi tõukeid, jääb paigale. Vaja on, et voolu suuna muutumise momendiks staatori juhtmes selle all asuks vastasnimeline poolus. Siis jõu suund jääb endiseks ja rootor hakkab pöörlema.

Selleks on tarvis rootorile käivitamisel anda eelnevalt sünkrooniline kiirus, s. o. kiirus, mis on määratav valemiga (87). Seda on võimalik teha kas erilise väikevõimelise käivitusmootoriga või nn. asünkroonse käivitusega. Viimane käivitusviis teostub järgmiselt: rootori poolustekingadesse valmistatud uuretesse sängitatakse vaskvardad, mis on mõlematel lauppindadel lühistatud kahe rõngaga, analoogiliselt asünkroonmootori lühisrootoriga. Ergutamata mootori staator lülitatakse võrku harilikult transformaatori või autotransformaatori abil alandatud pingele. Rootori mähis lühistatakse. Keerdväli indutseerib poolustekingadesse sängitatud varrastes ja käivitamiseks lühistatud ergutusmähises voolusid analoogiliselt asünkroonmootoriga ja rootor alustab pöörlemist. Kui peaaegu on saavutatud sünkrooniline kiirus, ergutusmähis lahutatakse ja temasse juhitakse alalisvoolu. Seega ergutatakse poolused rootoril ning nende koostöö keerdväljaga tekitab pöördmomendi. See annab rootorile lisakiirenduse, mis tõstab tema kiiruse sünkroonkiiruseni. Joonisel 228 on näidatud sünkroonmootori asünkroonse käivitamise skeem.



Joon. 228.

Käivitus-autotransformaator on ümberlüliti kaudu ühendatud mootori *M* staatoriga. Ümberlüliti alumises asendis mootori staatorile antakse alandatud pinge. Ümberlüliti ülemine — tööseis annab staatorimähisele täie võrgupinge.

Teine ümberlüliti lühistab sünkroonmootori ergutusmähist käivitamisel ja lülib ta ümber ergutajale *G* käivitusprotsessi möödumisel. Reostaat R ergutusahelas võimaldab magnetvoo reguleerimist.

98. Ergutuse mõju võimsustegurile.

Sünkroonmootorite ekspluatatsiooni raskused ja nimelt alalisvoolu vajadus rootori toitmiseks ja raske käivitamine piiravad äärmiselt nende kasutamisvõimalusi.

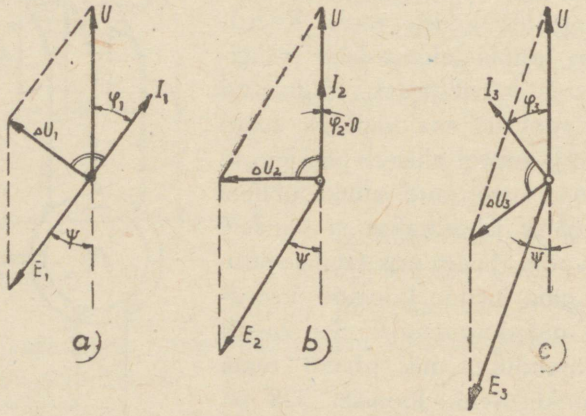
Kuid need mootorid omavad ka üht väärtuslikku omadust: nad võivad töötada faaside nihketa ja võivad isegi parandada faaside nihet võrgus, milles töötavad asünkroonmootorid võimsusteguritega alla ühe.

Et selgitada seda omadust, vaatleme veelkordselt sünkroonmootori vektordiagrammi. Joonisel 229 on näidatud vektordiagrammid staatoris rootori magnetvoost indutseeritud EMJ kolme erijuhu jaoks.

Joonis 229-a vastab nõrgalt ergutatud rootorile. Reostaadi R (joonis 228) takistus on suur. Rootori magnetvoost indutseeritud EMJ E_1 on väiksem võrgupingest U.

Ehitades vektorid $\Delta U_1 = U_1 + E_1$ ja I_1 90° mahajääva nurga all vektorile ΔU_1 näeme, et antud juhul vool jääb võrgupingest maha.

Alaergutatud mootor töötab mahajääva vooluga. Suurendame rootori



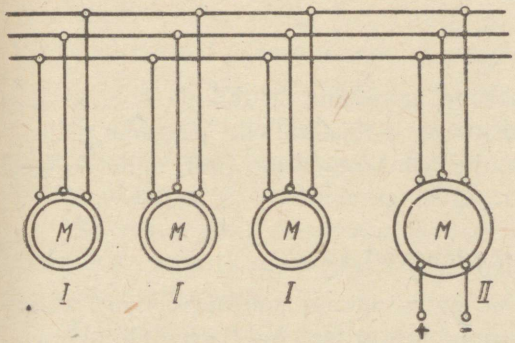
Joon. 229.

ergutust, vähendades reostaadi R takistust (joonis 229-b). Teatava E_2 väärtuse puhul vektor ΔU_2 muutub perpendikulaarseks vektorile U ning vooluvektor I_2 ühtub pingevektoriga U. Normaalergutusega mootor töötab faaside nihketa.

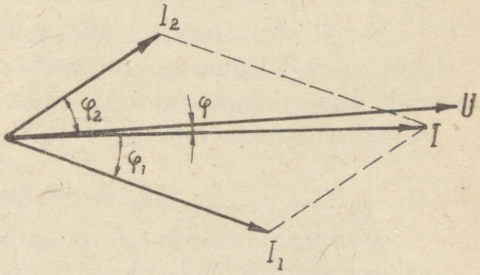
Kui veelgi suurendada ergutusvoolu ja seega mähises indutseeritud EMJ-du, siis saame, nagu näidatud joonisel 229-*c*, pingest ette tõttava voolu.

Üleergutatud mootor töötab ettetõttava vooluga. Seda omadust võib kasutada faaside kompenseerimiseks võrgus.

Oletame, et võrku on lülitatud mitu paralleelselt töötavat asünkroonmootorit *I* ning üks küllalt võimas sünkroonmootor *II* (joon. 230). Selle juhuse voolude diagramm on kujutatud joonisel 231. Siin vool I_1 on kõikide asünkroonmootorite ühine vool, mis jääb maha võrgupingest *U*. Vool



Joon. 230.



Joon. 231.

I_2 on sünkroonmootori vool ja vool *I* — võrgu koguvool. Õigesti valides ergutust võib saavutada sellist ettetõttenurka φ_2 sünkroonmootoril, et faaside nihkenurk võrgus φ muutub võrdseks nulliga ja võrguvool *I* omandab minimaalse võimaliku väärtuse.

Tänu sellele sünkroonmootori omadusele neid kasutatakse (eriti laialdaselt Ameerikas) eriti võimsates ja kestvalttöötavates ajamites, vaatamata nende muudele ekspluatatsioonilistele puudustele.

XXI peatükk.

KAOD MOOTORITES JA KASUTEGURI MÄÄRAMINE.

99. Kadude liigitus.

Energia muundamisel mehaanilisest elektrilisse generaatorites ja elektrilisest mehaanilisse mootorites osa muundatavast energiast muutub soojuseks, hajub ning moodustab energiakadusid. Kõikide masinate energiakadusid võib liigitada järgmistesse pearühmadesse:

A. **Kaod masinate mähistes** — neid nimetatakse džaulikadudeks.

Alalisvoolumootorites need oleksid:

a) Kaod ankrumähises.

b) Kaod pooluste mähises.

Vahelduvvoolumootorites need oleksid:

a) Kaod staatori mähises.

b) Kaod rootori mähises.

B. Rauaskaod.

a) Hüstereesikaod raua ümbermagneetimise tagajärjel.

b) Kaod pöörisvooludele.

C. Mehaanilised hõõrdekaod.

Edaspidistes arutustes kõik energiakaod taandame ajaühikule, s. o. käsitleme võimsuskadusid mootorites, kusjuures põhjalikumalt peatume alalisvoolu haruvoolumootoritel ja keerdvoolu asünkroonmootoritel, mida kõige enam kasutatakse tööstuses.

100. Koormusest olenevad kaod.

Koormuse muutumisel muutub ka voolutugevus mootoris ning koos sellega muutuvad džaulikaod. Alalisvoolumootorites vool haruvoolumähises ei olene koormusest ja seepärast kaod selles ergutusmähises me arvame järgmisse rühma, kuhu kuuluvad koormusest mitteolenevad kaod.

Džaulikadude suurus mähises määratakse Joule-Lenz'i seaduse alusel valemiga

$$V_{Cu} = I^2 \cdot R, \tag{88}$$

kus I — voolutugevus ja R — mähise takistus.

Alalisvoolumootoritele see valem omandab järgmise kuju:

$$V_{Cu} = I_a^2 \cdot R_a,$$

kus I_a — voolutugevus ankrus, R_a — ankrutakistus (koos kõikide ankruga järjestikku lülitatud pooluste mähiste takistustega, kui sellised on olemas).

Asünkroonmootoritele valemi kuju oleks:

$$V_{Cu} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_1 + 3 \cdot I_2^2 \cdot R_2. \tag{89}$$

Siin I_2 — voolutugevus staatori faasis, R_1 — staatori ühe faasi mähise takistus, I_2 ja R_2 vastavalt voolutugevuse ja takistuse väärtused rootorimähises.

101. Tühijooksukaod.

Tühijooksukadudeks me nimetame kadusid, mis ei olene koormusest. Siia kuuluvad:

a) Kaod alalisvoolumootori haruvoolu ergutusmähises:

$$V_h = U \cdot I_h, \tag{90}$$

kus U — pinge mootori klemmidel ja I_h — voolutugevus haruvoolu ergutusmähises.

b) Mehaanilised hõõrdekaod laagrites, kollektori või kontaktrõngaste ja

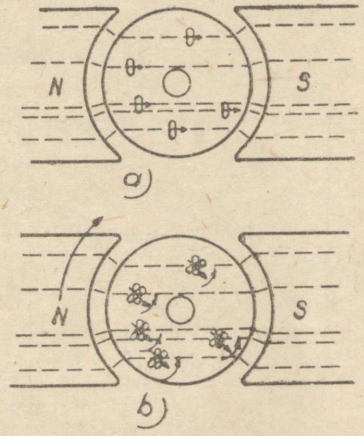
harjade vahel, rootori ja õhu vahel. Need kaod olenevad ainult mootori pöörete arvust ning haruvoolu- ja asünkroonmootoritel väga väikese pöörete arvude kõikumise tõttu koormuse muutumisel neid võib lugeda suuruselt püsivateks.

c) Rauaskaod. Ankru pöörlemisel magnetväljas osa pöörlemisenergiast muundub ankru rauas hüstereesi ja pöörisvoolude tagajärjel soojuseks. Pöörisvooludega oleme tutvunud generaatori ankru konstruktsiooni vaatlemisel. Samad nähted esinevad ka mootori ankrus.

Oli selgitatud samuti, et pöörisvooludest tingitud energia soojuskadude piiramiseks ankur koostatakse lehtterasest paksusega tavaliselt 0,5 mm, kusjuures üksikud lehed isoleeritakse üksteisest.

Hüstereesi nähe on seotud magnetväljas pöörleva ankru ümbermagneetimisega ja seda selgitab joonis 232.

Aatomisüstemide elektronide orbiidid millede teljed püüavad säilitada paigalseisva magnetvälja jõujoonte suunda, pööravad end ankru kere suhtes viimase pöörlemisel. Tulemusena tekib teatav ankru pöörlemist pidurdav jõud, mida tuleb ankrut käitaval mootoril ületada. Selle tungi ületamiseks kuluv energia muundub soojuseks.



Joon. 232.

Rauaskaod V_{Fe} olenevad pöörete arvust n, millest sõltub ümbermagneetimissagedus, ja magnetilisest induktsioonist rauas. Need on omakorda seotud masina EMJ suurusega. Püsiva pöörlemiskiiruse ja püsiva EMJ suuruse puhul on püsiv ka magnetilise induktsiooni väärtus.

Kogu tühijooksukaod on avaldatavad mainitud kadude summana

$$V_o = V_h + V_m + V_{Fe} \quad \text{harumootorile} \tag{91}$$

ja

$$V_o = V_m + V_{Fe} \quad \text{asünkroonmootoritele.} \tag{91-a}$$

Siin V_m — mehaanilised hõõrdekaod.

102. Kasutegur.

Kasutegur on määratav kui masinas arendatava kasuliku võimsuse N ja tarvitatava koguvõimsuse N_1 suhe

$$\eta = \frac{N}{N_1}. \tag{92}$$

Koguvõimsust N_1 võib vaadelda kasuliku võimsuse ja kadude summana

$$N_1 = N + \Sigma V,$$

kus

$$\Sigma V = V_{Cu} + V_0;$$

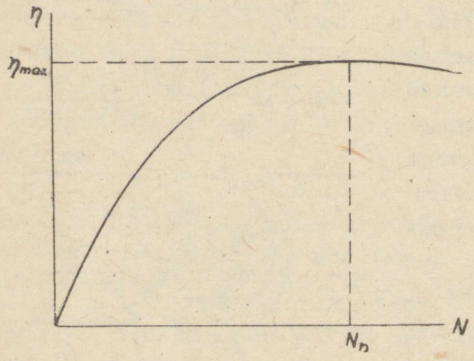
siit

$$\eta = \frac{N}{N + V_{Cu} + V_0}.$$

Tühijooksul $N = 0$, kuna aga V_0 ei ole võrdne nulliga (koormusest mitte olenev suurus). Järelikult tühijooksul

$$\eta = 0.$$

Koormuse kasvades kasvavad murru lugeja ja nimetaja, kuid esimese kasv on kiirem (sest nimetaja sisaldab püsivat suurust V_0), mille tõttu η suureneb.



Joonis 233.

Teataval koormusel η saavutab maksimumi ning pärast seda hakkab vähehaaval vähenema. Kasuteguri vähenemine kõrgematel koormustel tekib voolutugevuse ruudust sõltuvate ja nimetajas esinevate kadude arvel. Madalamatel voolutugevustel nimetatud kadude osatähtsus ei ole suur, kuid suurematel voolutugevustel (suuremate arvude ruudud kasvavad väga kiirelt) kiirelt kasvades nende osatähtsus ületab kõikide teiste kadude mõju. Valemi nimetaja kasvab kiiremini lugejast ning η väheneb. Joonisel 233 on näidatud kasuteguri kõver sõltuvalt kasulikust võimsusest N.

103. Kasuteguri määramine.

Vastavalt valemile (92) kasutegur võrdub:

$$\eta = \frac{N}{N_1}.$$

Kuna

$$N = N_1 - V$$

või

$$N = N_1 - (V_{Cu} + V_0),$$

siis

$$\eta = \frac{N_1 - (V_{Cu} + V_0)}{N_1}. \qquad (93)$$

Mootori poolt võrgust tarvitatav võimsus on alalisvoolumootoritel

$$N_1 = U \cdot I$$

ning määratakse tavaliselt voltmeetri ja ampermeetri näidete korrutamisega. Keerdvoolumootoritel

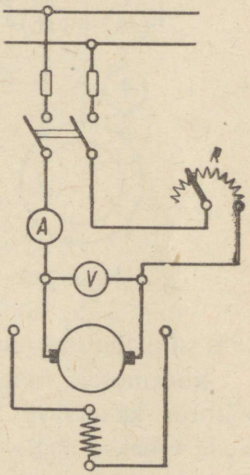
$$N_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

ning määratakse vattmeetriga.

Koormusest olenevaid kadusid V_{Cu} võib määrata mõõtes mähiste takistust mingil tuntud mõõtmisviisil, näiteks voltmeetri ja ampermeetriga, ning siis arvutades neid valemi (88) või (89) abil.

Peab tähendama, et keerdvoolumootoritel on selline kadude määramise viis võimalik ainult faasirootori puhul, sest mainitud viisil ei ole võimalik mõõta lühisrootori takistust.

Alalisvoolumootoritele koostatakse skeem takistuste mõõtmisteks vastavalt joonisele 234, lahutatakse haruvoolu ergutusmähis ning lülitatakse järjestikku ankruga pooluste peavoolumähised, kui sellised on olemas. Siis reostaadiga R seatakse voolutugevus ankrus I_k võimalikult lähemale mootori nimivoolutugevusele. Mõõtes seda voolutugevust ja pingelangust U_k, arvutatakse takistus valemi järgi



Joon. 234.

$$R_a = \frac{U_k}{I_k}.$$

Asünkroonmootoritel on otstarbekohasem määrata džaulikaod lühistuskatsega.

Umbkaudselt võib oletada, et voolutugevus rootoris on võrdeline voolutugevusega staatoris

$$I_2 = C \cdot I_1,$$

kust

$$V_{Cu} = 3\ I_1^2 \cdot R_1 + 3 \cdot C \cdot I_1^2 \cdot R_2,$$

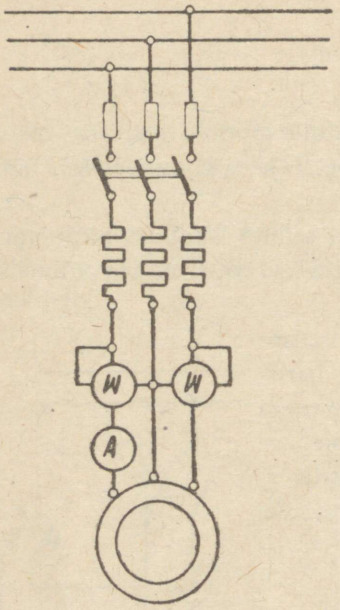
$$V_{Cu} = 3\ (R_1 + C \cdot R_2) \cdot I_1^2.$$

Lugedes ilma suurema veata, et avaldis $3\ (R_1 + C \cdot R_2)$ on püsiv suurus ning tähistades selle C_{Cu} kaudu, võib kirjutada:

$$V_{Cu} = C_{Cu} \cdot I_1^2. \qquad (94)$$

Lühistuskatse abil on võimalik määrata suurus C_{Cu}. Koostatakse skeem vastavalt joonisele 235. Reostaatidega alandatakse staatori pinget, mille-

juures reostaatide takistused valitakse nii, et staatori voolutugevus paigalseisva rootoriga oleks lähedane normaalkoormuse voolutugevusele (märgitud masina sildil).



Joon. 235.

Rootori paigalhoidmine alandatud staatori pinge puhul ei tekita raskust. Peab jälgima, et voolutugevused kõikides faasides oleksid ühesugused. Kuna rootor püsib paigal, siis mootori kasulik võimsus ja hõõrdekaod võrduvad nulliga.

Alandatud pinge tagajärjel magnetvoog on äärmiselt väike ja seepärast rauaskaod pööris-vooludele ja hüstereesile on sedavõrd madalad, et võivad arvestamata jääda. Siit järgneb, et mootori poolt lühistuses tarvitatav koguvõimsus kulub džaulikadudele ta mähistes.

Tähistades mootori poolt lühistuses tarvitatavat võimsust N_k ja voolutugevust I_k, võime vastavalt valemile (94) kirjutada:

$$N_k = C_{\mathrm{Cu}} \cdot I_k^2 \; ; \qquad (95)$$

siit

$$C_{\mathrm{Cu}} = \frac{N_k}{I_k^2} .$$

Teades C_{Cu} suurust, võime määrata valemi (94) abil koormusest olenevaid kadusid igasugusel voolutugevusel.

Koormusest mitteolenevad kaod määratakse tühijooksukatsest. Selleks mootor käitatakse koormata ning määratakse mootoris tarvitatav võimsus. Seda tehakse alalisvoolumootoritel volt- ja ampermeetriga, keerdvoolumootoritel — vattmeetriga. Sealjuures alalisvoolumootoreid tuleb reguleerida normaalsele pöörete arvule.

Mootorite tühijooksukaod määratakse valemiga:

$$V_0 = U \cdot I_0 - I_{a0}^2 \cdot R_a \text{ alalisvoolumootoritel}$$

ja

$$V_0 = N_{w0} - C_{\mathrm{Cu}} \cdot I_0^2 \text{ keerdvoolumootoritel,}$$

kus N_{w0} — vattmeetri näide tühijooksul, I_0 — tühijooksul võrgust võetav voolutugevus, I_{a0} — voolutugevus ankrus tühijooksul.

Kuna voolutugevused I_0 ja I_{a0} tühijooksul on õige väikesed, siis võib liikmed, mis arvestavad tühijooksul koormusest olenevaid kadusid, jätta

tähele panemata ning lugeda tühijooksul mootori poolt tarvitatav võimsus võrdseks mootori koormusest mitteolenevate kadudega.

Nüüd on määratud kõik valemisse (93) kuuluvad andmed ning on võimalik arvutada mootori kasutegurit.

Näide 32. Haruvoolumootor nimivõimsusega 6,8 kW ja pingega 110 V omab ankrutakistust $R_a = 0{,}16\ \Omega$. Haruvoolutugevus nimipööretel $I_h = 3{,}4$ A. Voolutugevus tühijooksul $I_0 = 7{,}6$ A. Määrata kasutegur voolutugevusega $I = 45$ A.

Määrame koormusest olenevad kaod:

$$V_{Cu} = I_a^2 \cdot R_a = (I - I_h)^2 R_a,$$

$$V_{Cu} = (45 - 3{,}4)^2 \cdot 0{,}16 = 277\ \text{W}.$$

Määrame koormusest mitteolenevad kaod:

$$V_0 = U \cdot I_0 - I_{a0}^2 \cdot R_a,$$

$$V_0 = 110 \cdot 7{,}6 - (7{,}6 - 3{,}4)^2 \cdot 0{,}16 = 833\ \text{W}.$$

Kogukaod

$$V = V_{Cu} + V_0 = 277 + 833 = 1110\ \text{W}.$$

Kasutegur:

$$\eta = \frac{U \cdot I - V}{U \cdot I}$$

$$\eta = \frac{110 \cdot 45 - 1110}{110 \cdot 45} = 0{,}775.$$

Arvutades kadusid lihtsustatud valemitega, saame

$$V_{Cu} = I^2 \cdot R_a = 45^2 \cdot 0{,}16 = 324\ \text{W};$$

$$V_0 = U \cdot I_0 = 110 \cdot 7{,}6 = 836\ \text{W};$$

$$V = V_{Cu} + V_0 = 324 + 836 = 1160\ \text{W};$$

$$\eta = \frac{U \cdot I - V}{U \cdot I} = \frac{110 \cdot 45 - 1160}{110 \cdot 45} = 0{,}767.$$

Mõlemal juhul teise koha täpsusega saame sama kasuteguri

$$\eta = 0{,}77.$$

Seega on täiesti lubatav arvutada kasutegurit lihtsustatud kadude valemitega, mis võimaldab mitte mõõta voolutugevust haruvoolumähises.

Näide 33. 220 V asünkroonmootor nimivõimsusega 4,5 kW andis lühistus- ja tühijooksukatsetel järgmised tulemused:

$$N_k = 460\ \text{W}, \quad I_k = 16\ \text{A};$$

$$N_{w0} = 520\ \text{W}, \quad I_0 = 8\ \text{A}.$$

Teataval koormusel vattmeeter näitas $N = 3{,}2$ kW, ampermeeter $I = 14{,}5$ A. Määrata kasutegur sellel koormusel.

Määrame koormusest olenevad kaod:

$$C_{Cu} = \frac{N_k}{I_k^2} = \frac{460}{16^2} = 1{,}8;$$

$$V_{Cu} = C_{Cu} \cdot I^2 = 1{,}8 \cdot 14{,}5^2 = 378 \text{ W}.$$

Koormusest mitteolenevad kaod:

$$V_0 = N_{w0} - C_{Cu} \cdot I_0^2 = 520 - 1{,}8 \cdot 8^2 = 405 \text{ W}.$$

Kogukaod:

$$V = V_{Cu} + V_0 = 378 + 405 = 783 \text{ W}.$$

Kasutegur:

$$\eta = \frac{N - V}{N} = \frac{3200 - 783}{3200} = 0{,}754.$$

Kui ei nõuta erilist täpsust, siis võib määrata mootori kasutegurit ükskõik missugusel koormusel, kasutades mootori sildiandmeid.

Mootori nimisildile märgitakse alati võimsuse N_n, voolutugevuse I_n, pinge U_n ja võimsuse teguri $\cos \varphi$ nimiväärtused. Neil andmetel on võimalik määrata mootori kasutegurit igasugusel koormusel ja voolutugevusel, eeldades, et koormusest olenevad ja tühijooksukaod on võrdsed mootori nimikoormusel. Mootorid enamasti konstrueeritakse selliselt, et mainitud oletus on õigustatud.

Kasuteguri määramist mootori nimisildi andmetel teostatakse järgmiselt:

Mootori poolt nimikoormusel võrgust tarvitatav võimsus on:

$N_{1n} = U_n \cdot I_n$ alalisvoolumootoritele ja

$N_{1n} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n$ keerdvoolumootoritele.

Kaod mootoris nimikoormusel:

$$V_n = N_{1n} - N_n.$$

Silmas pidades tehtud oletust leiame koormusest olenevad kaod $V_{Cu\,n}$ ja koormusest mitteolenevad kaod V_0.

$$V_{Cu\,n} = V_0 = \frac{V_n}{2}.$$

Siis määrame džaulikadude proportsionaalsuse teguri

$$C_{Cu} = \frac{V_{Cu\,n}}{I_n^2};$$

kogukaod antud voolutugevusel I

$$V = V_{Cu} \cdot I^2 + V_0$$

ja lõpuks kasutegur

$$\eta = \frac{N_1 - V}{N_1}.$$

See kasuteguri määramise viis on kasutatav nii alalisvoolu kui ka keerdvoolumootorite juures.

Näide 34. Keerdvoolumootori nimisildil leiduvad järgmised andmed

$$N_n = 10 \text{ kW}$$
$$U_n = 220 \text{ V}$$
$$I_n = 36 \text{ A}$$
$$\cos \varphi_n = 0{,}84$$

Teatud koormusel vattmeeter näitas 7,4 kW võimsust ning ampermeeter 32 A voolutugevust. Määrata kasutegur sel koormusel.

Määrame võimsuse tarvituse nimikoormusel:

$$N_{1n} = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n = 1{,}73 \cdot 220 \cdot 36 \cdot 0{,}84 = 11{,}5 \text{ kW}.$$

Kaod nimikoormusel

$$V_n = N_{1n} - N_n = 11{,}5 - 10 = 1{,}5 \text{ kW}.$$

Koormusest mitteolenevad kaod:

$$V_0 = V_{\text{Cu}\,n} = \frac{1}{2} \cdot V_n = 0{,}75 \text{ kW}.$$

Džaulikadude tegur:

$$C_{\text{Cu}} = \frac{V_{\text{Cu}\,n}}{I_n^2} = \frac{0{,}75}{36^2} = 0{,}00058.$$

Koormusest olenevad kaod:

$$V_{\text{Cu}} = C_{\text{Cu}} \cdot I^2 = 0{,}00058 \cdot 32^2 \cdot 0{,}6 \text{ kW}.$$

Kogukaod:

$$V = V_0 + V_{\text{Cu}} = 0{,}75 + 0{,}6 = 1{,}25 \text{ kW}.$$

Kasutegur:

$$\eta = \frac{N_1 - V}{N_1} = \frac{7{,}4 - 1{,}35}{7{,}4} = 0{,}82.$$

104. Masinate soojenemine.

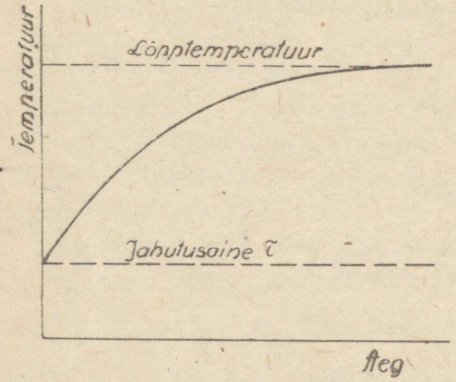
Masina töötamisel eralduv soojusenergia põhjustab masina soojenemist. Masina temperatuur tõuseb ja koos sellega, õigemini koos masina ja ümbruskonna temperatuuride vahe kasvuga, suureneb soojuse siire ümbruskonda.

Masina temperatuuri tõus toimub algul kiirelt, kuid edaspidi ikka aeglasemalt, sest temperatuuri tõusmisel järjest suurem osa kadudest tingitud soojusest siirdub ümbruskonda. Temperatuuri tõus lakkab, kui saabub kadudest masinas tekkiva soojuse ja sama ajavahemiku vältel ümbruskonda siirduva soojuse hulga võrdsus. Soojuse tasakaalu saavutamisega lõpeb edasine temperatuuri tõus.

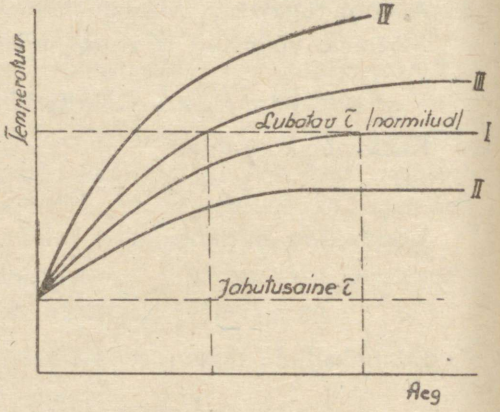
Joonisel 236 on kujutatud püsiva koormusega töötava masina temperatuuri muutumise graafik sõltuvalt ajast.

Koormuse suurenemisel kasvab masinas elektriliste kadude koguväärtus ja koos sellega suureneb ka masina lõpptemperatuur.

Joonisel 237 on antud masina temperatuuri tõusu mitu kõverat, mis on võetud erinevatel, kuid igal üksikul juhul püsivatel koormustel.



Joon. 236.



Joon. 237.

Temperatuuri tõus avaldab mõju esmajoones isolatsiooni omadustele Mitmesuguste isoleerainete omadused halvenevad temperatuuri tõusul üle teatava piiri, mis oleneb kasutatud isoleeraine liigist.

Vastavalt elektrimasinate kohta kehtivatele normidele, isoleermaterjalid neile lubatavate maksimaalsete soojenemistemperatuuride suhtes jaotatakse viide klassi (ГОСТ 183—41).

Klass A. Immutatud või õlisse asetatud kiudained (puuvill, siid, paber). Sellesse klassi kuuluvad ka emaillakid, mida kasutatakse juhtmete katmiseks.

Klass B. Kunstained vilgukivist, asbestist jms. mineraalse päritoluga materjalidest klassi A kuuluvate sideainetega, eeldusel, et sellise isolatsiooni elektrilistes ja mehaanilistes omadustes klassile B lubatavate temperatuuride mõjul ei toimu isoleermaterjali kõlbmatuks muutumist kestvaks kasutamiseks.

Klass BC. Saadused vilgukivist, klaaslõngast ja asbestist soojuskindlate lakkidega.

Klass CB. Saadused vilgukivist, klaaslõngast ja asbestist soojuskindlate lakkidega, kuid ilma klassi A kuuluvate materjalideta.

Klass C. Vilgukivi sideaineteta, portselan, klaas, kvarts ja teised sellised materjalid.

Katselisel teel saadud andmetel on määratud elektrimasinate soojenemise normid, mis on koondatud tabelisse IV. Määratud temperatuuripiiride ületamine ei ole mingil juhul lubatav, sest see põhjustab kui mitte otsest isolatsiooni hävimist, siis paratamatult selle töötamisea tunduvat lühenemist.

Tabelis IV on antud lubatavate piirtemperatuuride asemel lubatavad ületemperatuurid, s. o. soojenenud masinaosa ja ümbruskonna temperatuuride vahed. Sealjuures normide kohaselt maksimaalseks jahutusõhu temperatuuriks on arvatud + 35° C.

Masina üksikosade temperatuuri võib määrata otseste mõõtmistega termomeetri abil või mähiste takistuste mõõtmise teel enne ja pärast masinaosa soojenemist. Esimene viis ei võimalda tungida masina mähiste sisemusse, kus temperatuurid halvemate jahutustingimuste tõttu on kõrgemad. Teine viis annab mähise keskmise temperatuuri. See peegeldub tabeli IV andmetes, kus on määratud ka temperatuuride mõõtmise viis ületemperatuuride kindlakstegemisel. Tabelis leiduvad andmed ainult klassidesse A ja B kuuluvate isoleerainete kohta. Teiste isolatsioonimaterjalide klasside kohta, milledele ei ole toodud andmeid tabelis, annavad normid järgmise juhise: „Mähiste isoleerimine immutamata või mitte õlis asetseva puuvillaga, siidiga, paberiga jms. materjalidega ei ole soovitav; juhtudel, kui isolatsioon on teostatud tähendatud viisil, tabelis IV klassi A kohta antud lubatavad ületemperatuuride piirid tuleb alandada 15° C võrra."

„Klassi BC kuuluvate materjalidega isoleeritud mähistele ja nendega kokkupuutuvatele osadele lubatavad ületemperatuuride piirid määratakse 15° C võrra kõrgemad tabeli IV klassi B kuuluvatele materjalidele määratutest."

„Klassi CB kuuluvate materjalidega isoleeritud mähiste lubatavaid ületemperatuuride piire suurendatakse võrreldes tabelis IV klassi B kohta antutega vastavalt isolatsiooni CB valmistamiseks kasutatud lakkide soojusvastupidavusele."

„Klassi C kuuluvate isoleermaterjalide kohta lubatavaid ületemperatuuri piire kindlaks ei määrata."

Oletame, et joonisel 237 ülemine täppjoon määrab normidega lubatud maksimaalse temperatuuri. Me näeme, et soojenemiskõverale I vastava koormusega töötav masin soojeneb normidele vastava temperatuurini, s. o. saavutab soojusliku tasakaalu ainult pärast kestvat koormamist.

Tabel IV.

Masinaosade lubatavad ületemperatuurid juhul, kui jahutusaine temperatuur ei ületa 35° C õhk- ja 25° C vesijahutuse puhul.

Järjek. nr.	Masinaosad / Isolatsiooni klass	Klass A		Klass B	
		Termomeetri järgi	Takistuse järgi	Termomeetri järgi	Takistuse järgi
1.	a) Vahelduvvoolumasinate võimsusega alla 5000 kVA ja südamiku pikkusega alla 1 m . . . . . b) Alalisvoolu- ja alalisvooluga ergutatavate vahelduvvoolumasinate ergutusmähised (mitmekihilised) välja arvatud p. 2 ja 3 märgitud . . . . . c) Kollektoriga ühendatud ankrumähised . .	60° C	65° C	75° C	85° C
2.	a) Ühekihilised ergutusmähised . . . . . b) Turbogeneraatorite ergutusmähised ja asünkroonmasinate rootorite varrasmähised, kui varraste arv uurdes ei ole üle kahe	70° C	70° C	95° C	95° C
3.	Väikese takistusega mitmekihilised ergutusmähised ja kompensatsioonmähised	—	70° C	—	95° C
4.	Kestvalt lühistatud isoleeritud mähised	65° C	65° C	85° C	85° C
5.	Kestvalt lühistatud isoleerimata mähised	Nende osade ületemperatuur ei tohi ulatuda suuruseni, mis ohustaks isoleerivaid või muid naabermaterjale.			
6.	Raudsüdamikud ja teised mähistega mitte kokkupuutuvad osad				
7.	Raudsüdamikud ja muud osad, mis puutuvad kokku mähistega	65° C, kui mähise isolatsioon kuulub klassi A, 85° C, kui mähise isolatsioon kuulub klassi B, kui sealjuures aktiivraua lehed on isoleeritud vastava lakiga.			
8.	Kontaktrõngad, kaitstud ja mittekaitstud	70° C	—	90° C	—
9.	Kollektorid.	65° C	—	85° C	—
10.	Liuglaagrid.	45° C	—	45° C	—
11.	Veerelaagrid	60° C	—	60° C	—

Seepärast sellist masina võimsust nimetatakse kestevvõimsuseks. Kestevvõimsus on selline võimsus, mille masin võib arendada määramata aja vältel, ilma et tema temperatuur ületaks püstitatud norme.

Kui masin töötab madalama koormusega, siis selle soojenemiskõver (kõver *II*) asub madalamal kõverast *I*, s. o. temperatuur kunagi ei tõuse normidega lubatud piirini.

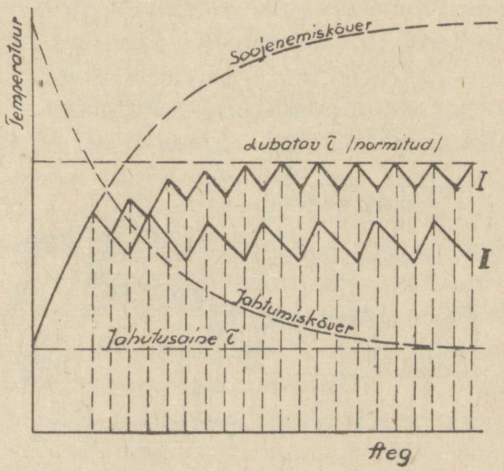
Töötamisel suurema koormusega soojenemiskõverad asuvad kõrgemal kõverast *I* (kõverad *III* ja *IV*) ning lõikavad lubatud temperatuuride sirget. Selge, et soojenemiskõvera ja maksimaalselt lubatava temperatuuri sirge lõikepunkti abstsiss määrab aja, mille vältel masin kahjustamata suudab taluda sellist ülekoormust. Mida kõrgem on ülekoormus, seda lühem on vastav aeg. Kui laseme masinat töötada kauemat aega antud koormusega, siis tema temperatuur ületab lubatava ja põhjustab isolatsiooni kahjustamist.

Kui masina töörežiim on valitud selliselt, et tema soojenemine ei ulatu püsiva väärtuseni ning sama masina töövaheaeg on küllalt pikk, et uueks töö alguse momendiks masina temperatuur on võrdne jahutusaine temperatuuriga, siis sellist tööviisi nimetatakse lühiajaliseks.

Lühiajalisele koormusele ettenähtud masina sildile märgitakse muude andmete hulgas ta võimsus täiendava märkusega „. . . minuti vältel".

Veidi teistsugust iseloomu omab sagedate töökatkestustega töötavate masinate soojenemise protsess (näiteks kraana- ja sõidukimootorid). Nendel mootoritel lühiajalised tööperioodid teataval koormusel vahelduvad peatustega, millede vältel toimub masina jahtumine.

Joonisel 238 on näidatud sagedaste peatustega töötava mootori temperatuuri muutuse graafik eeldusel, et iga tööperioodi vältel masin töötab täiskoormusega. Kõverad *I* ja *II* erinevad ainult peatuste kestuse poolest. Kõver *I* iseloomustab mootori temperatuuri muutusi, kui tööperiood on võrdne peatuste kestusega. Kõver *II* vastab sama mootori tööviisile, millejuures peatus on kaks korda pikem tööperioodist. Samal joonisel on kujutatud ka antud koormusega kestvalt töötava mootori soojenemiskõver ja sama mootori jahtumiskõver. Jahtumiskõvera kuju on vastupidine soojenemiskõverale, sest maksi-



Joon. 238.

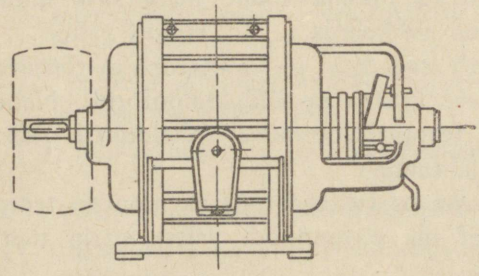
maalsel temperatuuril soojusülekanne mootorilt jahutusainele on kõige intensiivsem ja seega mootori jahtumine siis toimub kõige kiiremini. Samal ajal töötav mootor lähenedes maksimaalsele temperatuurile soojeneb kõige aeglasemalt.

Arusaadavalt, töötamisel pikemate peatustega soojuse tasakaalu lõpptemperatuur on madalam, või sama lõpptemperatuuri puhul suuremate peatustega töötava masina kestevvõimsus võib olla valitud väiksem. Väiksem kestevvõimsus samal koormusel annab järsema soojenemiskõvera.

Seega vahedega töötava mootori võimsuse valik sõltub suurel määral tööperioodi ja täistsükli (tööperiood + töövaheaeg) kestuse suhtest. Mida väiksem on see nn. „relatiivne lülituskestus", seda suuremat võimsust võib arendada antud mootor tööperioodide vältel. Sellist mootori töörežiimi nimetatakse korduv-lühiajaliseks töötamisviisiks.

105. Mootorite kaitsemine ja jahutus.

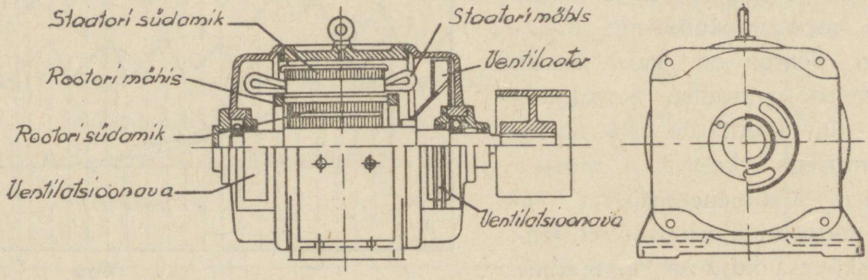
Mootoreid liigitatakse ümbruskonna mõjude vastu kasutatavate kaitseviiside suhtes lahtisteks, kaitstud ja kinnisteks.



Joon. 239.

Lahtist tüüpi mootoritel ei ole erilisi kaitseseadmeid pöörlevatel ja pingestatud masina osadel. Joonisel 239 on kujutatud lahtist tüüpi mootor. Need mootorid on kõige kergemad ja odavamad.

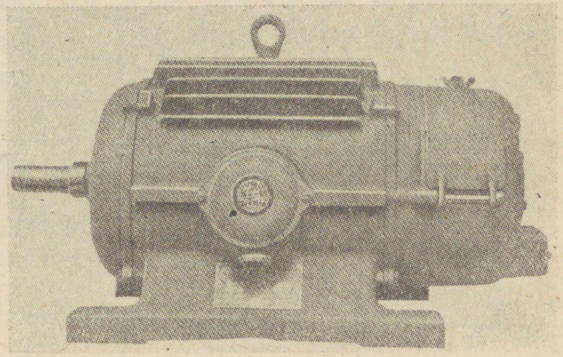
Kaitstud tüüpi mootoritel on erilised kaitseseadmed võrede või restide kujul, mis takistavad võõrkehasid, nagu õlitilgad, laastud jne., mootori sisemusse tungimast. Tolmu ja niiskuse vastu need mootorid ei ole kaitstud. Joonisel 240 on näidatud kaitstud tüüpi mootor.



Joon. 240.

Kinnist tüüpi mootorid (joonisel 241 — kraanamootor) on igalt poolt kaitstud välisõhu sissetungimise vastu (siiski mitte hermeetiliselt). Neis mootoreis mähised on kaitstud tolmu ja niiskuse sissetungimise vastu. Need mootorid on harilikult suuremad, raskemad ja kallimad lahtist ja kaitstud tüüpi mootoritest ja seepärast neid peab kasutama möödapääsemata juhtudel, s. o. tolmustes ja niisketes kohtades.

Eespool me nägime, et masin saavutab soojuse tasakaalu siis, kui temas eralduv soojuse hulk muutub võrdseks ümbruskonda siirduva soojuse hulgaga. Arusaadavalt mida enam soojust masin suudab välja kiirata, seda enam võib temas tekkida soojust sama lõpptemperatuuri juures. See tähendab, et mootor võib arendada seda suuremat võimsust, mida parem on tema jahutus.



Joon. 241.

Masinas tekkiva soojuse ärajuhtimise tõhustamiseks kasutatakse mitmesuguseid abinõusid.

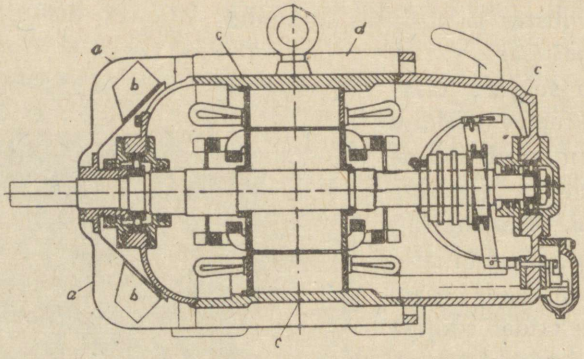
Enamik lahtist tüüpi mootoritest omab loomulikku jahutust. Masina sisemiste soojenevate osade vabalt liikuva õhuga kokkupuutumine soodustab korralikku soojuse siiret.

Loomuliku jahutusega mootorite hulka kuulub ka osa kinnistest mootoritest, näiteks joonisel 241 kujutatud masin. Kuid selliste mootorite jahutustingimused on täiesti erinevad lahtiste masinate omadest.

Kinniste mootorite sisemised pinnad ei puutu kokku jahutusõhuga ja seepärast soojuse siire võib teostuda ainult masina välispindade kaudu. Kuid need pinnad on suhteliselt väikesed ja mootori võimsuse suurenemisega soojuse siire kasvab aeglasemalt kui masinas tekkiv soojusehulk, mis on ligikaudu võrdeline mootori võimsusega. Seega mootori jahutustingimused halvenevad selle võimsuse suurenemisega. Et vältida ülekuumenemist, tuleb vähendada kadusid, s. o. suurendada raua ja juhtmete ristlõikeid. Seepärast kinnised mootorid on raskemad, suuremad ja kallimad lahtist tüüpi masinatest. Soojuse siirde parandamiseks kere välispind varustatakse ribidega.

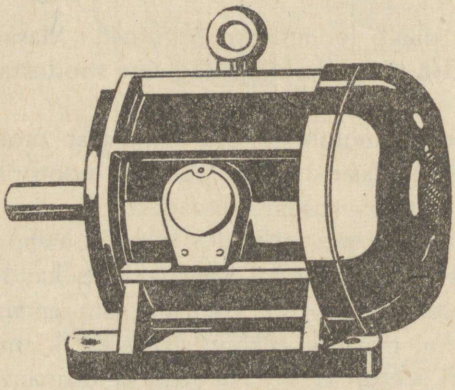
Kinniste mootorite edasist soojuse siirde parendamist saavutatakse masina välispinna jahutamise teel õhuvooluga, mida tekitatakse mootori võllile kinnitatud ventilaatoriga. Eriline kate või särk juhib õhuvoolust piki masina keret.

Seda tüüpi kinnisi mootoreid nimetatakse välise endaventilatsiooniga mootoriteks. Joonisel 242 on näidatud juhtkattega mootor. Vasakule asetatud ventilaator *b* suunab õhku katte *c* ja mootori kere *a* vahele, millega saavutatakse intensiivset mootori jahutust. Ribid *d* soodustavad soojuse siiret.

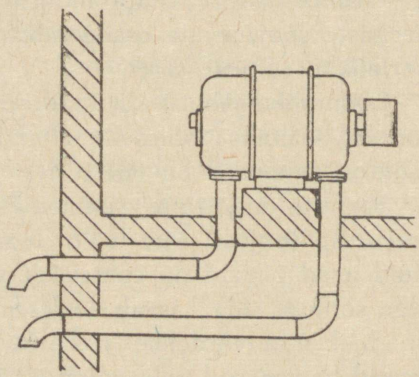


Joon. 242.

Selle mootori väliskuju on näidatud joonisel 243. Vaatamata parendatud soojussiirdele sellised mootorid on siiski raskemad ja kallimad lahtistest masinatest.



Joon. 243.



Joon. 244.

Kaitstud tüüpi mootorites nende sisepinnad on kättesaadavad välisõhule, kuid võrgud ja restid takistavad tunduvalt välisõhu pääsu soojenenud mootori osadele. Seepärast soojuse siirde parendamiseks sellised mootorid varustatakse ventilaatoritega, mis kinnitatakse mootori võllile kere sees.

See ventilaator imeb välisõhku võrede, restide või eri avade (on näha joonisel 240) kaudu, suunab selle mootori rauavahelistest kanalitest läbi ning soojenenud õhu surub välja. Selliseid mootoreid nimetatakse endaventilatsiooniga mootoriteks. Jahutustingimuste poolest nad on samaväärsed loomuliku jahutusega lahtiste mootoritega. Sama endaventilatsiooniga tüüpi mootorite hulka kuuluvad ka kinnised mootorid, milledele jahutuseks juhitakse puhast ja kuiva õhku torustiku kaudu. Õhu liikumine teostub rootori võllile kinnitatud ventilaatori abil. Selline mootor on kujutatud joonisel 244. Need mootorid on soojuse siirde poolest samaväärsed kaitstud endaventilatsiooniga mootoritega.

XXII peatükk.

VALGUSTUS.

Eelmistes peatükkides oleme tutvunud elektrilist energiat mehaaniliseks energiaks muundavate masinatega. Elektrimootorid tarvitavad suurema osa elektrijaamade poolt toodetavast energiast, kuid iga aastaga kasvab valgustuseks tarvitatav energiahulk, mis moodustab käesoleval ajal umbes 20% kogu elektrienergia toodangust.

Kunstliku valgustuse ratsionaliseerimisel on sotsialistliku majanduse tingimustes esmajärguline tähtsus. Ratsionaalselt teostatud kunstlik valgustus vähendab tugevasti tööõnnetuste arvu, vähendab kutseliste haigestumiste juhtumeid, mida põhjustab peentööde teostamine pingelisel silmade koormamisel, ja tõstab tunduvalt töötootlikkust.

Õigesti korraldatud kunstlik valgustus, iseäranis töötamisel mitmes vahetuses, vähendab suurel määral masinate ja tööriistade rikete arvu ning vähendab praaki.

106. Valgustehnilised suurused ja ühikud.

Kunstlikuks valgustuseks kasutame kiirgusenergiat, mida levitab valgusallikas. Teatavasti kiirgusenergiat iseloomustatakse nn. lainepikkusega, kusjuures kiirgusenergia lainepikkusega piirkonnas 0,4 kuni 0,75 μ mõjutab silma valgustundlikke kudesid ja on tajutav valgusena.

Kiirgusenergia võimsust, hinnatult tema mõjult silmale, nimetatakse valgusvooks. Valgusallikate valgusvoo mõõtmine toimub nende võrdlemise teel eriliste elektri-hõõglampide — etaloonide — valgusvoogudega. Neid etaloone hoitakse mõõtude ja kaalude kodades ning võrreldakse teiste maade etaloonidega.

Selliselt kindlaksmääratud valgusvoo leppeline ühik on luumen.

Valgusallika poolt väljakiiratav valgusvoog tavaliselt ei jagune ruumis ühtlaselt. Seepärast valgusallika täielikuks iseloomustamiseks on vaja teada valgusvoo tihedust eri suundades.

Valgusvoo tiheduseks on valgusvoo ja selle poolt läbitava ruuminurga suhe. Seda suurust nimetatakse valgustugevuseks.

Kujutleme kera raadiusega R ja keskpunktiga O (joon. 245).

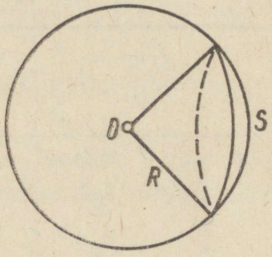
Ruuminurgaks nimetatakse ruumi osa, mille tipp on kera keskpunktis ja mis toetub kera pinnale.

Ruuminurk mõõdetakse kera pinna S, millele toetub ruuminurk, ja raadiuse R ruudu suhtega

$$\omega = \frac{S}{R^2}.$$

Ruuminurga ühikuks on raadiuse ruuduga võrdsele kera pinnale toetuv nurk. Seda ühikut nimetatakse steradiaaniks.

Valgustugevuse definitsioonist järgneb, et valgustugevus on võrdne luumenite arvuga, mis kiiratakse välja ühe steradiaaniga võrdses ruuminurgas.



Joon. 245.

Valgustugevuse ühikut nimetatakse rahvusvaheliseks küünlaks. Rahvusvaheline küünal on valgustugevus punktikujulisest valgusallikast, mis kiirgab valgusvoogu üks luumen ühe steradiaaniga võrdses ruuminurgas.

Väga tähtsaks valgustehniliseks suuruseks on valgustustugevus. Valgustustugevus on pinnaühikule langev valgusvoog. Valgustustugevuse ühik — luks — on valgustustugevus pinnal, mille ruutmeetrile langeb üks luumen ühtlaselt jaotatud valgusvoogu.

Tähistades tähega Φ pinnale S langevat valgusvoogu saame selle pinna valgustustugevuse E:

$$E = \frac{\Phi}{S}.$$

Iseloomustavad valgustustugevused loomulikul valgustusel omavad järgmisi väärtusi:

valgustustugevus päikesepaistelisel suve keskpäeval	50 000 — 100 000 luksi
sama, talve keskpäeval	1000 — 2000 luksi
valgustustugevus täiskuu ajal	0,2 luksi.

Soodsamad valgustustugevused enamikule tootmistöödest asuvad piirides 300 — 1500 luksi.

Tööstuslikkude ruumide valgustamiseks soovitatavad valgustustugevuste normid keskmiselt kõiguvad piirides 30 — 100 luksi, olenevalt ruumides teostatavatest töödest ning ainult väga peente tööde jaoks raskelt eraldavate detailidega nad ulatuvad kuni 200 luksini.

107. Hõõglambid.

Valgusallikatena praegusel ajal kasutatakse peamiselt hõõglampe. Hõõgkehana nendes tarvitatatakse volframtraati (sulamistemperatuur 3500° C).

Volframi hapendumise (ärapõlemise) takistamiseks ta asetatakse klaaskolbi, millest on eemaldatud õhk. Vaakuumis on võimalik tõsta volframi temperatuuri ainult kuni 2200° C, kuna kõrgemate temperatuuride juures toimub volframniidi kiire aurustumine ning niit, nagu räägitakse, põleb läbi.

Tabel V

Standardlampide valgus- ja elektrilised karakteristikud.

Pinge V	Võimsus W	Valgusvoog Lm	Valguse väljaand Lm/W	Valgustugevus I. C. P.	Erivõimsus W/I. C. P.
110—127	10	66	6,6	5,3	1,88
	15	124	8,25	9,9	1,52
	25	225	9,00	17,9	1,40
	40	380	9,50	30,3	1,32
	60	645	10,75	51,4	1,17
	75	881	12,67	70,3	1,04
	100	1275	13,01	101	0,99
	150	2175	14,80	173	0,87
	200	3050	15,64	243	0,82
	300	4875	16,58	388	0,77
	500	8725	17,81	695	0,72
	750	13690	18,50	1090	0,69
	1000	19000	19,19	1513	0,66
220	15	95	6,33	7,6	1,97
	25	191	7,65	15,2	1,64
	40	336	8,40	26,8	1,49
	60	540	9,00	43,0	1,40
	75	671	9,19	53,4	1,40
	100	1000	10,42	79,4	1,26
	150	1710	11,87	136	1,10
	200	2510	13,07	200	1,00
	300	4100	13,70	326	0,92
	500	7560	15,59	602	0,84
	750	12230	16,30	973	0,77
	1000	17200	17,73	1370	0,73

Asetades volframniidi mingi inertse gaasi atmosfääri, rõhuga umbes 1 atmosfäär, võib sedavõrd piirata volframi aurustumist, et niidi temperatuuri saab tõsta kuni 2800° C ning sellega suurendada lambi valgusvõimsust.

Selliste gaasiga täidetud lampide täiteks kasutatakse harilikult lämmastikku, mõnikord argooni.

Hõõglambi valgusvoog aja jooksul väheneb. Lambi elueaks loetakse aeg, mille vältel valgusvoog väheneb 20% võrra. Normide kohaselt see aeg ei tohi olla alla 1000 tunni.

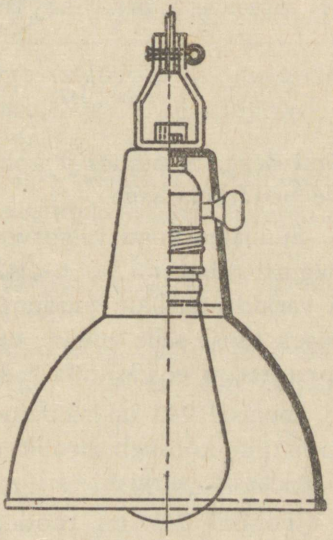
Tabelis V on toodud NSV Liidus valmistatavate lampide valgus- ja elektrilised karakteristikud (ГОСТ 2239—43).

108. Armatuur.

Paljast lampi ei saa kasutada valgusseadmena, kuna selle valgusvoo jaotus harilikult ei ole kõige otstarbekohasem antud tingimustes. Peale selle hõõgniidi heledus on sedavõrd suur, et avaldab pimestavat mõju silmadele ja võib kestval mõjutamisel põhjustada haigusnähteid.

Helendavate pindade omadust häirida silma nägemisfunktsioone nimetatakse helenduseks.

Armatuuri ülesandeks on anda sobivat valgusvoo jaotust ja kaotada hõõgniidist tingitud helendust. Lampi koos selle armatuuriga nimetatakse valgustuskehaks. Sõltuvalt kasutamise otstarbest on tarvitusel kohaliku ja üldvalgustuse armatuurid. Kohaliku valgustuse armatuure kasutatakse üksikute töökohtade valgustustugevuse suurendamiseks. Joonisel 246 on näidatud armatuur „Alfa". See on sügav, seest emailitud reflektor lampidele kuni 60 W.

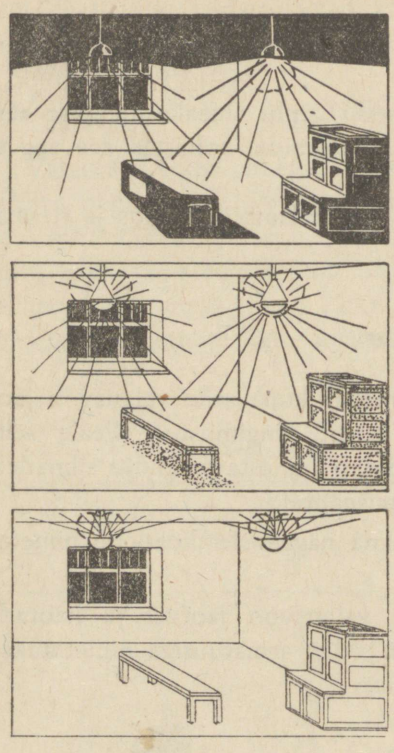


Joon. 246.

Ruumide üldvalgustuse armatuure liigitatakse otsese ja hajutatud valgustuse armatuurideks.

Joonisel 247-*a* ja *b* on näidatud valgusvoo jaotused mõlemal valgustusviisil. Joonisel 247-*a* nähtub, et kogu valgusvoog suunatakse armatuuriga otse tööpinnale. Hajutatud valgustuse süsteemil (joon. 247-*b*) osa valgusvoost suunatakse üles ning langeb tööpinnale olles peegeldunud laest ja seinte ülemisest osast.

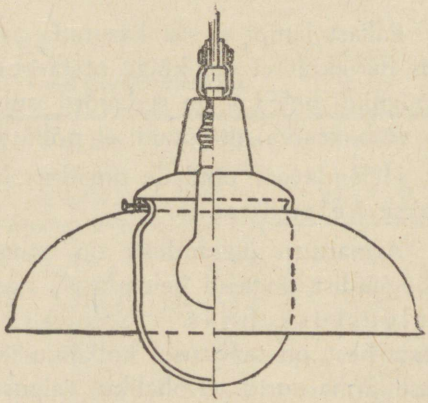
Olenevalt alla- ja ülessuunatud valgusvoogude vahekorrast, eraldatakse peamiselt otsest ja peamiselt peegeldatud valgustust. Tööstusruumide valgustamisel kasutatakse otsest ja hajutatud, peamiselt otsest valgustusviisi.



Joon. 247.

Hajutatud valgustussüsteem tagab ühtlast valgustuse jaotust üle kogu ruumi ja on iseloomustatav teravate varjude puudumisega, kuna otsese valgustuse korral ruumi ülemine osa jääb pimedaks ja varjud on teravamad.

Väga kõrgetes, tumedate seintega ja laega, suurte klaasitud seinte ja lae



Joon. 248.

pindadega, mustades ja tolmustes ruumides hajutatud valguse süsteem ei ole otstarbekohane.

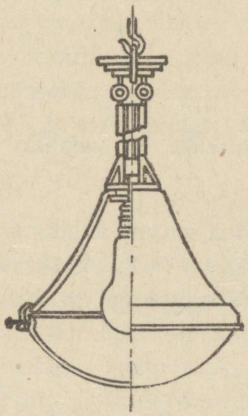
Suunates kogu valgusvoogu üles saame kaudse ehk peegeldatud valgustussüsteemi (joon. 247-*c*). See süsteem erineb valgusvoo suurte kadude ja varjude täieliku puudumise poolest. Viimast omadust tuleb lugeda puuduseks, sest selle juures on raskendatud detailide eraldamine. Seda valgussüsteemi ei kasutata tööstusruumide valgustamiseks.

Joonisel 248 on näidatud „Universaal"-tüüpi otsese valgustuse armatuur. Armatuur koosneb emailitud raudreflektorist ja helenduse kaitseks piim- või mattklaasist varjust.

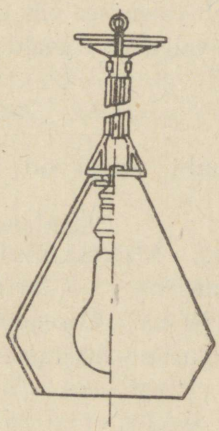
Joonisel 249 on toodud „Lutsett"-tüüpi hajutatud valguse armatuur. See koosneb kahest klaasosast. Peamiselt otsese valguse „Lutsetil" on all

matt- ja ülal piim-klaas, ning peamiselt peegeldatud valguse armatuuril on klaasid valitud vastupidiselt.

Joonisel 250 näidatud „Lutsett" kujutab endast ühest tükist mattklaasist varju, mis alt lahtine. See armatuur on väga lihtne ja otstarbekohane ning annab peamiselt allasuunatud valgusvoogu.



Joon. 249.



Joon. 250.

109. Lambi valgusvoo määramine.

Lambi valgusvoogu ei saa tööpinnal täies ulatuses ära kasutada. Osa lambi valgusvoost läheb kaduma armatuuris ning neelatakse seinte ja lae poolt.

Kasuliku valgusvoo suhet täisvooga nimetatakse valgusvoo kasuteguriks. Kasuteguri väärtus sõltub armatuuri tüübist, seinte ning lae seisukorrast ja ruumi suurusest ning kujust.

Otsese valguse süsteemis võib lugeda keskmiseks valgusvoo kasuteguriks $\eta = 0{,}45 - 0{,}53$, olenevalt seinte ja lae peegeldusvõimest, hajutatud valguse süsteemis aga vastavalt $\eta = 0{,}25 - 0{,}50$.

Kasutegurite täpsed väärtused antakse valgustusarmatuuride kataloogides.

Teades kasutegurit võib määrata lambi valgusvoo.

Olgu antud nõutav valgustustugevus E (luksides) ning valgustatava tööpinna suurus (harilikult võetakse selleks põrandapind) — S m^2. Siis kasulik valgusvoog luumenites on

$$\Phi = E \cdot S.$$

Lampide kogu valgusvoog, mis on vajalik valgustustugevuse loomiseks tööpinnal, on

$$\Phi_0 = \frac{\Phi}{\eta}.$$

Kui n on ruumi valgustavate lampide arv, siis ühe lambi valgusvoog peab olema:

$$\Phi_1 = \frac{\Phi_0}{n} = \frac{E \cdot S}{\eta \cdot n}.$$

Võttes arvesse lampide valgusvoo kahanemist vananemise ja tolmumise tagajärjel, tuleb valemisse viia tagavarategur k, mis valitakse piirides 1,2—1,5. Lõplik lambi valgusvoo avaldis oleks seega:

$$\Phi_1 = \frac{E \cdot S}{\eta \cdot n} \cdot k.$$

Leitud lambi valgusvoo järgi valime tabelist V vajaliku võimsusega hõõglambi.

Näide 35. Määrata üksiku lambi võimsus ruumi valgustamiseks, mille mõõdud plaanis on 12 × 23 m. Lampide arv $n = 8$. Nõutav valgustustugevus $E = 50$ Lx. Otsene valgustusviis. Võrgupinge on 127 V.

Lambi valgusvoo määrame valemiga:

$$\Phi_1 = \frac{E \cdot S}{\eta \cdot n} \cdot k.$$

Kasuteguriks võtame $\eta = 0{,}49$.

Tagavarategur olgu $k = 1{,}3$.

Siis $$\Phi_1 = \frac{50 \cdot 12 \cdot 23}{0{,}49 \cdot 8} \cdot 1{,}3 = 4600 \text{ Lm}.$$

Tabelist V leiame vastava lambi võimsusega 300 W, valgusvooga 4875 Lm.

Kasutades neid lampe saame valgustustugevuse tööpinnal

$$E = \frac{\Phi_1 \cdot n \cdot \eta}{S \cdot k} = \frac{4875 \cdot 8 \cdot 0{,}49}{12 \cdot 23 \cdot 1{,}3} = 53 \text{ Lx},$$

mis on küllalt ligidane nõutavale.

XXIII peatükk.

ELEKTRON- JA IOONRIISTAD.

Tööstusliku tootmise kasvav tempo nõuab tehnoloogiliste protsesside automatiseerimisel erimeetodite rakendamist. Viimastes kasutatakse fotoelemente, võimendavaid raadiolampe ja ioonreleesid, mis võimaldavad lahendada terve rea ülesandeid lihtsal ja küllalt kindlal viisil. Selliste ülesannete hulka kuuluvad: toodete hulga lugemine konveiertootmisel, toote mõõdete

kontroll väikeste tolerantside puhul (kuullaagrite sorteerimine), korrapäratu kujuga pindalade mõõtmine (nahatööstuses) ja palju muud. Peale selle esineb terve rida ülesandeid, millede lahendamine käesolevas peatükis vaadeldavate riistadeta on üldse võimatu. Siia kuuluvad: tekstiiltoodete värvuse kontroll, lahuste läbipaistvuse kontroll, suitsu paksuse kontroll, hõõglampide automaatne sorteerimine jne.

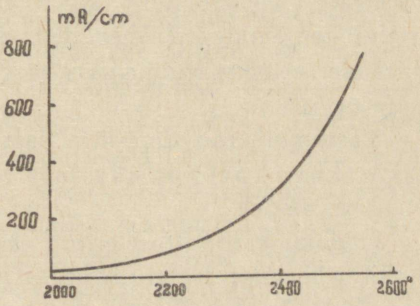
Kuna praegu tööstuses töötajad ikka sagedamini puutuvad kokku elektron- ja ioonriistade ning fotoelementide rakendamisel töötavate seadmete kasutamisega, siis on nende riistade aluseks võetud põhimõtete tundmine käesoleval ajal vaidlematult tarvilik.

110. Elektron- ja ioonalaldajad.

Elektron- ja ioonriistade töötamine on rajatud termoelektronilisel efektil, mis oli avastatud Edison'i ning põhjalikult uuritud Richardson'i poolt.

Termoelektroniline efekt seisneb selles, et iga juhe, olles kuumendatud võrdlemisi kõrge temperatuurini, saadab välja (emiteerib) ümbruskonda elektrone. Füüsika seletab seda nähtust aine osakeste tugeva ja korrapäratu võnkumisega kõrgemates temperatuurides, mis paneb samuti liikuma igas juhtmes leiduvad vabad elektronid. Mida kõrgem on temperatuur, seda kõrgemad on liikumise keskmised kiirused, ja viimaks muutuvad need sedavõrd suurteks, et elektronid tungivad juhtme välispinnast läbi ning lendavad välja ruumi.

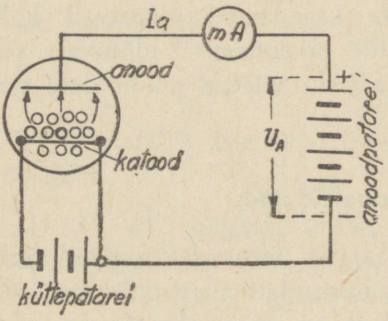
Ajaühikus väljalendavate elektronide arvu või, mis on sama, emissioonvoolu tugevust, võib kujutada graafiliselt sõltuvalt keha temperatuurist (joon. 251). Siin toodud kõver annab emissioonvoolu suuruse mA/cm^2 puhta volframi pinnalt. Kõverast selgub, et temperatuuridel alla 2000° emissioonvoolu peaaegu ei esine, kuid temperatuuril 2500° vool saavutab juba küllalt suure väärtuse.



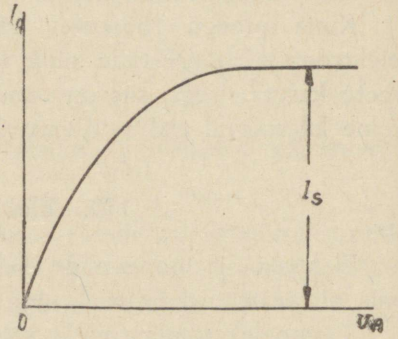
Joon. 251.

See emissioonvool ilmneb, kui peen metalltraat asetada klaaskolbi, millest eelnevalt on eemaldatud õhk (on loodud vaakuum) ning kuumutada seda traati, juhtides sellesse voolu väikesest patareist pingega 2 kuni 6 V. Kui sama klaaskolbi asetada teise patarei positiivse poolusega ühendatud metallplaat ja patarei miinus ühendada niidiga, siis niidi poolt väljasaadetavad elektronid lendavad vaakuumis positiivselt laetud plaadi poole, tekitades voolu. Seda

voolu on võimalik hõlpsalt mõõta, lülitades ahelasse milliampermeetri Kuumendatud niiti nimetatakse katoodiks ehk hõõgniidiks, metallplaati nimetatakse anoodiks, katoodi kuumendavat patareid — küttepatareiks ja patareid, mis on lülitatud katoodi ja anoodi vahele — anoodpatareiks (joon. 252). Riista, mis koosneb klaaskolvist selle sisse asetatud hõõgniidiga



Joon. 252.



Joon. 253.

ja anoodiga, nimetatakse kaheelektroodiliseks lambiks ehk lühendatult dioodiks. Antud dioodi omaduste iseloomustamiseks kasutatakse selle karakteristikut, mis annab anoodahela voolutugevuse sõltuvuse anoodpatarei pingest. Selline tüüpiline karakteristik on kujutatud joonisel 253. Kõverast nähtub, et koos anoodpatarei pinge tõusuga kasvab ka voolutugevus anoodahelas, kuid ainult teatava piirini, millest edasi voolutugevus jääb püsivaks, vaatamata edasisele anoodpinge tõusule. See nähtus on seletatav järgmiselt: algul vastavalt anoodpinge tõusule järjest suurema osa katoodist väljuvatest elektronidest kisub enda poole anood, kuni lõpuks, kui kõik antud temperatuuril katoodist emiteeruvad elektronid suunduvad anoodi ahelasse, edasine voolu kasv ei ole võimalik, kui me ei tõsta katoodi temperatuuri.

Vastkirjeldatud dioodi ja samuti kõiki elektron-vaakuumlampe nimetatakse katoodtorudeks ning neid kasutatakse laialdaselt tehnika mitmesugustel aladel.

Hariliku katoodtoru eritüübiks on gasotron, mis kujutab endast klaaskolbi selle sisse asetatud katoodiga ja metallplaadist anoodiga, nagu katoodtorudeski, kuid kolb täidetakse mingi inertse gaasiga või elavhõbeda aurudega rõhuga umber 10^{-3} mm elavhõbeda sambast.

Gasotroni töötamise põhimõte erineb põhiliselt katoodtoru omast. Siin katoodist emiteerunud elektronid oma teekonnal anoodile järjest põrkuvad gaasi molekulidega. Nendel põrkumistel elektronid, kui nende liikumise

kiirus on küllalt suur, löövad välja gaasi molekulidest nendega seotud elektronid, muutes molekule positiivseteks ioonideks. Selliselt tekkinud uued elektronid suundudes anoodile jätkavad oma teekonnal ioniseerimist ja tekkinud positiivsed ioonid suunduvad katoodile, tunduvalt suurendades lampi läbivat voolu.

Tuleb silmas pidada, et elektrivool siin tekib positiivsete ja negatiivsete laengute vastassuunalise liikumise tulemusena, kuna harilikkudes juhtmetes ja katoodtorudes elektri kandjateks on ainult elektronid.

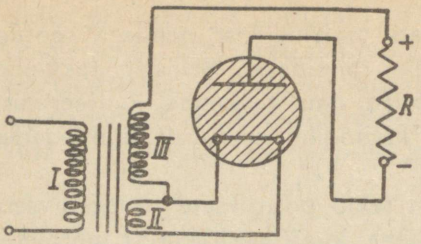
Ioniseerimise tulemusena gasotroni läbiv vool ületab mitmekordselt esialgse katoodi elektronide emissioonvoolu. Oli juba tähendatud, et ioniseerimine tekib ainult küllalt kõrge elektronide liikumise kiiruse puhul. Katsed tavaliselt kasutatavate gaasidega (argon, neoon, elavhõbeda aurud) näitavad, et ioniseerimiseks küllaldane elektronide kiirus tekib anoodi ja katoodi vahelise pingega umbes 20 V. On väga tähtis, et sisemine pingelangus gasotronis peaaegu ei olene voolutugevusest ja seepärast seadmetes suure voolutugevusega ja kõrgele pingele võib saavutada kasutegurit kuni 95%.

Ioniseerimise tõttu voolutugevus gasotronis ei piirdu küllastusvooluga, nagu tavalistes katoodtorudes, ja võib saavutada ükskõik millist suurust selle võimsuse piirides, mida suudavad välja kannatada gasotroni katood ning anood.

Gasotroni eriomadused võrreldes katoodtoruga on kokkuvõttes järgmised: võimalus saada suuri voolutugevusi väiksemõõteliste lampidega ja kõrge kasutegur.

Kaheelektroodilised katoodtorud ja gasotronid oma töötamise põhimõttelt evivad väga huvitavat omadust, mis seisneb selles, et elektrone saab emiteerida ainult kõrge temperatuurini kuumendatud katood, mitte aga mingil juhul külm anood. Seepärast läbib vool katoodtoru või gasotroni ainult siis, kui elektrienergia allikas, mis on lülitatud anoodahelasse, on ühendatud oma plussiga anoodile ning miinusega — katoodile. Vastupidisel lülitusel, miinus anoodiga, voolu üldse ei teki, kuna katoodist emiteeritud elektrone negatiivselt laetud anood tõukab eemale ja nad ei jõuagi anoodini. Seega omavad katoodtorud ja gasotronid ainult *ühesuunalist juhtivust*, läbi lastes voolu ainult ühes suunas ja mitte teises. Seda katoodtorude ja gasotronide omadust kasutatakse vahelduvvoolu muundamisel alalisvooluks ehk vahelduvvoolu *alaldamiseks*.

Lihtsaim skeem gasotroni abil vahelduvvoolu alaldamiseks on kujutatud joonisel 254 (kolvi viirutamisega näidatakse, et see on täidetud gaasiga, s. o. skeemis on kasutatud gasotroni, mitte aga katoodtoru). Skeemis kujutatud transformaatoril on kolm mähist. Esimene on ühendatud vahelduvvoolu



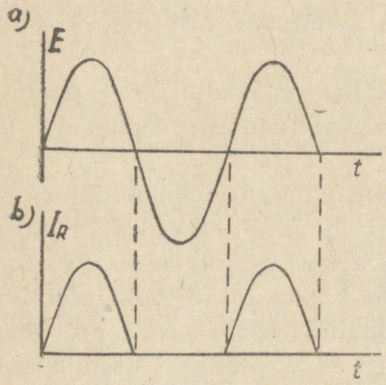
Joon. 254.

võrguga, teine —pinget alandav mähis annab mõnevoldilise pinge gasotroni katoodi kütteks, kolmas on töömähis ja sellest väljuv energia muundatakse alalisvooluks, millega toidetakse alalisvoolu tarvitajat. Selline tarvitaja skeemis on kujutatud takistusena R, mis on lülitatud järjestikku gasotroni anoodahelasse.

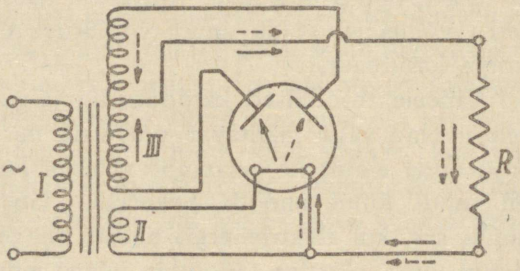
Kui transformaatori kolmanda mähise poolt tekitatud EMJ omab joonise 255 graafikul *a* kujutatud iseloomu, siis takistust R läbistav voolutugevus muutub ainult suuruselt, kuid suund jääb samaks (joon. 255-*b*), sest gasotron laseb läbi voolu ainult ühes suunas. Sellist voolu nimetatakse pulseerivaks alalisvooluks. Niisuguse voolu otsene kasutamine on väga piiratud, kuid ta on juba täiesti kõlblik näiteks akumulaatorpatareide laadimiseks.

Alaldajate polariteeti määratakse järgmise reegli abil: anoodilt väljatoodud klemm — miinus, katoodilt väljatoodud klemm — pluss.

Täiuslikum on selline vahelduvvoolu alaldaja, mis kasutab ära vahel-



Joon. 255.



Joon. 256.

duvvoolu pinge mõlemad poolperioodid. Seda võib saavutada kasutades lülitust kahe alaldajalambiga või ühte lampi kahe anoodiga.

Joonisel 256 on toodud täisperioodi alaldaja skeem kaheanoodilise katoodtoruga (vahelduvvoolu alaldamiseks ettenähtud katoodtorusid nimetatakse kenotronideks).

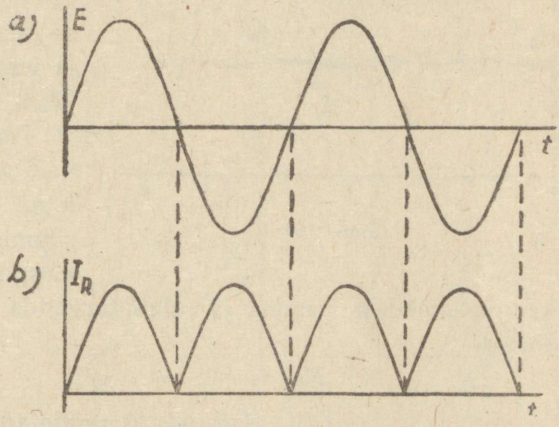
Selles skeemis transformaatori esimene mähis on ühendatud vahelduvvoolu võrguga, teine on ette nähtud kenotroni kütteks ja on varustatud keskväljavõttega, mis ühendatakse alalisvoolu tarvitajaga R. Selle alaldaja

tööperiood jaguneb kaheks taktiks. Kui pinge transformaatori kolmandas mähises teatud momendil on suunatud nii, nagu näidatud täisnoolega, siis töötab ainult alumine mähise pool ning vool läbistab kenotroni katoodist vasakpoolsele anoodile ning tarvitajat R ülalt alla. Seejuures mähise ülemine pool ei tööta, sest selle pinge, mis rakendatud parempoolsele anoodile, on negatiivne ning elektronid ei suundu parempoolsele anoodile. Olgu märgitud, et noolte suunad skeemis vastavad elektronide liikumise suundadele. Hariliku voolu tingsuuna märkimine plussist miinusesse elektronriistades ei ole otstarbekohane.

Järgmisel ajamomendil, kui kolmandas mähises pinge muudab suunda, hakkab töötama ainult mähise ülemine pool koos kenotroni parempoolse anoodiga, nagu see on näidatud skeemis punktiirnooltega. Kuid tarvitajat R vool läbistab nagu ennegi ülalt alla, s. o. voolusuund ei muutu.

Seejuures alumises mähise pooles, mis annab vaadeldaval momendil negatiivset pinget vasakpoolsele anoodile, voolu üldse ei teki.

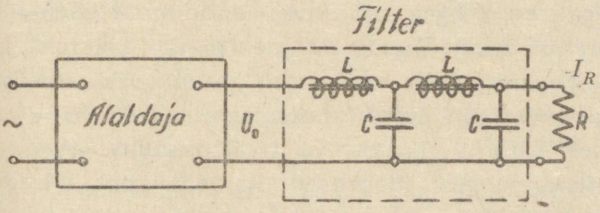
Joonisel 257 on kujutatud pinge transformaatori kolmanda mähise klemmidel (*a*) ning voolutugevus tarvitajas R (*b*).



Joon. 257.

Ära kasutades vahelduvvoolu mõlemad poolperioodid, muudame pulseeriva voolu tarvitajas enam püsivamaks kui poolperioodi alaldamisel. Ja tõesti, nüüd ei ole enam voolu katkestusi suuremaks ajavahemikuks ning see ainult üheks silmapilguks langeb nullini.

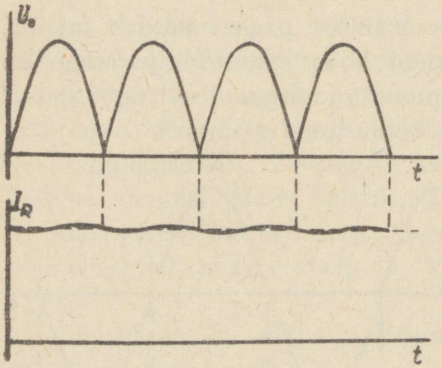
Paljud seadmed vajavad toitevoolu, mis peab olema püsiv mitte ainult suunalt, vaid ka suuruselt, s. o. ilma pulsatsioonideta. Seepärast sageli tuleb alaldajaid varustada filtritega pulsatsioonide silumiseks. Sellised filtrid koosnevad omainduktsiooni katsadest ja kondensaatoritest, mis on lülitatud joonisel 258 näidatud viisil.



Joon. 258.

Omainduktsiooni kat-

sad ehk paispoolid osutavad vahelduvvoolule palju suuremat takistust kui alalisvoolule ja seepärast ahelasse järjestikku-lülitatud raudsüdamikuga paispoolide tõttu alalisvooluga kaasaskäivad pulsatsioonid nõrgenevad tunduvalt. Filtri mõju on palju tugevam, kui skeemi on lülitatud kondensaatorid, mis lasevad läbi vahelduvvoolu pulsatsioonid, samal ajal olles isolaatoriks alalisvoolule. Kondensaatorid lülitakse paralleelselt tarvitajaga, kus nad moodustavad väikese takistusega teekonna pulsatsioonidele, mis mööduvad siis tarvitajast.



Joon. 259.

Selliselt ära kasutades paispoole ja kondensaatoreid, osutub võimalikuks filtreerimise teel muuta voolu tarvitaja R ahelas pärast filtrit peaaegu alaliseks ja pulsatsioonivabaks. Joonisel 259 on graafiliselt kujutatud pinge alaldaja klemmidel enne filtrit U_0 ja voolutugevus tarvitaja ahelas pärast filtrit.

Peab tähendama, et mida suuremat võimsust vajab tarvitaja, seda raskem on teostada peaaegu täielikku silumist saavutavat filtrit, sest siis paispoolid peavad evima suurt arvu keerde jämedast traadist ja tuleb tarvitada suure mahutavusega kondensaatoreid.

111. Katoodvõimendajad ja ioonreleed.

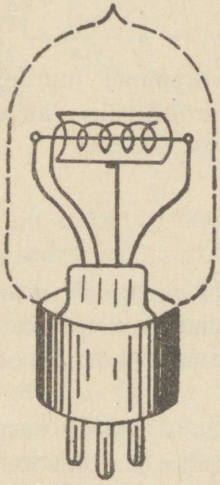
Kui elektronlambi anoodi ja katoodi vahele asetada traatvõre, siis katoodilt emiteeritud elektronid oma teekonnal anoodile peavad läbima avad võres.

Andes sellisele võrele katoodi suhtes negatiivset pinget, võib vähendada anoodvoolu, sest negatiivselt laetud võre avaldab elektronidele eemaletõukavat mõju. Küllalt suure negatiivse pingega võre mõjul anoodvool täielikult katkeb. Väheldane positiivne võrepinge soodustab elektronide liikumist ja sel korral anoodvool suureneb ning võib saavutada küllastuspiiri. Sellist võret ta anoodvoolu mõjutamisvõime tõttu nimetatakse *tüürvõreks* ning teda teostatakse tavaliselt katoodi ümbritseva traatspiraalina. Anood konstrueeritakse siis õõnessilindrina, mis ümbritseb katoodi koos võrega nii, nagu see on näidatud joonisel 260. Sellel anood, joonise selguse eesmärgil, on kujutatud äralõigatud esimese poolega.

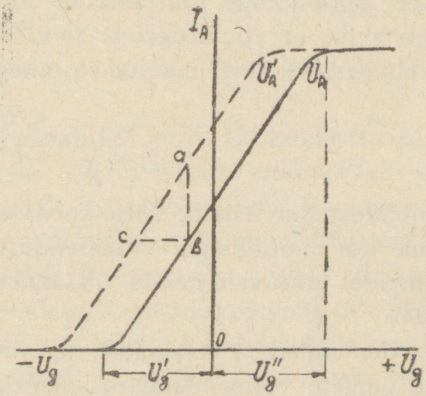
Tüürvõrega katoodtorusid nimetatakse kolmeelektroodilisteks lampideks ehk *trioodideks*.

Anoodvoolu reguleerimist võrega iseloomustab kõige paremini nn. *võrekarakteristik*, mis annab anoodvoolu olenevuse tüürvõre pingest mingi kindla ja püsiva anoodpinge puhul.

Joonisel 261 on kujutatud anoodpingega U_A võetud karakteristik (pidev joon). Abstsisside teljele on kantud tüürvõre positiivsed ja negatiivsed pinged U_g, kusjuures on selgesti näha, et mingi negatiivse pinge juures U'_g anoodvool muutub nulliks. Vastuoksa, mingi positiivse võrepinge juures U''_g saavutatakse küllastus. Kui korrata võrekarakteristiku võtmist veidi tõstetud anoodpingega U'_A, siis kogu karakteristik nihkub vasakule punktii-



Joon. 260.



Joon. 261.

riga märgitud asendisse. Sealjuures, nagu selgub jooniselt, anoodvool püsiva võrepinge juures kasvab suuruse võrra *ab*, mis on mõõdetav ordinaatide telje mõõtvahekorras. Kuid anoodvool võib jääda ka muutumatuks, kui rööbiti anoodpinge tõstmisega suurendada negatiivset võrepinget suuruse *bc* võrra. Kolmnurka kaatetitega *ab* ja *bc* nimetatakse *karakteristiliseks kolmnurgaks* ning selle abil määratakse lambi põhiparameetreid.

Selle kolmnurga kaatet *ab* kujutab anoodvoolu juurdekasvu ning tähistatakse ΔI_A-ga.

Sama kolmnurga kaatet *bc* on ΔU_g-ga tähistatav pinge juurdekasv tüürvõrel.

Anoodpinge juurdekasvu ΔU_A määratakse anoodpingete U_A ja U_A vahena

$$\Delta U_A = U_A' - U_A.$$

Anoodvoolu juurdekasvu suhet teda põhjustanud võrepinge juurdekasvuga nimetatakse *võre karakteristiku tõusuks* ning tähistatakse tähega s:

$$s = \frac{ab}{bc} = \frac{\Delta I_A}{\Delta U_g}. \tag{97}$$

Anoodpinge juurdekasvu suhet sellest tingitud anoodvoolu juurdekasvuga nimetatakse *lambi sisetakistuseks* ning tähistatakse tähega R_i:

$$R_i = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A}. \tag{98}$$

Lõpuks anoodpinge juurdekasvu suhet selle võrepinge juurdekasvuga mis tuleb anda, et voolutugevus anoodil jääks muutumatuks, nimetatakse võimendusteguriks ning märgitakse tähega μ:

$$\mu = \frac{\Delta U_A}{\Delta U_g}. \tag{99}$$

Võimendustegur näitab, mitu korda enam võrepinge mõjub anoodvoolu tugevusele kui anoodpinge. Võimendustegur on alati suurem kui üks ja raadiolampidel sõltuvalt nende ülesannetest ja ehitusest kõigub piirides 4 kuni 3000.

Tüürvõre omadust avaldada tugevat mõju anoodvoolule kasutatakse madalate pingete võimendamiseks. Selleks neid tuuakse lambi võrele samal ajal, kui anoodahelasse lülitakse takistus, mille klemmidel pinge saavutab suuremad juurdekasvud kui võrele antud pingel.

Enne võimendusskeemi vaatlusele asumist olgu märgitud, et lambi parameetrid μ, s ja R on lihtsas vahekorras. Kui võtta tõusu s ja sisetakistuse R_i korrutis ning avaldada neid eeltoodud suhete kaudu, siis pärast koondamist saame:

$$s \cdot R_i = \frac{\Delta I_A}{\Delta U_g} \cdot \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A} = \frac{\Delta U_A}{\Delta U_g}.$$

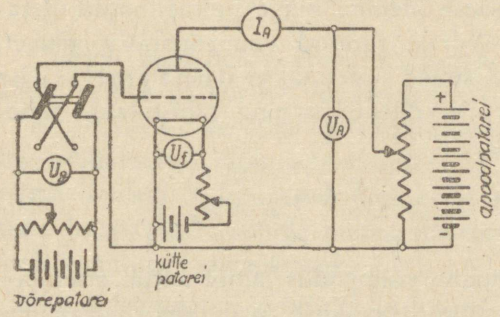
Saadud suhe ei ole midagi muud kui võimendustegur, seepärast

$$\mu = s \cdot R_i. \tag{100}$$

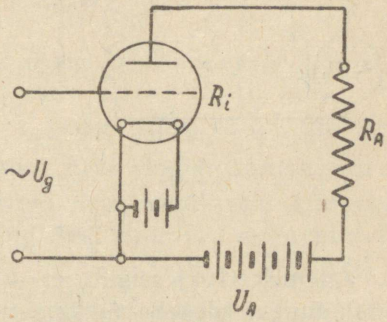
Eksperimentaalskeem, mille abil on võimalik võrekarakteristikute võtmine ning kolmeelektroodilise lambi parameetrite μ, s ja R_i määramine, on

kujutatud joonisel 262. Selles skeemis ümberlüliti ülesandeks on võrepinge märgi muutmine. Voltmeetriga U_f kontrollitakse lambi küttepinget, teiste osade ülesanded on arusaadavad eelnenud seletustest.

Mingi lambi võrele juurdetoodud vahelduvpinge võimendamiseks kasutatakse joonisel 263 toodud skeemi.



Joon. 262.



Joon. 263.

Siin on näidatud lambi anoodahelasse lülitatud aktiivtakistus R_A; seda nimetatakse sageli koormustakistuseks ehk kasulikuks takistuseks, kusjuures erijuhtudel takistust R_A võib asendada paispooliga või transformaatoriga, mis veelgi enam võimendab, kuid veidi moonutab võimendatavat signaali.

Võimendusteguri definitsioonist selgub, et võrele antud vahelduvpinget $\sim U_g$ võib asendada μ korda suurendatud vahelduvpingega anoodil ja seejuures anoodvoolu muutused jäävad endisteks. Seda reeglit silmas pidades lihtsustame joonisel 263 kujutatud skeemi, asendades lambi tema sisetakistusega ning viies sisse anoodahelasse vaheldava EMJ allika, mille suurus on μU_g. Kuna anoodvoolu alalisvoolu komponent võimenduse protsessi vaatlusel ei paku huvi, siis jätame ka anoodpatarei vaatlusest välja. Selline maksimaalselt lihtsustatud, kuid võimenduse suhtes täiesti analoogiline eelmisega skeem on kujutatud joonisel 264.

Meid huvitab kasuliku takistuse klemmidel ilmneva pulseeriva pinge määramine. Selleks määrame Ohmi seaduse abil voolutugevuse kogu ahelas:

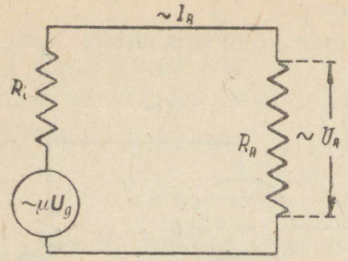
$$\sim I_A = \frac{\sim \mu U_g}{R_i + R_A}.$$

Pinget $\sim U_A$ võib määrata korrutades voolutugevust takistusega R_A:

$$\sim U_A = \sim I_A \cdot R_A = \frac{\sim \mu U_0}{R_i + R_A} \cdot R_A.$$

Ümber kujundades selle avaldise, saame

$$\frac{\sim U_A}{\sim U_g} = \mu \frac{R_A}{R_i + R_A}.$$



Joon. 264.

Suhe $\frac{\sim U_A}{\sim U_g}$ näitab, mitu korda kasuliku takistuse klemmi pinge pulsatsioonid ületavad võrele toodud võimendatavat pinget. Seda suhet nimetatakse dünaamiliseks võimenduseks ning tähistatakse tähega k_d

$$k_d = \mu \frac{R_A}{R_i + R_A}. \qquad (101)$$

Valemist (101) selgub, et dünaamiline võimendus lambi antud sisetakistuse juures oleneb takistuse R_A suuruse valikust, kusjuures dünaamiline võimendus on alati veidi väiksem lambi teoreetilisest võimendustegurist μ. Esimesel pilgul paistab, nagu oleks soovitav püüda takistust R_A võimalikult suurendada, sest siis k_d väärtus läheneb μ väärtusele, kuid vajadus läbi lasta takistusest R_A ka alalisvoolu komponenti seab suurusele R_A teatud piirid.

Et selgitada kvantitatiivset külge võimendamise küsimuses, kasutame näidet.

Näide 36. Kolmeelektroodiline võimenduslamp, tüüp CO-118 omab järgmisi parameetreid:

võimendustegur $\mu = 35$,

tõus $s = 2$ mA/V,

sisetakistus $R_i = 17\,500\ \Omega$.

Määrata skeemi dünaamiline võimendus kolme takistusega anoodahelas:

$$R'_A = 10\,000\ \Omega$$

$$R''_A = 30\,000\ \Omega$$

$$R'''_A = 60\,000\ \Omega.$$

Edasine koormustakistuse suurendamine liigselt vähendaks pinget lambi klemmidel ega oleks seepärast otstarbekohane.

Määrame dünaamilise võimenduse kõigil kolmel juhul valemi (101) abil:

$$k'_d = 35 \cdot \frac{10\,000}{17\,500 + 10\,000} = 12{,}7$$

$$k''_d = 35 \cdot \frac{30\,000}{17\,500 + 30\,000} = 22{,}1$$

$$k'''_d = 35 \cdot \frac{60\,000}{17\,500 + 60\,000} = 27{,}1$$

Üldiselt võib öelda, et normaalsetes tingimustes see lamp tagab juurdejuhitud pinge 25-kordse võimenduse.

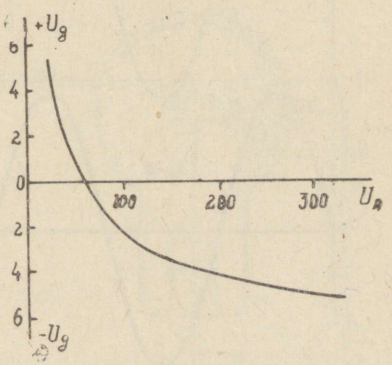
Kui tüürvõre asetada gasotroni anoodi ja katoodi vahele, siis selle võrega võib samuti mõjutada anoodvoolu suurust nagu katoodtoruski, kuid sellega seotud füüsikalised protsessid gasotroni sees tunduvalt erinevad suure hulga gaasi ioonide olemasolu tõttu ning isegi tüürvõre mõju anoodvoolule muutub omapäraseks.

Katoodtoruga on võimalik tüürvõre pinget sujuvalt muutes samuti sujuvalt muuta anoodvoolu ning peatuma jääda ükskõik missugusel selle väärtusel. Gasotronil kõrge negatiivse pingega võrel anoodvool on võrdne nulliga. Lähenedes pingega võrel nullile või andes võrele väikesi positiivseid pingeid me läheneme teatavale kriitilisele pinge väärtusele, mille juures gasotronis tekib küllalt tugev elektronide vool, et põhjustada gaasi ioniseerimist, mille tulemusena anoodvool järsku kasvab anoodahelasse sisselülitatud takistusega piiratud väärtuseni. Seda momenti nimetatakse gasotroni *süttimiseks* ning pinget, mille juures see toimub — *süütepingeks*. Võrega varustatud gasotrone nimetatakse *tiratronideks*.

Eeldades analoogiat katoodtoruga võiks oletada, et andes uuesti võrele negatiivset pinget, saab vähendada anoodvoolu, kuid gaasiga täidetud lampides seda ei sünni ning süttinud tiratronil tüürvõre ei avalda mingit mõju anoodvoolu suurusele. Anoodvoolu saab katkestada ainult anoodpinge väljalülimisega kas või väga lühikeseks ajaks.

Sellist võre ebaaktiivsust süttinud tiratronis seletatakse negatiivselt laetud võre piirkonnas suure hulga positiivselt laetud ioonide olemasoluga, mis paralüseerib selle tegevuse.

Võrepinge, mille juures toimub tiratroni süttimine, oleneb anoodpinge suurusest ja on kujutatud graafiliselt joonisel 265.



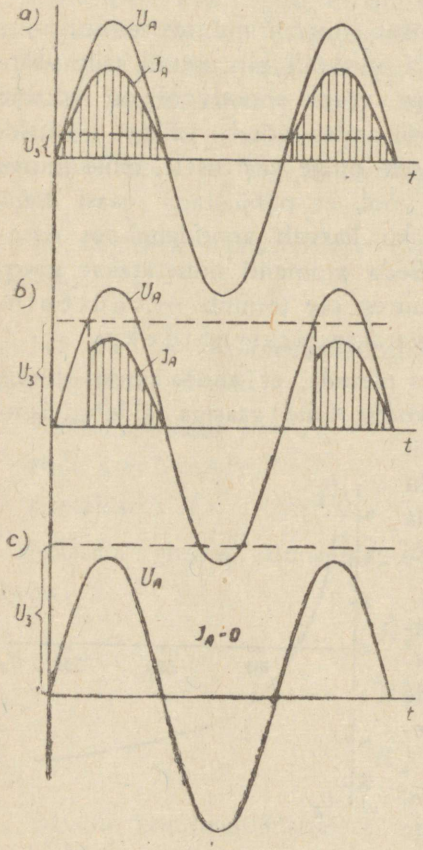
Joon. 265.

Kõver joonisel 265 annab võrepinge väärtused, mis vahetult eelnevad süütemomendile, sõltuvalt tiratroni anoodile rakendatud pingest. Anoodvoolutugevus selles graafikus ei esine, sest, nagu oli mainitud, anoodvool järsku saavutab ainult anoodahelasse sisseviidud takistusega piiratud tugevuse.

Rakendada tiratrone võimendamiseks, selliselt, nagu seda tegime katoodtorudega, ei ole võimalik, kuid neid võib kasutada väga tundlikkude releedena, mis lülitavad järsku suured võimsused tähtsusetult nõrkade signaalide mõjul.

Väike sisepingelangus tiratronides (umbes 20 V), lubab lülitada neid mootoritega järjestikku ja siis on mootori käivitamine võimalik väga nõrga signaali saatmisega, näiteks fotoelemendist, millede töötamise põhimõtet vaadeldakse allpool.

Tänu võimalusele teostada tiratronidega suurte võimsuste lülitamist nõrkade signaalide mõjul, neid tihti nimetatakse ioon-releedeks ning rakendatakse laialdaselt automaatika skeemides.



Joon. 266.

Kui tiratroni anoodahelasse lülitada vahelduvvooluallikas, siis ühesuunalise juhtivuse tõttu saame pulseerivat alalisvoolu, misjuures, muutes tüürvõre pinget, on võimalik reguleerida alaldatud voolu keskmist väärtust, kutsudes esile tiratroni süttimist eri ajamomentidel. Joonisel 266 on kujutatud kolm juhust:

a) Võrepinge on lähedane nullile. Selle tulemusena süttimine toimub madala anoodpinge U_3 juures. Tiratron põleb peaaegu terve poolperioodi vältel ning alaldatud voolu keskmine väärtus on suurim.

b) Võrele on antud teatav negatiivne pinge. Selle mõjul tiratron süttib hiljem, kui pinge anoodil saavutab väärtuse U_3. Keskmine anoodvool väheneb.

c) Võrele on antud sedavõrd kõrge negatiivne pinge, et süütepinge U_3 muutub suuremaks anoodpinge amplituudist. Sel korral tiratron ei sütti ning anoodvool on võrdne nulliga.

Seega, andes tüürvõrele mitmesuguseid pingeid, võib reguleerida tiratroni voolutugevust, kusjuures olenevalt tiratroni tüübist voolutugevused võivad ulatuda kümnetesse ampritesse. Selline voolutugevus on juba küllaldane väikevõimeliste mootorite käitamiseks. Mootorite pöörete arvu käsitlevas peatükis oleme selgitanud, et reguleerimispiire võib laiendada mootori klemmipinge muutmise teel. Reostaadi lülitamine peavoolusse on aga ebamajanduslik ega ole kasutamiseks soovitatav. Tiratronide omadused võimaldavad nende kasutamist peavoolus mootorite reguleerimiseks kirjeldatud viisil, kusjuures väikese pingelanguse tõttu tiratronis on seadme kasutegur väga kõrge.

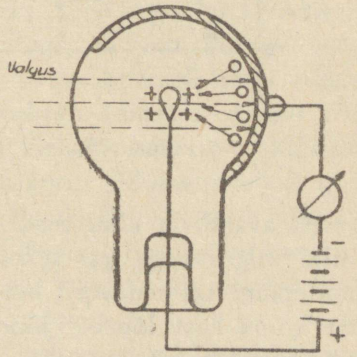
Selliseid reguleerimisviise hakatakse praegu rakendama tööstuses. Peale selle tiratronid on leidnud kasutamist riistades kiirete perioodiliste protsesside uurimisteks ning piltide vastuvõtu- ja saateseadmetes (kaugenägemine).

112. Fotoelemendid ja fotorelee.

Juba möödunud sajandi lõpul avastati valguse mõju elektrivoolule ehk nn. fotoefekt.

Mitte peatudes fotoefekti ajaloolise arenemise vaatlusel, siirdume otsekohe käesoleval ajal kasutatava riistaga tutvumisele, mis töötab fotoefekti põhimõttel ning mida nimetatakse fotoelemendiks.

Joonisel 267 on kujutatud klaaskolb, mille sisepind suuremalt osalt on kaetud keemilisel teel sadestatud õhukese hõbeda kihiga. Ainult osa kolvi pinnast on jäetud varjamata ja see on ette nähtud valguskiirte kimbu läbilaskmiseks kolvi sisemusse. Kolvis tekitatakse kõrge vaakuum. Fotoelemendi valmistamise protsessis hõbeda kiht kaetakse äärmiselt õhukese leelis-metalli tseesiumi kihiga, mis kergendab tunduvalt elektronide väljumist sellest kihist ümbritsevasse ruumi. Selliselt saadud pind ühendatakse klaasi joodetud ning väljatoodud juhtmega. Viimane ühendatakse katoodiga. Kolvi keskpunkti asetatakse metallelektrood pulgakese või traadi kujul, mis on seadise anoodiks ning ühendatakse patarei plussiga.



Joon. 267.

Valgus, mis langeb tseesitud hõbeda kihile, tõrjub välja sellest elektrone, mis suunduvad positiivselt laetud anoodile ning loovad välisahelas tundliku galvanomeetriga registreeritava voolu. Kui valgus langeb fotoelemendi valgustundlikule kihile, galva-

nomeeter annab hälbe; kui varjata fotoelementi valgusest, siis elektronide väljatungimine katoodist lakkab ja galvanomeetri osuti pöördub nullile.

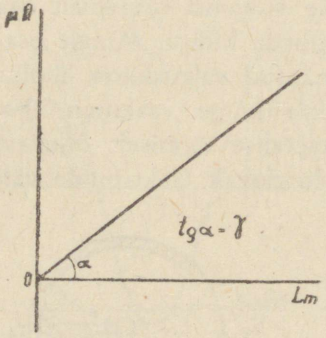
Fotoelemendi tundlikkust valguse mõjule iseloomustab voolutugevuse suhe valgusvooga:

$$\gamma = \frac{I}{\Phi} \text{ mikroamprit luumenile.}$$

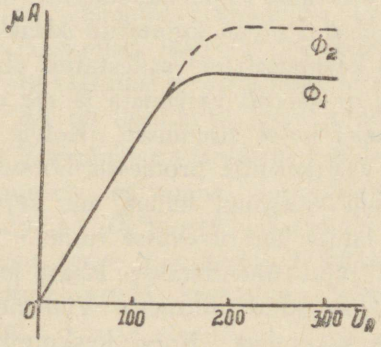
kus γ — fotoelemendi tundlikkus mikroamprites luumenile, I—voolutugevus fotoelemendi ahelas mikroamprites, Φ — valgusvoog luumenites.

Tseesiumikihiga vaakuum-fotoelemendid omavad tundlikkust 10 — 20 μ A/Lm ja üksikjuhtudel kuni 50 μ A/Lm. Seega on fotoelementidelt saadavad voolutugevused sedavõrd väikesed, et neid ei saa rakendada vahetult mingisuguste mehhanismide toitmiseks, vaid neid tuleb võimendada katoodtorude või tiratronide abil.

Kujutluse fotoelementide omadustest annavad kaks karakteristikut: valguskarakteristik, mis annab voolutugevuse sõltuvuse valgusvoost (joon. 268), ja voltamprite karakteristik. Esimene neist küllalt kõrge anoodpingega vaakuum-fotoelementidel on täiesti sirgjooneline. Teine — annab fotoelemendi voolutugevuse sõltuvuse anoodpingest mingi püsiva valgusvoo Φ väärtuse juures (joon. 269). See kõver, nagu oligi oodata, omab



Joon. 268.



Joon. 269.

ilmselt avalduvat küllastust, mis on tingitud sellest, et katoodile langeva antud valgusvooga igas sekundis lendab välja teatud arv elektrone ning, kui anoodpinge on sedavõrd kõrge, et kõik elektronid kistakse anoodile, edasine voolu kasv lõpeb. Joonisel 269 on punktiiriga näidatud suurema katoodi valgustusega saadud kõver, millest nähtub, et küllastusvool on suurenenud.

Fotoelemendi tundlikkuse tõstmiseks kolvi sisemus täidetakse mingi inertse gaasiga (näit. argoniga). Siis elektronid, mis on tekitatud valguse mõjul, oma teekonnal anoodile teostavad gaasi ioniseerimist, analoogiliselt, nagu see toimus gasotronides. Tulemusena suureneb gaasiga täidetud fotoelementide tundlikkus mitmekordselt ning saavutab 200—500 μA/Lm. Siiski ka need fotoelemendid nõuavad võimendust, olgugi et mitte nii suurt.

Gaasi ioniseerumise tagajärjel gaasiga täidetud fotoelementides küllastusnähtus puudub ja voolutugevus ning fotoelemendi tundlikkus olenevad suurel määral toitepinge väärtusest. Selle tulemusena gaasiga täidetud fotoelemendid olles tundlikumad, on vähem stabiilsed kui vaakuum-fotoelemendid.

Viimastel aastatel meil NSV Liidus ja Ameerikas katsetatakse erilise sekundaar-elektronvõimenduse kasutamisega fotoelemendis endas, mis võiks suurendada algvoolu miljonikordselt. Selliste sekundaar-elektronvõimendusega fotoelementide proovieksemplaridega on saavutatud tundlikkusi, mis ulatuvad kümnetesse ja sadadesse ampritesse luumeni kohta, ja see võimaldab vahetult ergutada elektromagnetilisi releesid tähtsusetult väikeste valgusvihkudega 10^{-4} — 10^{-5} Lm. Ebaühtlus tüüpides, ebastabiilsus töötamises ja kõrgepingelise toitmise vajadus sunnivad esialgu hoiduma nende tööstuslikust rakendamisest, kuid erijuhtudel on juba saavutatud positiivseid tulemusi.

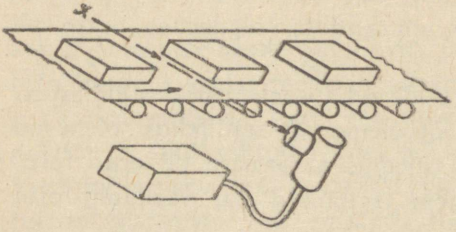
Valgustustugevuse registreerimist võimaldavad fotoelemendid leidsid laialdast kasutamist mitmesugustel tehnika aladel. Iseäranis andsid nad võimaluse täiesti algupärasel viisil lahendada terve rea tootmise automatiseerimisega seotud küsimusi.

Üheks lihtsaimaks fotoelementide rakendusvõimaluseks on konveieril liikuvate toodete automaatne lugemine. Selleks ühele poole konveierist asetatakse konveier-lindi liikumisele risti kitsast valgusevihku suunav lamp. Teisele poole konveierit asetatakse fotoelement avaga kontroll-lambi valgusvihu suunas ja see kaitstakse eri kattega kõrvalisest valgusest (joon. 270).

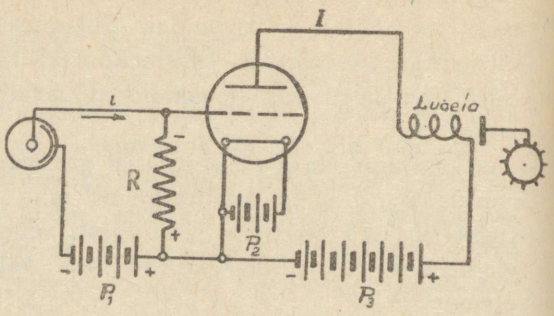
Fotoelement varustatakse võimendajaga ja elektromagnetilise lugejaga, mis registreerib numeraatoril voolu katkestuste arvu. Momendil, kui konveieril liikuv ese varjab valgusvihku, vool fotoelemendis katkeb ja võimendajaga ühendatud numeraator annab ette ühe numbri. Seega ühe vahetuse vältel konveieril läbiläinud toodete arvu fikseerib lugejaga varustatud fotoelement. Kogu seadet nimetatakse tavaliselt fotolugejaks.

Võimendajaga fotoelemendi põhimõtteline lülitusskeem on kujutatud joonisel 271. Patarei P_1, pingega 150—200 V, on ette nähtud fotoelemendi toitmiseks. Patarei P_2 toidab 4 V pingega võimenduslambi kütteniiti. Kol-

mas patarei P_3 on ette nähtud võimenduslambi anoodahela toitmiseks ja omab pinget olenevalt võimenduslambi tüübist 100—200 V.



Joon. 270.



Joon. 271.

Kui valgusvihk satub fotoelementi, selle ahelas ilmub vool i, mis on tekitatud patarei P_1 pingega ja läbistab võimenduslambi võre ja katoodi vahele lülitatud takistuse R. See vool tekitab takistuse R klemmidel pingelanguse

$$U_g = i \cdot R,$$

misjuures miinus asetseb lambi võrel ja pluss — katoodil. Pinge U_g mõjul võimenduslambi anoodvool väheneb või, kui võrepinge on küllalt suur, katkeb täiesti. Sellises „suletud" seisukorras püsib skeem niikaua, kui kestab valguse mõju fotoelemendi katoodile. Momendil, kui konveieril liikuv ese asub valgusevihu ette ja varjab fotoelementi, vool takistuses R kaob, lampi sulgev negatiivne pinge võrel samuti kaob ning lambi anoodvool järsult kasvades saavutab tugevuse mitme milliamprini. See vool, läbides elektromagnetilise lugeja mähist, põhjustab ankru külgetõmbumist, mis omakorda pöörab hammasratast ühe hamba võrra ning nihutab numeraatori ühe numbri võrra edasi. Kui konveieril liikuv ese on möödunud, skeem taas sulgub valgusvihu mõjul ning seadis on valmis järgmiseks registreerimiseks.

Arusaadavalt praktikas ei ole otstarbekohane seadise toitmiseks kasutada patareid, mispärast skeemi harilikult täiendatakse katoodalaldajaga, mida toidetakse tehase vahelduvvoolu võrgust.

Skeemi on võimalik koostada ka nii, et anoodvool läbistab võimenduslampi fotoelemendi valgustamise perioodil ning sulgub ja teostab registreerimist selle varjamisel.

Seadiseid, mis valguse mõjul teostavad elektriahelate lülitamisi ja katkestamisi, nimetatakse fotoreleedeks. Nad leiavad laialdast kasutamist mitmesugustel tehnika aladel. Niisuguste fotoreleedega võib kontrollida

suitsu tihedust, lahuste läbipaistvust, kontrollida vedelikkude seisu, automaatselt reguleerida tänavaliiklust ning lahendada palju muid ülesandeid. Seega avaneb fotoreleede rakendamisega leiduritele ja konstruktoritele avar tegevusväli.

Lõpuks toome näite, et saada ettekujutust fotorelee kvantitatiivsest tööst.

Näide 37. Fotorelee skeemis (joonis 271) on rakendatud gaasiga täidetud fotoelement tundlikkusega 250 μA/Lm. Fotoelemendi koormuse takistus $R = 500\,000\ \Omega$. Võimenduslambi tõus $s = 3$ mA/V. Lugeja mähise takistust, võrreldes lambi suure sisetakistusega, me ei arvesta. Lugeja kindlaks töötamiseks vajalik voolutugevus on 15 mA. Määrata valgusvoog, mis on tarvilik skeemi korralikuks töötamiseks.

Võimenduslambi režiim peab olema selline, et varjatud fotoelemendiga anoodvool saavutaks 15 mA. Siis valgustatud fotoelemendiga negatiivne võrepinge peab kindlasti sulgema lambi, millega saavutame skeemi töökindluse. Kui me ei arvesta lambi võrgukarakteristiku alumise osa kõverust, võib sellist pinget määrata antud tõusust:

$$U_g = \frac{I_A}{s} = \frac{15}{3} = 5\ \text{V}.$$

Niisugune pinge peab valitsema takistuse R klemmidel, kui seda läbib fotoelemendi vool i

$$i = \frac{U_0}{R} = \frac{5}{500\,000} = 10^{-5}\ \text{A} = 10\ \mu\text{A}.$$

Antud fotoelemendi tundlikkusega γ annab sellise voolu valgusvoog

$$\Phi = \frac{i}{\gamma} = \frac{10}{250} = 0{,}04\ \text{Lm}.$$

Seega skeemi kindlaks töötamiseks on tarvilik võrdlemisi väike valgusvoog.

XXIV peatükk.

ENERGIA ÜLEKANDMINE JA JAOTAMINE.

113. Tehase energiaga toitmise skeem.

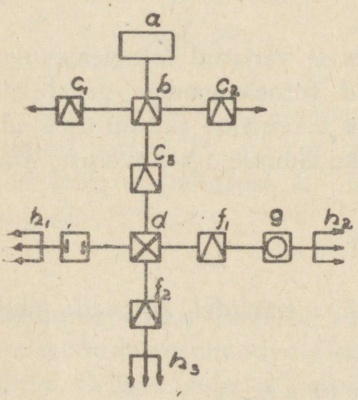
Tehaste toitmine elektrienergiaga võib teostuda tehase enda elektrijaamast, nn. plokk-jaamast (ЭБС), mis teenindab ühte või mitut naabertehast, võimsast linna elektrijaamast (ГЭС) või rajooni elektrijaamast (ГРЭС).

Meie maa elektrifitseerimise arenemine ja võimsate rajoonijaamade võrkude laiendamine võimaldab ikka suuremale arvule meie tehastest üle min-

na energiaga toitumisele rajoonijaamadest. Rajoonijaamad rajatakse odavate energiaallikate leiukohtades, nagu näiteks turvas („Punane Oktoober" — Leningradi läheduses, Ulila — Tartu läheduses, Ellamaa — Läänemaal), põlevkivi ja madalaväärtuselise kivisöe lademed (Kaširi — Moskva pruunsöe rajoonis, Šeterovi — Donbassis, Püssi — Virumaal põlevkivi rajoonis) ja veejõud (Svir ja Volhov — Leningradi juures, Dnepr).

Kohalikkude energeetiliste varude kasutamine rajoonijaamades võimaldab riigile kokku hoida väärtuslikumaid kütuse sorte. Rajoonijaamade kasutegur pealegi on väga kõrge. Kõik see alandab tunduvalt elektrienergia omahinda võrreldes väikevõimeliste plokk-jaamadega.

Joonisel 272 on kujutatud tüüpiline toiteskeem rajooni elektrijaamast.



Joon. 272.

Jaamas ülesseatud generaatoritest *(a)* elektrienergia pinge all 6—10 kV juhitakse kaablite kaudu pinget tõstvasse transformaator-alajaama *(b)*, mis asetseb otse jaamahoone juures.

Siin, olenevalt energia ülekande kaugusest, pinge tõstetakse kuni 35, 110, või 220 kV. Alajaama hoonest väljuvad ülekandeõhuliinid, mis suunduvad mõnikord mitmesaja kilomeetri kauguses asuvatesse tööstusrajoonidesse (Svir — Leningrad 200 km, pinge — 220 kV).

Ülekandeliin lõpeb pinget alandavas alajaamas *(c)*, kus pinge transformeeritakse alla kuni 6 kV.

Mõnikord lülitakse veel vahele ülelinnaline pinget alandav alajaam. Nii näiteks juhitakse energia Volhovi jaamast Leningradi pingega 110 kV; seda alandatakse pea-alajaamas pingele 35 kV ja sellega suunatakse tehase rajoonides asuvatesse alajaamadesse, kus pinget alandatakse kuni 6 kV.

Nendest alajaamadest energia juhitakse maakaablitega, harvemini õhuliinidega, tehase jaotusalajaama *(d)*, kust sama pingega jaotatakse tsehhide alajaamadele *(f, g)*.

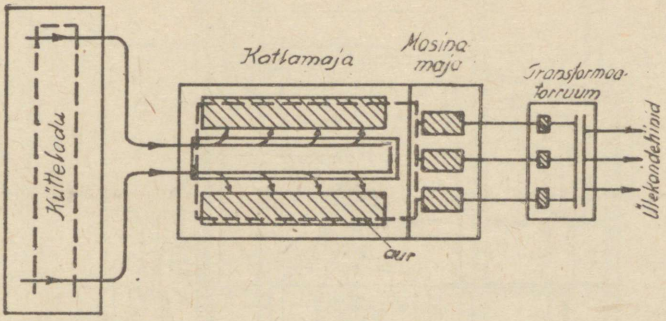
Siin pinge alandatakse ekspluatatsiooni väärtusteni ning suunatakse tehase üksikute tsehhide jaotuskilpidele *(h)*.

114. Elektrijaamad.

Olenevalt elektrienergiaks muundatava lähteenergia liigist, on olemas soojus- ja veejõujaamu.

Joonisel 273 on näidatud soojusjõujaama tüüpiline skeem. Kütus toi-

metatakse mehhaniseeritud transpordiga (vagonetid, kopsik-konveier, linttransportöör) punkerruumi katlamaja peal, kust see suundub katelde küttekolletesse. Aur juhitakse torude kaudu masinasaali, mis on ehitatud vahetult katlamaja kõrvale. Seal on üles seatud turbogeneraatorid, mis muundavad



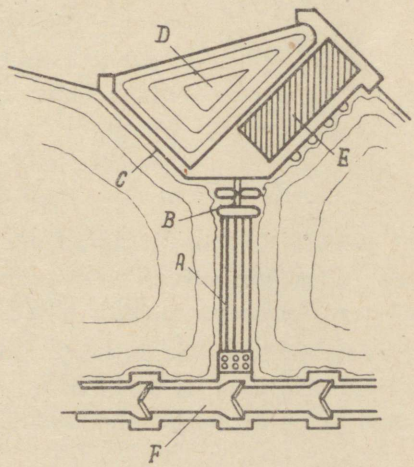
Joon. 273.

soojusenergia elektriliseks energiaks. Edasi suundub elektrienergia transformaatorihoonesse, muundub kõrgepinge-energiaks ja läheb jaotusseadmete kaudu ülekandeliinidesse.

Veejõujaama skeem on kujutatud joonisel 274.

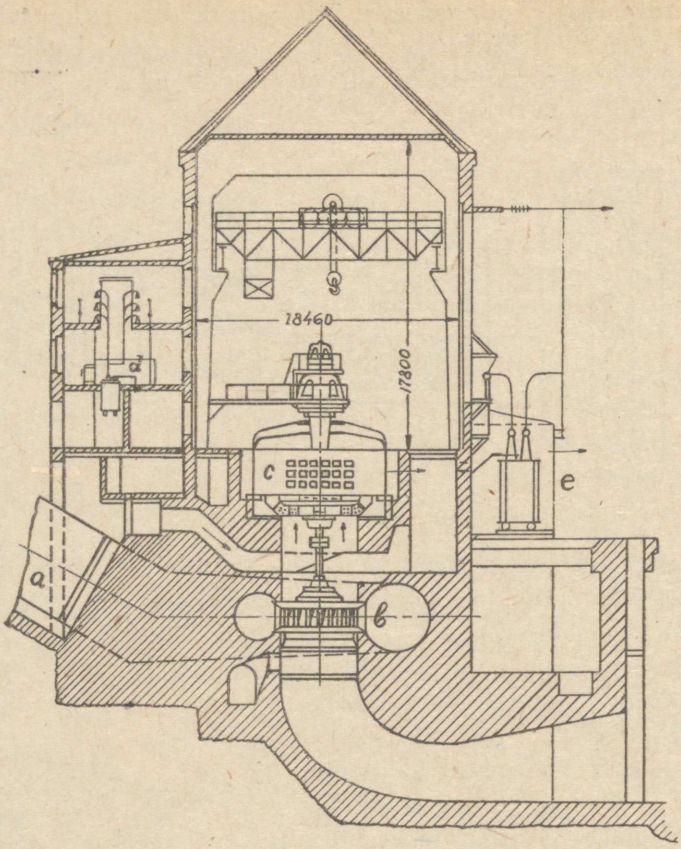
Selle põhiosa moodustavad hüdrotehnilised ehitised.

Need ehitised koosnevad üldjoontes veetammist *A* ülevooluga vee ja jää ülelaskmiseks tammi harjast tõusnud veepinna puhul; sulgekilpidega varustatud avadest *B*, mis on ette nähtud liigse vee möödalaskmiseks jaamas ülesseatud turbiinidest, ja jääkaitseseinast *C*, mis kaitseb jaama jää ja ujuvate esemete eest. Veealuste avadega jääkaitsesein ei takista vee voolu jaama ees asuvasse eelbasseini *(D)*, kust vett jaotatakse jõujaama hoones *(E)* ülesseatud üksikutele turbiinidele.



Joon. 274.

Laevaliiklusega jõgedel peavad olema ette nähtud abinõud laevade läbilaskmiseks, nn. lüüsid *(F)*. Need on eri basseinid, mis on mõlemast otsast suletud lüüsiväravatega. Basseinid on varustatud eri seadmetega nende tühjendamiseks ja veega täitmiseks suletud väravate puhul, et oleks võimalik veepinda ühtlustada ülemise või alumise veekogu veepinnaga.



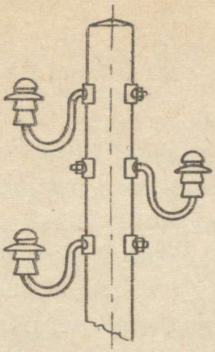
Joon. 275.

Joonisel 275 on näidatud veejõujaama hoone lõikes. Siin on *a* — toru vee juurdejuhtimiseks vesiturbiinile *b*; *c* — generaator, *d* — jaotusseadmed, *e* — transformaator-alajaam pinge tõstmiseks.

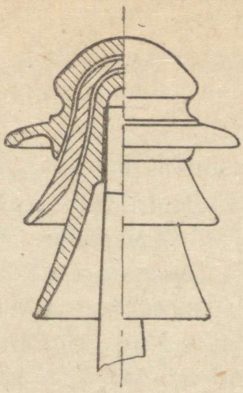
Vaadeldu oli veejõujaama tüüp, mis on rajatud jõe sängi ja mida kasutatakse madalate ja keskmiste veelanguste puhul (kuni 50 m); suurte veelanguste puhul hüdrotehnilised ehitised tunduvalt lihtsustuvad.

115. Õhu- ja maa-alused ülekandeliinid.

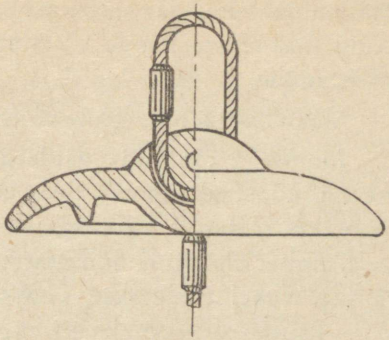
Ülekande õhuliinid ehitatakse vask-, alumiinium- või viimasel ajal teras-alumiinium-paljasjuhtmetest. Need juhtmed seatakse üles portselanisolaatorite abil puit- või metallmastidele.



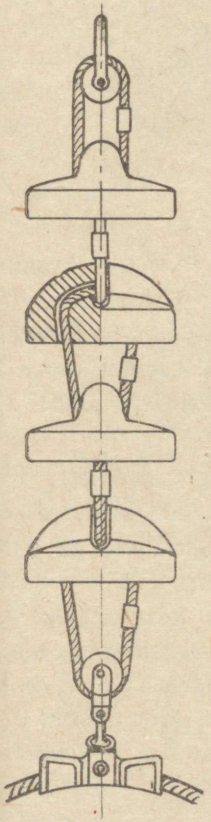
Joon. 276.



Joon. 277.



Joon. 278.



Joon. 279.

Joonisel 276 on näidatud nn. tugi-isolaatorite kinnitamine puitmastile.

Tugi-isolaatoreid (joon. 277) kasutatakse pingetele kuni 60 kV.

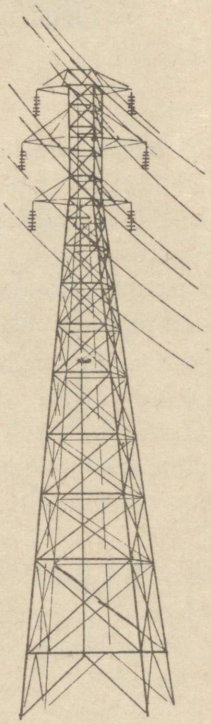
Kõrgemate pingete puhul kasutatakse nn. rippisolaatoreid (joon. 278). Mitu sellist isolaatorit moodustavad mastile riputatava keti. Keti alumisele isolaatorile kinnitatakse liinijuhe.

Joonisel 279 on näidatud neljast isolaatorist koosnev kett, ja joonisel 280 — terasmast kahe kolmefaasilise liiniga pingele 100 kV. Igale keti lülile lubatakse 15—20 kV pinget. Nii ülekandeliinis pingele 100 kV kasutatakse 5—6 lülist koosnevaid kette.

Mastide tippusid mööda juhitakse hästi maandatud terastrossid, mis kaitsevad ülekandeliini atmosfäärilise elektri eest tavalise piksekaitse põhimõttel.

Pingetel mitte üle 50 kV on mõnikord eelistatav maa-aluste kaabelliinide kasutamine, mis erijuhtudel osutub täiesti vältimatuks.

Maa-aluste liinide eemused seisnevad selles, et nad on täiesti ohutud ela-

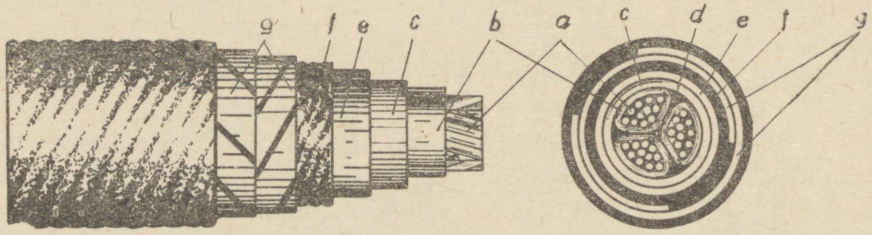


Joon. 280.

nikkonnale ega ole kahjustatavad atmosfääriliste nähtustega (nagu tormid, jäätumine, äike) ja seepärast on ekspluatatsioonis kindlamad õhuliinidest. Kuid maa-aluste liinide ehitamine on kallim ning raskem on tekkinud rikete avastamine.

Maa-aluseid liine ehitatakse peamiselt linnade toite- ja jaotusvõrkudes.

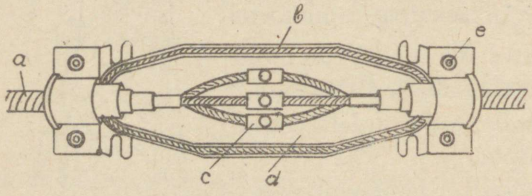
Joonisel 281 on näidatud soomustatud kolmesoonelise maa-aluse kaabli konstruktsioon. See koosneb isoleeraines (mineraalõli) immutatud paberiga mähitud vasksoontest *(a)*. Sooned on kokku keeratud ning ühiselt ümber mähitud immutatud paberist isolatsiooniga *(c)*. Vahed üksikute soonte vahel täidetakse samast immutatud paberist valmistatud nööridega *(d)*. Paberisolatsioonile on asetatud hermeetiline seatinamantel *(e)*, mis kait-



Joon. 281.

seb isolatsiooni niiskuse sissetungimisest. Seatinamantel kaetakse immutatud džuudi kihiga *(f)* ning soomustatakse teraspaelaga või traadiga *(g)*. Selle peal asub tõrvatud džuudi kiht. Soomus kaitseb kaablit mehaaniliste vigastuste eest. Kaabliliinide ehitamisel väljaspool linnu kasutatakse soomustamata kaableid, sest kaevetööde mitteesinemise tõttu on kaabli rikkumise tõenäolisus väga väike.

Kaablid sängitatakse kas otsekohe maasse, kraavidesse sügavusega 0,5—1,0 m, või siis eri torudesse või kanalitesse. Viimane viis on kallis ja seda tarvitatakse harva. Üksikuid kaabliosi jätkatakse kaablimuhvidega. Joonisel 282 on kujutatud selline kaablimuhv. Malmmuhv *(b)* koosneb kahest poolest, mis ühendatakse poltidega *(e)*. Kaabli otsad *(a)* vabastatakse soomusest ja isolatsioonist, eemaldatakse üksteisest ning ühendatakse eri klemmidega *(c)*. Muhv täidetakse soojendatud isoleermassiga *(d)*, mis hangunult kaitseb kaablit niiskuse sissetungimise eest.



Joon. 282.

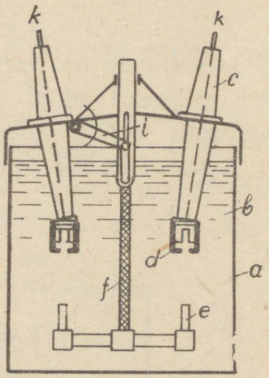
116. Kõrgepingeseadmed.

Suurevõimeliste ja kõrge pingega ahelate lülitamine ja eriti katkestamine nõuab eriaparatuuri rakendamist.

Harilikke vinnaklüliteid võib kasutada pingeteni kuni 500 V. Juba nendel pingetel ja voolutugevustel umbes 500 A katkestamise momendil tekkiv tugev kaartuli võib püsima jääda, kui katkestatavate kontaktide vahe ei ole suur. See põhjustab kiiret kontaktide sissepõlemist. Peale selle kaartuli õhus võib kustuda ükskõik missuguse voolu momentväärtuse juures ahelas, mis võib esile kutsuda väga ohtlikke ülepingeid, sest koos vooluga katkev magnetvoog indutseerib väga kõrget omainduktsiooni EMJ. Seepärast suurevõimelistes ja kõrge pingega ahelates tuleb tagada voolu katkestust selle nullpunkti läbimise momendil. Seda saavutatakse kontaktide lahutamisel õlis.

Joonisel 283 on toodud õlilüliti skeem. See koosneb anumast *(a)*, mis on täidetud õliga *(b)*. Voolu juhitakse juurde klemmidelt *(k)* läbi portselanisolaatorite *(c)* paigalseisvatele kontaktidele *(d)*. Liikuvad kontaktid *(e)* on kinnitatud traaversile, mis kindlalt on ühendatatud isoleermaterjalist vardaga *(f)*. Tõstetult traavers ühendab kindlad kontaktid *(d)* ja suleb vooluahela.

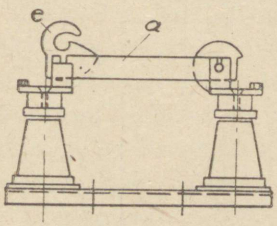
Voolu katkestamise momendil tekib kaartuli, mille kõrge temperatuuri tõttu kontaktide piirkonnas õli aurustub. Selle tulemusena tekkiv kõrge rõhk ja õli hea soojusjuhtivus kustutavad kaartule. Selle kustumine toimub momendil, mil voolutugevus muutub nulliks.



Joon. 283.

Õlilülitit harilikult automatiseeritakse, sidestades teda kaitsereleega. See lülitab automaatselt välja õlilüliti, kui võrgus esinevad häired.

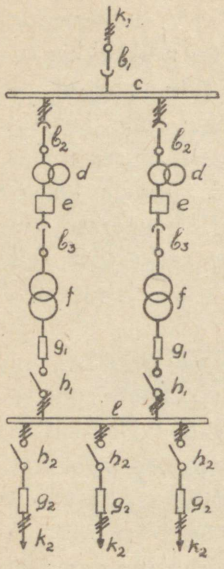
Üksikute aparaatide, näiteks õlilülitite lahutamiseks pingestatud võrgust ülevaatuste või remondi eesmärgil kasutatakse lahklüliteid.



Joon. 284.

Joonisel 284 on näidatud ühepooluseline lahklüliti. Oma konstruktsioonilt lahklüliti sarnaneb vinnaklülitiga, kuid tuleb meeles pidada, et lahklülitite katkestamine pinge all mingil tingimusel ei ole lubatav. Lahklüliti lülitamine ja lahutamine toimub lülituslatiga, mis haarab konksu *e* noal *a*.

Mõõte- ja kontrollriistad ning igasugused kaitsereleed lülitatakse kõrgepinge-ahelatesse pinge- ja voolu-mõõtetransformaatorite kaudu, milledega oleme tutvunud käesoleva kursuse kolmandas osas.



Joon. 285.

Joonisel 285 on näidatud transformaator-alajaama skeem. Vool saabub jaotusalajaamast kolmesoonelise kaabliga k_1 lahklüliti b_1 kaudu kõrgepinge kogumislattidesse c. Kogumislatid kujutavad endast isolaatoritele kinnitatud vask- või alumiiniumlatte. Siit lahklülitite b_2, voolutransformaatorite d, õlilülitite e ja lahklülitite b_3 kaudu voolu juhitakse kahte transformaatorisse f. Madalpinge kaitsmete g_1 ja vinnaklülitite h_1 kaudu transformaatorid on ühendatud madalpinge kogumislattidega i, kust läbi vinnaklülitite h_2 ja sulavkaitsmete g_2 elektrienergia juhitakse kolmesooneliste kaablitega k_2 töökodadesse.

117. Töökodade võrk.

Transformaator-alajaama madalpinge kilbist magistraalid suunduvad tehase töökodades ülesseatud jaotuskilpide juurde. Praegusel ajal need töökoja kilbid koosnevad sageli malmkastidest, milledesse on asetatud kogumislatid, vinnaklülitid ja kaitsmed. Kilbist omakorda väljuvad nn. rühmamagistraalid, mis toidavad väiksemaid jaotuskilpe, kust väljuvad liinid juba otse üksikutele voolutarvitajatele: mootoritele jõuvõrgus või hõõglampide rühmadele valgustusvõrgus.

Üldtarvitatavad normaalpinged on toodud tabelis VI.

Tabel VI

Normaalsed ekspluatatsioonipinged voltides.

Alalisvoolul	Keerdvoolul sagedusega 50 Hz	
	Faasijuhtmete vahel	Faasi- ja nulljuhtmete vahel
12	—	—
24	—	—
110	—	—
—	127	—
220	220	127
—	380	220
440	—	—
—	500	—

Valgustusvõrkudes ei kasutata pingeid üle 220 V. Ohutuse seisukohalt normid näevad ette ka vahelduvvoolu pingega 24 V, mida kasutatakse katlamajades, tööpinkide kohalikuks valgustamiseks vms.

Sisemist juhtmestikku töökodades teostatakse mitmeti, olenevalt kohalikest tingimustest.

Kõige lihtsam ja hõlpsam isoleeritud juhtmete ülesseadmise viis on nende kinnitamine isolaatoritele. Harilikult kasutatakse selleks vask- või alumiiniumsoonega ja kummiga isoleeritud juhtmeid. Kuid selline installatsiooniviis vajab palju ruumi ja juhtmed ei ole kaitstud mehaaniliste vigastuste eest. Nii näiteks juhtmete põrandale asetamine tööstusmasinale juurdejuhtimiseks ei ole siis võimalik.

Selles suhtes otstarbekohasem on juhtmete installeerimine torudes. Bergmanni torud erilise isoleeriva seguga immutatud paberist ja valtsitud metall-kaitsekattega ei taga absoluutselt kindlat juhtmete mehaanilist kaitset. Palju kindlamad on terastorud, mis ühendatakse omavahel eriliste muhvidega ja malmist ühendus- ning harukarpidega.



Joon. 286.

Mõnikord kasutatakse torujuhtmeid (Kuhlo-juhtmed) (joon. 286). Need koosnevad ühest või mitmest isoleeritud soonest, mis on kaetud neid tihedalt ümbritseva valtsitud metallmantliga.

Jutmete ristlõige peab vastama järgmistele nõuetele:

1) Pinge langus juhtmetes ei tohi ületada teatavat suurust, millejuures võiksid esineda häired tarvitajate töös.

2) Juhtmete soojenemine ei tohi ületada isolatsiooni ohustavaid piire.

4) Juhe peab evima küllaldast mehaanilist vastupidavust.

4) Tuleb valida ülaltähendatud tingimusi rahuldava juhtme minimaalne ristlõige, kusjuures see peab vastama normaalsele, praegu kehtivale juhtmete sortimendile.

118. Juhtmete ristlõike määramine pingelanguse järgi.

Pinge tarvitaja klemmidel avaldab mõju nende töötamisele. Lampide valgusvoog väheneb 8% võrra klemmipinge langemisel 2% võrra. Mootorite töötamisele pinge langemine avaldab vähemat mõju, kuid maksimaalne (vääratus-) moment ja käivitusmoment asünkroonmootoritel on võrdelised klemmipinge ruuduga, nii et suure pingelanguse puhul mootor ei käivitu või jääb seisma väikesel ülekoormusel.

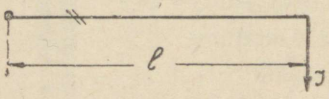
Alalisvoolumootoritel klemmipinge vähenemine põhjustab pöörete arvu langust.

Jõuvõrkude jaotuskilpe toitvates magistraalides on lubatav pingelangus 2—4 % võrgupingest.

Elektrimootoreid toitvates juhtmetes on lubatud pingelangused 5—10% võrgupingest.

Valgustusvõrkudes pingelangemist lubatakse märksa vähem: magistraalides 1% ja rühmaliinides 1,5% võrgupingest.

Anname valemid, mis võimaldavad määrata juhtme ristlõiget antud pingelanguse järgi kolmel põhijuhul:



Joon. 287.

1) Alalisvoolu ja puhtoomilise koormusega ühefaasilise voolu kahejuhtmeline liin koormusega liini lõpus.

Joonisel 287 on ühepooluseliselt näidatud selline liin. Kahe juhtme olemasolu märgitakse leppeliselt kahe põikkriipsuga liinijoonel.

Pingekaotuse liinis leiame valemi järgi $\Delta U = 2 \cdot I \cdot R$.

Siin R on liini ühe juhtme takistus, mis võrdub:

$$R = \frac{\varrho \cdot l}{q},$$

siit

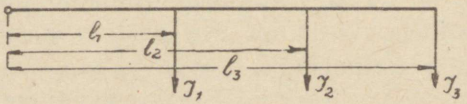
$$\Delta U = 2 \cdot I \cdot \frac{\varrho \cdot l}{q}$$

ja ristlõige

$$q = \frac{2 \cdot \varrho \cdot l \cdot I}{\Delta U}. \qquad (103)$$

2) Kahejuhtmeline liin jaotatud koormusega.

Sellise liini ühepooluseline skeem on toodud joonisel 288. Koormus on liini lülitatud mitmes punktis. Tähistades endiselt ΔU-ga pingekaotust liini algusest kuni viimase tarvitaja lülituspunktini, määrame juhtme ristlõike. Olgu see ühtlane kogu liini pikkusel.



Joonis 288.

Üldine pingekaotus ΔU koosneb pingekaotustest üksikutes liiniosades.

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

ehk

$$\Delta U = 2\,(I_1 + I_2 + I_3 \ldots)\,R_1 + 2\,(I_2 + I_3 + \ldots)\,R_2 + 2\,(I_3 + \ldots)\,R_3 + \ldots,$$

sest esimene liiniosa kannab kõikide tarvitajate koguvoolu, teine osa — sama voolu ilma esimese tarvitaja vooluta jne.

Asendades üksikute liini osade takistuste suurused, saame:

$$\Delta U = 2\,(I_1 + I_2 + I_3 + \ldots)\,\frac{\varrho \cdot l_1}{q} + 2\,(I_2 + I_3 + \ldots)\,\frac{\varrho \cdot (l_2 - l_1)}{q} +$$
$$+ 2 \cdot (I_3 + \ldots)\,\frac{\varrho \cdot (l_3 - l_2)}{q} + \ldots$$

Tuues ühised tegurid sulgude ette:

$$\Delta U = \frac{2 \cdot \varrho}{q}\left[(I_1 + I_2 + I_3 + \ldots)\,I_1 + (I_2 + I_3 + \ldots)\,(l_2 - l_1) + \right.$$
$$\left. + (I_3 + \ldots)\,(l_3 - l_2) + \ldots.\right]$$

Avades väikesed sulud:

$$\Delta U = \frac{2 \cdot \varrho}{q}\,(I_1 l_1 + I_2 l_1 + I_3 l_1 + \ldots + I_2 l_2 + I_3 l_2 + \ldots - I_2 l_1 - I_3 l_1 - \ldots$$
$$\ldots + I_3 l_3 + \ldots - I_3 l_2 - \ldots)$$

ning pärast koondamist:

$$\Delta U = \frac{2 \cdot \varrho}{q}\,(I_1 l_1 + I_2 l_2 + I_3 l_3 + \ldots).$$

Sama avaldist võib kirjutada järgmiselt:

$$\Delta U = \frac{2 \cdot \varrho \cdot \Sigma I \cdot l}{q},$$

kust juhtme ristlõige

$$q = \frac{2 \cdot \varrho \cdot \Sigma I \cdot l}{\Delta U}. \qquad (104)$$

3) Kolmejuhtmeline keerdvooluliin induktiivse koormusega liini lõpus Pingekaotus sel korral avaldub valemiga

$$\Delta U = \sqrt{3}\; I \cdot R \cdot \cos\varphi,$$

kus I — voolutugevus võrku lülitatud tarvitajal (näiteks mootoril), R — keerdvooluliini ühe juhtme takistus, $\cos\varphi$ — tarvitaja võimsustegur.

Asendades R selle väärtusega

$$R = \frac{\varrho \cdot l}{q},$$

saame:

$$\Delta U = \sqrt{3}\, I \cdot \frac{\varrho \cdot l}{q} \cos\varphi,$$

kust juhtme ristlõige:

$$q = \frac{\sqrt{3} \cdot \varrho \cdot l \cdot I \cdot \cos\varphi}{\Delta U} \qquad (105)$$

119. Juhtme ristlõike valik soojenemise järgi.

Juhtme ristlõike valikut soojenemise järgi teostatakse juhtmete normaalristlõigete tabelite alusel. Neis tabelites on toodud maksimaalne lubatav juhtme koormus amprites sõltuvalt ristlõikest.

Tabelisse VII on koondatud koormuse normid kummi-isolatsiooniga vaskjuhtmetele. Alumiiniumsoontega juhtmetele on lubatavad koormused 33% võrra madalamad. Ümbruskonna temperatuuriks on arvatud 25° C ja temperatuuri tõusuks kestval koormusel 30° C.

Tabel VII

Kummi-isolatsiooniga vaskjuhtmetele lubatav kestev koormus amprites.

Juhtme ristlõige mm^2	Juhtmete ülesseadmise viis			
	Lahtiselt	Torudes		
		Juhtmete arv ühes torus		
		2	3	4
0,5	10	—	—	—
0,75	13	—	—	—
1,0	15	14	13	12
1,5	20	17	15	14
2,5	27	24	22	20
4	36	34	31	27
6	46	41	37	34
10	68	57	53	47
16	92	77	70	63
25	123	100	91	82
35	152	121	111	100
50	192	165	151	135
70	242	201	184	166
95	292	245	223	201
120	342	280	255	230
150	392	319	292	—
185	450	—	—	—
240	535	—	—	—
300	614	—	—	—
400	737	—	—	—

Tabelis VIII on toodud minimaalsed juhtmete ristlõiked, mis on lubatavad mehaanilise vastupidavuse seisukohalt.

Näide 38. Määrata lahtise vaskühendusjuhtme ristlõige alalisvoolumootorile võimsusega $N = 5$ kW.

Võrgupinge $U = 220$ V. Kaugus jaotuskilbist mootorini $l = 40$ m.

Tabel VIII

Minimaalsed juhtmete ristlõiked mehaanilise vastupidavuse seisukohalt.

Juhtmete ülesseadmisviis	Minimaalne ristlõige mm^2
Isoleeritud juhtmed hoonetes, kui toetuspunktide vahe on	
kuni 1 m	1
1 kuni 2 m	1,5
2 kuni 6 m	2,5
üle 6 m	4
Isoleeritud ja paljad madalpinge vaskjuhtmed väljaspool hoonet, kui toetuspunktide vahe on	
kuni 20 m.	4
kuni 35 m.	6
üle 35 m	10

Leiame voolutugevuse:

$$I = \frac{N \cdot 1000}{\eta \cdot U}.$$

Antud võimsusega mootori kasuteguriks võib võtta $\eta = 0{,}8$.

$$I = \frac{5 \cdot 1000}{0{,}8 \cdot 220} = 28{,}5 \text{ A}.$$

Pingekaotust lubame 5% võrgupingest:

$$\Delta U = 0{,}05 \cdot 220 = 11 \text{ V}.$$

Juhtme ristlõike määrame valemi (103) abil

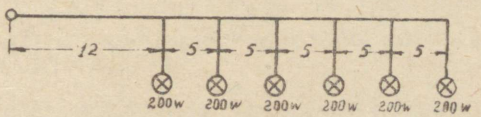
$$q = \frac{2 \cdot \varrho \cdot l \cdot I}{\Delta U};$$

$$q = \frac{2 \cdot 0{,}0178 \cdot 40 \cdot 28{,}5}{11} = 3{,}7 \text{ mm}^2.$$

Normide kohaselt (tabel VII) voolutugevusele $I = 28{,}5$ A minimaalne ristlõige on $q = 4$ mm².

Tuleb valida see ristlõige kui minimaalne ja kõiki tingimusi rahuldav.

Näide 39. Määrata joonisel 289 kujutatud lahtise valgustusliini vaskjuhtme ristlõige.



Joon. 289.

Võrgupinge 120 V. Lampide arv 6. Iga lambi võimsus 200 W.

Ühe lambi voolutugevus

$$I = \frac{N}{U} = \frac{200}{120} = 1{,}66 \text{ A.}$$

Pingekaotust lubame 1,5% võrgupingest

$$U = 0{,}015 \cdot 120 = 1{,}8 \text{ V.}$$

Juhtme ristlõike määrame valemiga:

$$q = \frac{2\ \varrho \cdot \Sigma I \cdot l}{\Delta U}.$$

Kuna käesoleval juhul kõikide hargnevate voolude tugevused on võrdsed, siis neid võib tuua summa märgi ette:

$$q = \frac{2 \cdot \varrho \cdot I \cdot \Sigma l}{\Delta U},$$

$$q = \frac{2 \cdot 0{,}0175 \cdot 1{,}66 \cdot (12 + 17 + 22 + 27 + 32 + 37)}{1{,}8},$$

$$q = 4{,}77 \text{ mm}^2.$$

Leiame ristlõike tabeli VII järgi:

Voolutugevus liiniosas enne esimest lampi:

$$I = 6 \cdot 1{,}66 = 9{,}96 \text{ A.}$$

Tabeli järgi minimaalne ristlõige sellele voolutugevusele on lahtiste juhtmete puhul

$$q = 0{,}5 \text{ mm}^2.$$

Kõiki tingimusi rahuldav minimaalne ristlõige on seega 4,77 mm^2. Valime lähima suurema normaalristlõike $q = 6$ mm^2.

Näide 40. Määrata vaskjuhtme ristlõige asünkroonmootorile võimsusega $N = 25$ kW. Võrgupinge 220 V. Kaugus kilbist mootorini 20 m. Kolm juhet on asetatud ühte torusse.

Kuna liinipikkus ei ole suur, siis peatähtsus on juhtme soojenemisel. Määrame seepärast juhtme ristlõike tabelite järgi.

Mootori voolutugevuse annab valem:

$$I = \frac{N \cdot 1000}{\eta \cdot \sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi}.$$

Antud mootorile võib võtta kasuteguriks $\eta = 0{,}88$ ja võimsusteguriks $\cos\varphi = 0{,}85$.

$$I = \frac{25 \cdot 1000}{0{,}88 \cdot 1{,}73 \cdot 220 \cdot 0{,}85} = 81 \text{ A.}$$

Tabelist VII leiame vastava ristlõike $q = 25$ mm^2. See ristlõige lubab voolutugevust $I = 91$ A.

Kontrollime pingekaotust juhtmetes:

$$\Delta U = 3 \cdot I \cdot \frac{\varrho \cdot l}{q} \cdot \cos \varphi ,$$

$$\Delta U = 1{,}73 \cdot 81 \cdot \frac{0{,}0178 \cdot 20}{25} \cdot 0{,}85 ,$$

$$U = 1{,}7 \text{ V} = 0{,}8\%$$

võrgupingest, mis on täiesti lubatav.

XXV peatükk.

MUUNDAJAD.

Transformaatorite rakendamine vahelduva elektrienergia ülekandmisel ja jaotamisel ning asünkroonmootorite kasutamine selle energia muundamisel mehaaniliseks energiaks andsid vahelduvvoolule suuri eemusi alalisvooluga võrreldes. Kuid mõned elektrienergia rakendamisalad vajavad ainult alalisvoolu, teistel juhtudel jälle alalisvool osutub vahelduvvoolust teatavatel tehnilistel põhjustel otstarbekohasemaks. Esimese juhu näitena võib nimetada kogu elektrokeemiat, teise näitena — elektrienergia rakendamist elektrisõidukitel, tööstusmasinate üksikvedu sujuva ja laiades piirides pöörete arvu reguleerimisega jne.

Siiski ka neil juhtudel kasutatakse enamasti võimsatest elektrijõujaamadest saadavat odavat keerdvoolu energiat, muundades selle kohal alalisvoolu energiaks.

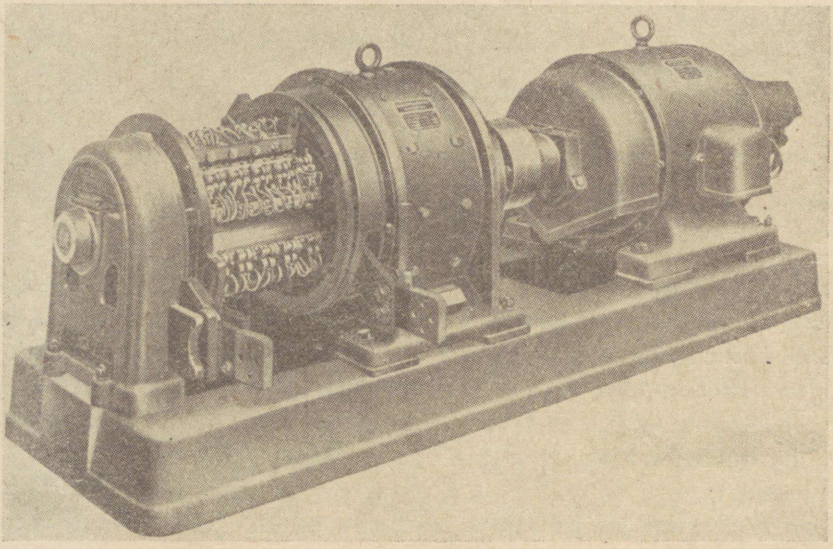
Tugevvoolutehnikas kasutatakse selleks ühte kolmest muundajate tüüpidest: mootorgeneraator, üheankru-umformer või elavhõbedaauru-alaldaja.

120. Mootorgeneraator.

Mootorgeneraatoriks nimetatakse agregaati, mis koosneb kahest mehaaniliselt seotud masinast: mootorist ja generaatorist. Kui seade on määratud vahelduvvoolu muundamiseks alalisvooluks, siis mootoriks valitakse harilikult keerdvoolu sünkroon- või asünkoonmootor ning generaatoriks — alalisvoolu haruvoolugeneraator. Joonisel 290 on kujutatud mootorgeneraator sünkroonmootoriga (pildil tagumine masin).

Asünkroonmootorit on hõlpsam käivitada, ta ei vaja sünkroniseerimisseadet ja on odavam sünkroonmootorist, kuid tarvitab alati reaktiivvoolu, s. o. töötab alati võimsusteguriga alla ühe. Sünkroonmootori rakendamine seevastu lubab kasutada teda isegi võrgu võimsusteguri parandamiseks, kui

selles leidub reaktiivvõimsuse tarvitajaid, näiteks asünkroonmootoreid. Asünkroonmootori eelnimetatud puudust võib parandada faaside kompensaatorite tarvitusele võtmisega, kuid siiski suurte võimsuste muundamisel on otstarbekohasemad sünkroonmootorid. Nende püsiv pöörete arv hõlbustab pinge hoidmist püsivana alalisvoolu poolel.



Joon. 290.

Mootorgeneraatori põhipuuduseks on kahe erimasina olemasolu; kummaski masinas esinevad kaod liitudes alandavad agregaadi kasutegurit.

Kui η_m ja η_g on mootori ja generaatori kasutegurid, siis kogu seadme kasutegur

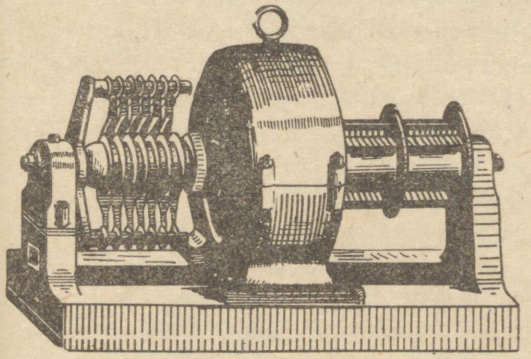
$$\eta = \eta_m \cdot \eta_g \cdot .$$

Ka on kahe masina hind küllalt kõrge, ning kaks masinat vajavad võrdlemisi palju ruumi ülesseadmiseks. Kõik see teeb muundamisjaama kalliks.

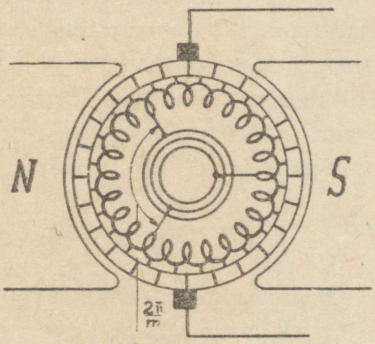
Seda tüüpi muundajate peamiseks paremuseks on elektrilise ühenduse puudumine vahelduv- ja alalisvoolu ahelate vahel. Seepärast mootori pinget võib valida sõltumatult alalisvoolu ahela pingest, mis võimaldab lülitada mootorit vahetult võrku ilma vahetransformaatorita isegi siis, kui tegemist on kõrgepingevõrguga (kuni 6000 V). Alalisvoolu poolel omakorda on võimalik teostada pinge reguleerimist igasugustes generaatori tüübiga võimaldatud piirides. Seega on vaadeldud muundamisviis eriti otstarbekohane, kui tekib vajadus alalisvoolu poolel pinge reguleerimiseks laiades piirides.

121. Üheankru-umformer.

Vahelduv — alalisvoolu üheankru-umformeril (joon. 291) on alalisvoolumasina ankur ja magnetsüsteem. Kuid ankru võllile, kollektorist vastaspoolsele otsale on kinnitatud kontaktrõngad. Viimased ühendatakse ankru mähisega selliselt, et see jaguneb mitmefaasilist süsteemi moodustavatesse sektsioonidesse. Sellise ankrumähise lihtsaim skeem on toodud joonisel 292.



Joon. 291.



Joon. 292.

Kontaktrõngaste kaudu muundaja ankur ühendatakse keerdvooluvõrguga ja kollektori harjadelt võetakse alalisvoolu. Elektromagnetite mähis on ühendatud kollektori harjadega nagu haruvoolumasinal. Vaadeldes muundajat kontaktrõngaste poolt, me näeme keerdvoolumähist, mida läbib keerdvool ja mis on paigutatud elektromagnetitest tekitatud püsivasse magnetväljasse, teiste sõnadega on tegemist sünkroonmasinaga, millel staatori ja rootori osad on ümber vahetatud. Kui sünkroonselt võrguga töötava sünkroonmasina rootorile avaldab mõju pöördmoment, mis põhjustab süsteemi pöörlemist, siis samasugune, kuid vastupidiselt suunatud pöördmoment peab mõjuma keerdvooluga toidetavale staatori kolmefaasilisele mähisele. See on kooskõlas mehaanika põhilausega — aktsioon on võrdne reaktsiooniga. Antud juhul elektromagnetid on kinnitatud staatorile ning püsivad paigal ja keerdvooluga toidetav kolmefaasiline mähis on asetatud rootorile. Järelikult võrguga sünkroniseeritud rootorile mõjub pöördmoment ja rootor pöörleb nagu hariliku sünkroonmootori rootor.

Kollektori poolt muundaja töötab alalisvoolu haruvoolu generaatorina.

Tõepoolest, rootori mähise juhtmed lõikavad pöörlemisel ergutusvälja jõujooni ja neis indutseeritud EMJ annab alalispinget kollektori harjadele.

Vahelduv- ja alalisvooluahelad on omavahel elektriliselt seotud. Muundaja üks ja seesama rootorimähis on lülitatud mõlemasse ahelasse. Seepärast vahelduvpinge muundaja kontaktrõngastel on kindlas vahekorras alalispingega kollektori harjadel.

Kuna pinge alalisvoolu poolel on alati määratud tarvitajate nimiandmetega, siis tuleb valida vastav vahelduvvoolu pinge. Seda võib saavutada ülitades vahelduvvoolu võrgu ja muundaja vahele kohase ülekandega transformaator. Seepärast üheankru-umformer töötab harilikult koos transformaatoriga. Vaatamata sellele, et nüüd on meil jälle kaks masinat, agregaadi transformaator-muundaja üldkasutegur on siiski parem mootorgeneraatori kasutegurist. See on seletatav sellega, et transformaatori kasutegur on alati parem mootori omast ja üheankru-umformeri kasutegur on parem alalisvoolugeneraatori kasutegurist.

122. Elavhõbedaauru-alaldaja. Füüsikaline protsess.

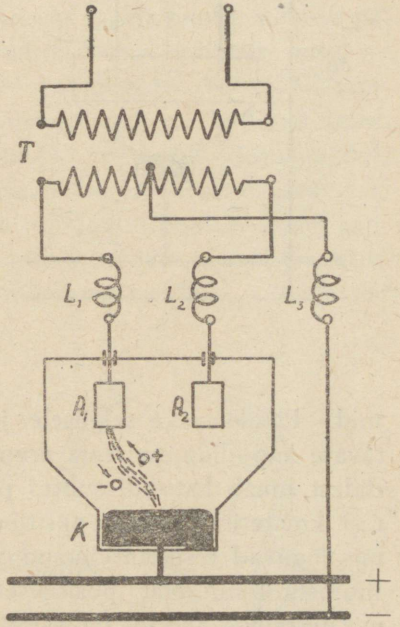
Elavhõbedaauru-alaldaja töötamise põhimõte on analoogiline eelvaadeldud gasotroni põhimõttega, selle vahega, et katoodiks siin hõõgniidi asemel on kõrgel temperatuuril hõõguv kraater elavhõbeda pinnal. Kraater hoitakse hõõgumisseisukorras (temperatuur umbes 2000° C) elavhõbeda pinnale pidevalt langevate positiivselt laetud ioonide löökidega. Need positiivsed ioonid tekivad nagu gasotroniski kraaterist väljalendavate elektronide kokkupõrgetel alaldaja kolbi täitva elavhõbeda auru molekulidega.

Seega kord süüdatud kraateri temperatuur hoitakse alal puhtautomaatselt nii kaua, kui vool läbib alaldajat. Gasotron aga kulutab selleks pidevalt energiat, kusjuures katoodi peab kaitsma positiivsete ioonide löökidest, mis hävitaksid gasotroni katoodi.

Joonisel 293 on kujutatud lihtsaima elavhõbedaauru-alaldaja agregaadi skeem. Agregaat koosneb järgmistest osadest: väljatoodud nullpunktiga transformaatorist või autotransformaatorist ja õhutühjast klaas- või metallanumast äärmiselt madala sissejäänud gaaside rõhumisega. Anumasse on paigutatud anoodid, mis on joonisel märgitud tähtedega A_1 ja A_2, ja anuma põhja on asetatud elavhõbeda katood K. Elavhõbeda pinnal hõõguva kraateri tekitamiseks ja kaartule loomiseks vajalikku süüteseadeldist ei ole joonisel näidatud. Sageli alaldajaid varustatakse mitmesuguste abiseadmetega. Nende skeem seetõttu veidi täieneb, nagu näiteks meie joonisel, induktiivtakistusega L_1, L_2 ja L_3.

Vaatleme selle lihtsaima skeemi abil vahelduvvoolu alaldamise protsessi. Ühefaasilise transformaatori sekundaarmähise otsad on ühendatud anoodidega. Transformaatori nullpunkt on alaldatud voolu negatiivseks pooluseks

ja on ühendatud võrgu negatiivse kogumislatiga. Positiivseks pooluseks on elavhõbeda katood, mis on ühendatud positiivse kogumislatiga. Pealüliti sisselülimisega anoodide A_1, A_2 ja katoodi vahel tekib vahelduvpinge amplituudiga, mis meie skeemis on võrdne anoodide vahel valitseva transformaatori sekundaarmähise poole pingega. Pärast pealüliti sisselülimist erilise süüteseadeldisega tekitatakse elavhõbeda pinnal lühiajalist sädet, mille tulemusena tekib helendav kraater temperatuuriga umbes 2000° C, mis on küllaldane elektronide vabaks tungimiseks läbi hõõguva elavhõbeda välispinna anuma õhutühja siseruumi. Negatiivsed elektronid väljudes elavhõbedast arendavad kiirust ning suunduvad sellele anoodile, millel antud momendil valitseb positiivne potentsiaal. Elektronide liikumisteekonnal algab kiirelt auruva elavhõbeda aurude intensiivne ioniseerumine, rõhumine kolvis suureneb ja anoodi ning katoodi vahel elavhõbeda aurudes tekib kaartuli. Elavhõbeda pinnal kunstlikult süüdatud kraater ei kustu, kuna püsib sellele langevate ioonide energia varal.



Joon. 293.

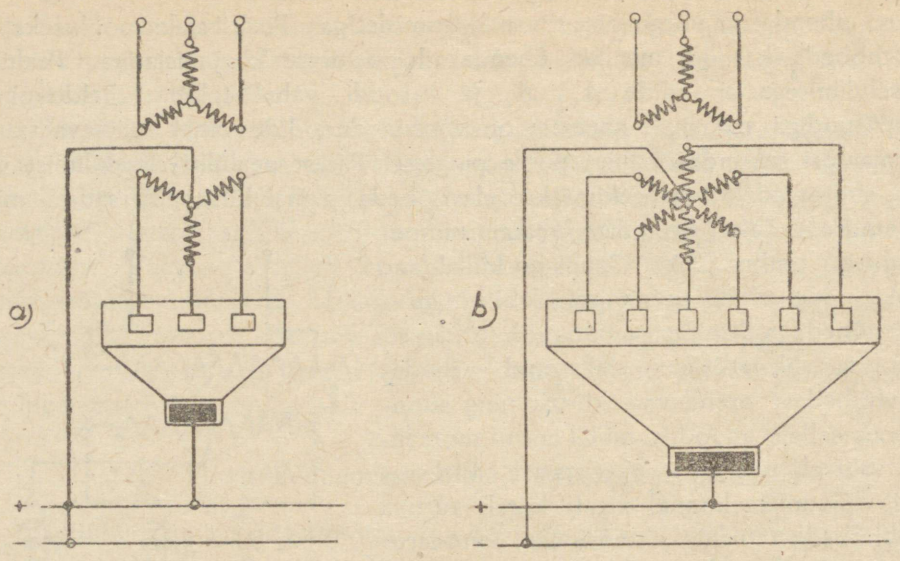
Kolvis tekkinud kaartuli põleb katoodi ja anoodi A_1 vahel niikaua, kui anoodil A_1 valitseb positiivne potentsiaal katoodi suhtes, s. o. poolperioodi vältel. Teise poolperioodi kestusel positiivne potentsiaal läheb üle anoodile A_2 ning kaartuli põleb selle anoodi ja katoodi vahel. Välisahelas voolusuund jääb püsivaks, nagu see oli selgitatud kenotroni alaldamisskeemi vaatlemisel.

Induktiivsed takistused L_1 ja L_2 aitavad säilitada kaartuld pinge nullpunkti läbimisel.

Siin vaadeldud ühefaasiline elavhõbedaauru-alaldaja ei ole kohane jõuseadmete toitmiseks alaldatud voolu tugevate pulsatsioonide tõttu.

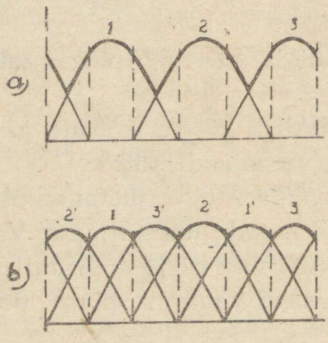
Peale selle võimsate ühefaasiliste alaldajate lülitamine üldkasutamisel olevatesse keerdvooluvõrkudesse põhjustab üksikute faaside ülekoormust. Vahelduvvoolu mitmefaasilise alaldamise teel on võimalik vältida ebaühtlast faaside koormust ning tunduvalt vähendada alaldatud voolu ja pinge pulseerimist.

Joonisel 294 on kujutatud kolme- ja kuuefaasilise voolualaldaja skee-



Joon. 294.

mid. Ei ole raske selgusele jõuda, et sekundaarmähise erifaasidega toidetavate anoodide suurema arvu korral osa õhutühjas anumas asuvatest anoodidest omab katoodi suhtes positiivset pinget, teine osa — negatiivset. Pärast kraateri süütamist positiivselt laetud anoodid tõmbavad ligi elektrone, mis liiguvad resultantjõu suunas katoodilt selle anoodi poole, mis evib antud momendil suurimat positiivset potentsiaali. Seega süttib anuma vaakuumis üksainus anood, mille potentsiaal katoodi suhtes on maksimaalne. Momendil, kui kahel naaberanoodil potentsiaalid ühtlustuvad, süttib teine anood. Edasi esimese anoodi potentsiaal väheneb, mille tagajärjel see anood kustub ning põlema jääb ainult teine anood ja põleb niikaua, kui tema potentsiaal omakorda ühtlustub kõlmanda anoodi potentsiaaliga jne. Kaartuli rändab pidevalt ühelt anoodilt teisele üle alaldaja kõikide anoodide.



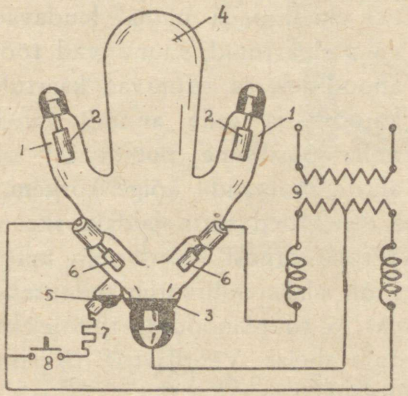
Joon. 295.

Joonisel 295 on näidatud alaldatud voolu kõverad kolmefaasilisele *(a)* ja kuuefaasilisele *(b)* alaldajale, kus juures on oletatud, et alaldatud voolu ahelas ei ole induktiivseid takistusi. Jooniselt 295 selgub, kuivõrd vähenevad pulsatsioonid faaside arvu suurendamisega, mis on tähtsaks eemuseks.

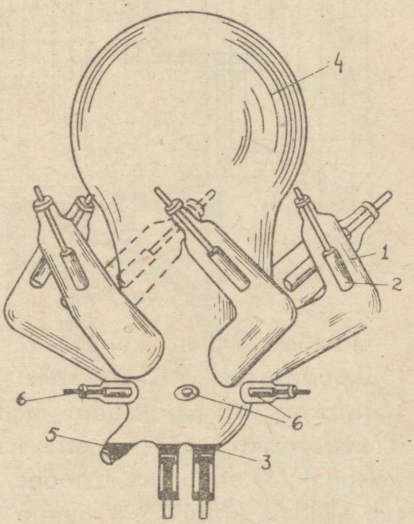
Elavhõbeda pinnal kraateri süütamiseks alaldajal on olemas lisaanood, nn. süüteanood. Mingisugusel viisil see anood viiakse süüteks ühendusse katoodiga üheks momendiks. Katkestamise momendil tekkiv säde kuumendab elavhõbeda pinda temperatuurini, mis on küllaldane kraateri tekkimiseks.

123. Elāvhõbedaauru-klaasalaldajad.

Elavhõbedaauru-klaasalaldaja agregaadi põhiosaks on klaaskolb, millesse pärast kahekordset õhu väljapumpamist — esimesel korral külmalt, teisel — soojendatult — jäänud gaaside rõhk ei ületa 0,1—1,0 mikronit elavhõbedasambast. Kolb valmistatakse seatina-kvarts- või, viimasel ajal, molübdeenklaasist. Viimane on eriti vastupidav nii mehaaniliselt kui ka temperatuuri kõikumistele ja temperatuuri ebaühtlasele jaotusele. Olenevalt faaside arvust, pingest ja voolutugevusest kolvid erinevad oma kuju ja mõõdete poolest ja on joonistel 296 ja 297 toodud välimusega. Klaaskolb koosneb allpool loetletud ja kummalgi joonisel ühesuguste numbritega märgitud osadest: *1* — klaasist anoodsarved, *2* — tööanoodid, *3* — elavhõbedakatood, *4* — kondensatsiooniruum, mis moodustab kolvi laiendatud osa elavhõbedakatoodi vastas, *5* — süüteanoodid,



Joon. 296.



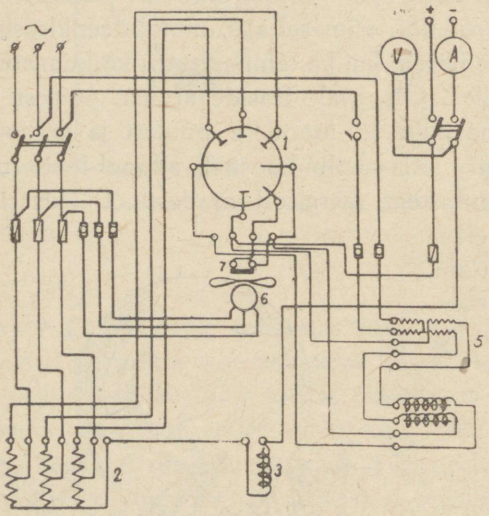
Joon. 297.

6 — kaks, harva kolm, ergutusanoodi, milliseid väikestes, ühtlase koormusega töötamiseks ettenähtud alaldajates ei valmistata.

Anoodid valmistatakse grafiidist, söest ja rauast. Anoodide kuju oleneb neid läbivast voolutugevusest. Väikestes alaldajates on nad harilikult silindrilised, suurtes aga suurendatakse anoodide välispinda, andes neile tähe-

kujuline ristlõige. Anoodi välispinna suurusest sõltub tema töötemperatuur, mis ei tohi ületada 700° C, s. o. ei tohi väljuda punase hõõgumise piiridest.

Kondensatsiooniruum on elavhõbeda auru intensiivse kondenseerumise kohaks. Aurumine toimub katoodi kraatris. Süüteanoodi teostatakse tavaliselt väikese sarvekesena kolvi alumises osas, mis on selliselt asetatud, et kolvi kallutamisel mõne kraadi võrra püstasendist süüteanoodi elavhõbe ühineb katoodi elavhõbedaga. Kolvi pöördumisel püstasendisse anoodi katoodiga ühendav elavhõbedast sild katkeb.



Joon. 298.

Süüteseadeldise tegevus (joon. 296) seisneb selles, et kolvi kallutamisel ja süütenupu *(8)* lülitamisel läbi elavhõbeda sulgub transformaatori *(9)* ahel ja süüteahelas tekib takistusega *(7)* piiratud vool. Kui nüüd viia kolb tagasi esialgsesse vertikaalasendisse, siis elavhõbedast silla katkemise momendil selle pinnal tekib üheks momendiks sädeme poolt kuumutatud punkt. Sellest punktist elavhõbeda pinnal lendavad välja elektronid, suunduvad tööanoodidele ja süütavad kaartule katoodi ja selle anoodi vahel, mille positiivne potentsiaal on antud momendil kõige kõrgem.

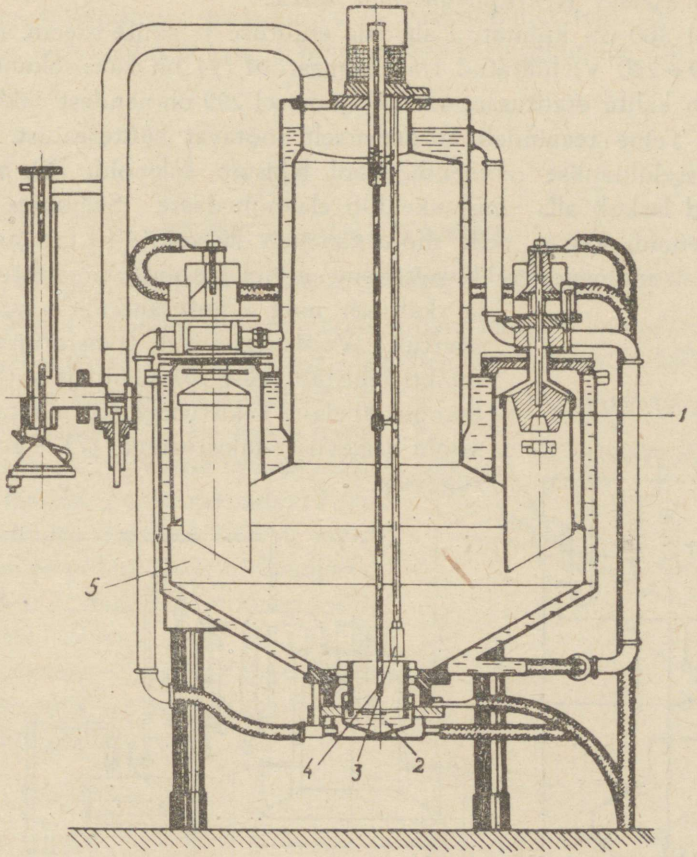
Joonisel 298 on kujutatud kolmefaasilise elavhõbedaauru-alaldaja skeem jõukoormusele. Alaldaja tööanoodid saavad toitevõrgust keerdvoolu autotransformaatori *(2)* kaudu. Selle nullpunkt on alalisvooluvõrgu miinuseks. Transformaator *(5)* on ette nähtud ergutus- ja süüteanoodide toitmiseks. Paispool *(3)* silub pulsatsioone alaldatud voolu ahelas. Ventilaator *(6)* jahutab alaldaja kolbi. Survenupp *(7)* lülib süüteahela.

Kolvi garanteeritud eluiga on 800 — 1000 tundi. Klaaskolvid ehitatakse voolutugevustele 5 — 350 A.

124. Elavhõbedaauru-metallalaldajad.

Elavhõbedaauru-metallalaldajad on paremad klaasalaldajatest selle poolest, et vaakuumanuma metallkonstruktsioon on vastupidavam klaaskolvist dünaamilistele koormustele, mis tekivad alaldajas lühistel, ja võimaldab ehitada

üksikagregaate suurtele voolutugevustele — 500 kuni 12000 A. Peale selle metallist vaakuumanum paremini talub ebaühtlast soojenemist ja temperatuuri kõikumisi, mis hävitaksid klaaskolvi. Jahutamiseks osutub võimalikuks seepärast kasutada intensiivset vesijahutust, mis annab metallalaldajatele väärtusliku kompaktsuse.



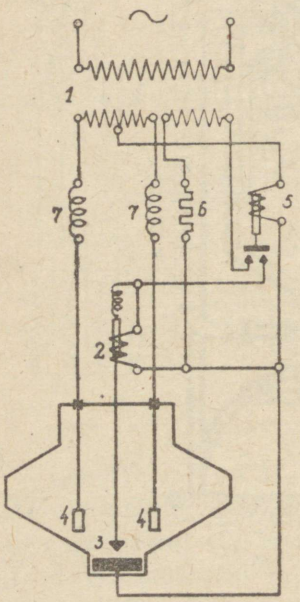
Joon. 299.

Joonisel 299 on kujutatud lõikes S. M. Kirovi nimelise tehase „Elektrosila" elavhõbedaauru-metallalaldaja. Alaldaja lehtterasest vaakuumanum *(5)* on valmistatud kahekordse koonusena silindrilise kondensatsiooniruumiga ülemises osas, kus kondenseeruvad elavhõbeda keemisel tekkinud aurud. Anuma alumises osas asub katood *(2)*. Katoodi metallpõhi on isoleeritud anuma alumisest osast portselaniga. Elavhõbeda hulk katoodis on 15 kuni 50 kg, sõltuvalt alaldaja tüübist.

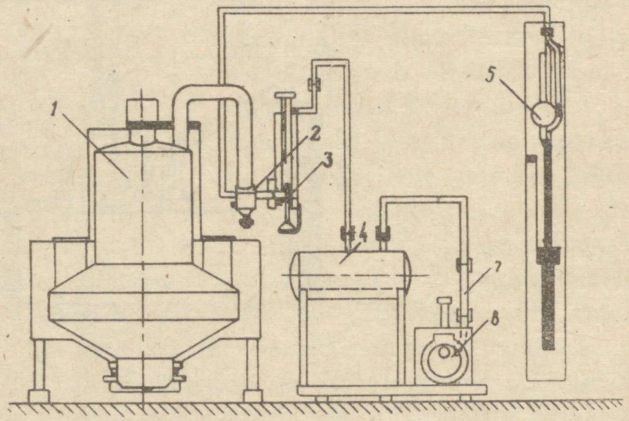
Kondensatsiooniruum on ümbritsetud anuma külge keevitatud kuue anoodsilindriga, millede sisemuses asuvad anoodid *(1)*. Anoodid valmistatakse volframterasest.

Vaakuumanum on ümbritsetud veesärgiga, millest juhitakse läbi jahutusvett. Süütamiseks on ette nähtud süüteanood *(4)*, mida juhib kondensatsiooniruumi peal asetsev elektromagnetiline seade.

Joonisel 300 on kujutatud alaldaja ergutuse ja süüte skeem. Madalpinge võrku (120—220 V) lülitatud transformaatoril *(1)* on kaks sekundaarmähist. Üks toidab kahte ergutusanoodi *(4)* (joonisel 299 on nendest näidatud ainult üks *(3)*). Teine teenindab automaatselt töötavat süüteseadist. Transformaatori sisselülitamise momendil vool läbistab solenoidi *(2)*, mille mõjul süüteanood laskub alla ning sukeldub elavhõbedasse. Seejuures anood lühistab solenoidi katsat, selle mõju väheneb ja vedru tõstab anoodi üles. Katkestamise momendil tekkiva sädeme mõjul katoodi pinnale tekib kraater ja katoodi ning ergutusanoodide vahel süttib kaartuli. Vool katoodist transformaatori keskpunkti läbistab relee *(5)* mähist ja katkestab süütevoolu ahela. Takistusega *(6)* piiratakse süütevoolu tugevust, takistustega *(7)* — ergutusvoolu tugevust.



Joon. 300.



Joon. 301.

Raskeks probleemiks osutub kõrge vaakuumi — 0,1—1,0 mikronit elavhõbeda sambast — säilitamine. Vaatamata eriti hoolikalt teostatud tihendustele, on vältimatu aeglane vaakuumi langemine anumas. Vajaliku vaakuumi säilitamiseks kasutatakse joonisel 301 kujutatud seadet.

Vaakuumanuma evakueerimiseks on ette nähtud kaks pumpa. Kõrgvaakuumpump *(3)* on ühendatud otse anumaga *(1)* ning töötab pidevalt. Kuid see pump ei saa töötada otsekohe atmosfääri, vaid nõuab eelhõrendust suuruses mõni millimeeter elavhõbeda sambast. Seepärast kõrgvaakuumpump, ühendatakse nn. eelvaakuumpaagiga *(4)*, kust õhku perioodiliselt eemaldatakse pumbaga *(6)*. Vaakuumi kontrollimiseks kasutatakse manomeetreid väga kõrgete hõrenduste mõõtmiseks — vaakuummeetreid *(5)*. Vaakuumkraan *(2)* on ette nähtud anuma hermeetiliseks sulgemiseks, kui alaldaja ei tööta.

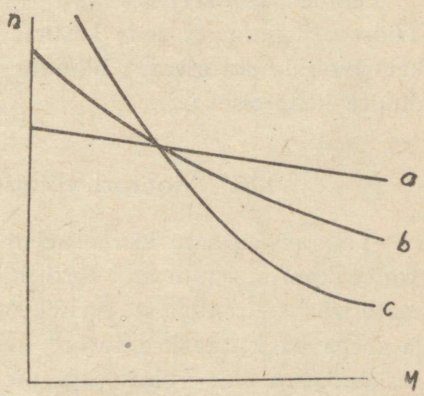
XXVI peatükk.

ELEKTRIGA KÄITAMINE.

125. Mootori valik karakteristiku ja võimsuse järgi.

Olenevalt töö iseloomust eritüübilised tööstusmasinad nõuavad mootoritelt teatavaid mehaanilisi eriomadusi. Tähtsaimaks mootori karakteristikuks tööstusmasinale sobivuse seisukohast on mehaaniline karakteristik. See annab mootori pöörete arvu sõltuvuse mootori võllile tööstusmasina poolt rakendatud takistusmomendist. Joonisel 302 on kujutatud mootorite põhitüüpide mehaanilised karakteristikud. Märkides mootori pöörete arvu tühijooksul n_0-ga ja pöörete arvu nimikoormusel n_n-ga, võime kirjutada avaldise, mis iseloomustab mootori karakteristiku „painduvust":

$$s = \frac{n_0 - n_n}{n_n} \cdot 100\,\%.$$



Joon. 302.

Kui s väärtus ei ületa 4—6%, siis on tegemist nn. kareda karakteristikuga (joon. 302-*a*). Enamik metallitöötlemise masinaid ja kõik rühmajamid nõuavad mootoritelt karedat karakteristikut. Nende põhiomaduseks on väike pöörete arvu muutus tugevatel koormuse kõikumistel. Sellised karedad karakteristikud on keerdvoolu asünkroonmootoritel ja alalisvoolu haruvoolumootoritel.

Seepärast mainitud juhtudel kasutatakse just neid mootoreid.

Tööstusmasinad, mis töötavad löökkoormusega, nagu näiteks pressid, käärid jne., vajavad veidi pehmendatud karakteristikut (joon. 302-*b*). Nende

masinate iseloomustavaks omaduseks on järsk takistusmomendi muutumine. Teatavasti võimsuse määrab momendi korrutis nurkkiirusega

$$N = M \cdot \omega.$$

Vähendades nurkkiirust (pöörete arvu languse tagajärjena) momendi kasvamisel, pehmendatud karakteristikuga mootor töötab väiksemate võimsuste kõikumistega, mis lubab vähendada mootori mõõteid ja soodsalt peegeldub kogu toitevõrgu töös. Peale selle kiiruse vähendamine võimaldab inertsmasside (mootori rootor ja tööstusmasina liikuvad osad) kineetilise energia ärakasutamist, tasandades seega veelgi mootori koormust.

Pehmendatud karakteristik on omane alalisvoolu kompaundmootorile. Keerdvoolumootoritel karakteristiku pehmendamist saavutatakse takistuste lülitamisega faasirootorisse, millega suurendatakse libistust. Viimane viis ei ole majanduslikult otstarbekohane, sest kestvalt sisselülitatud takistustes ilmnevad mootori kasutegurit vähendavad energia kaod. Seepärast võimsatele pressidele, kääridele ja ms. tööstusmasinatele on soovitavam alalisvoolumootor.

Pehme karakteristik on (joon. 302-*c*) alalisvoolu peavoolumootorie Tööstustingimustes seda kasutatakse kraanade (mis siiski sageli varustatakse keerdvoolumootoritega), akumulaatoritelt töötavate elektrivankrite ja muude dukite käitamiseks.

126. Mootori võimsuse valik kestvaks töötamiseks.

Tööstusmasinate käitamisel nii rühm- kui ka üksikveol töötavate mootorite koormus muutub võrdlemisi laiades piirides. Sõltuvalt töödeldavast materjalist, ettenihkest ja lõikekiirusest, muutub võimsus pinge lõiketeral ja seega ka käitaval mootoril. Selliste töövõimsuste kõikumiste tõttu on raskendatud õige võimsusega mootori valik.

Selgitame tingimused, milliseid peab rahuldama mootori võimsus. Eespool (p. 104) käsiteldi põhjalikult mootorite soojenemist tööprotsessis. Nägime, et koormuse muutusega muutub ka võrgust tarvitatav voolutugevus ja koos sellega ajaühikus eralduv soojuse hulk mootoris ning mootori temperatuur. Teiselt poolt mainisime, et mootori soojenemine ei tohi ületada tabelis IV toodud väärtusi. Siit järgneb tähtsaim tingimus, mida mootor peab rahuldama.

Mootori võimsus peab olema selline, et antud koormustingimustel selle temperatuur ei ületaks normidega ettekirjutatud väärtusi.

Kui mootori koormus pikemat aega jääb püsivaks, siis püstitatud tingimust rahuldava mootori võimsuse valik ei tekita raskust.

Sellise kestva ja püsiva koormuse näitena võib tuua tsentrifugaalpumba, ventilaatori jms. käitamist. Siin tuleb määrata tööprotsessi võimsus, arvesse võtta kaod masinas, ja selliselt saadud võimsus ongi mootori nimivõimsuseks (mootori sildil märgitud võimsuseks). Näite varal selgitame pumbamootori võimsuse valikut.

Näide 41. Õlipump annab 4 l/sek. õli rõhuga 1,5 atü. Pumba kasutegur on 0,7. Määrata mootori võimsus.

Määrame pumba kasuliku võimsuse vedeliku rõhu ja mahu korrutisena:

$$N = 1{,}5 \text{ kg/cm}^2 \times 4000 \text{ cm}^3/\text{sek.} = 6000 \text{ kg} \cdot \text{cm/sek.}$$

$$N = 6000 \cdot 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{m/sek.} = \frac{6000 \cdot 10^{-2}}{102} \text{ kW};$$

$$N = 0{,}59 \text{ kW}.$$

Arvestades kadudega pumbas, saame võimsuse mootori võllil

$$N_m = \frac{N}{\eta} = \frac{0{,}59}{0{,}7} = 0{,}84 \text{ kW}.$$

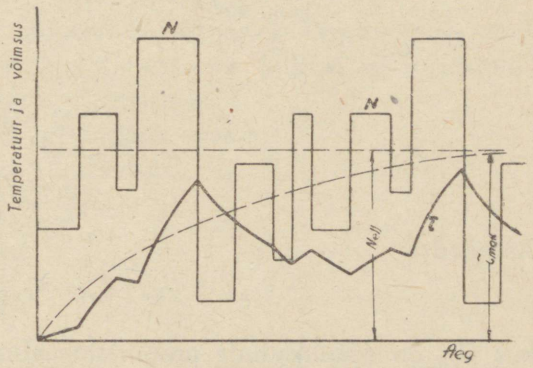
Mootori nimivõimsuseks valime kataloogist lähima kõrgema võimsuse

$$N_m = 0{,}85 \text{ kW}.$$

Muutuva koormuse tingimustes võimsuse valik on raskendatud.

Kujutame graafiliselt võimsuse muutust aja funktsioonina mingi vabalt valitud koormuse puhul (joon. 303).

Koos võimsuse muutusega muutuvad ka kaod mootoris ja sellega seotud sekundis tekkiv soojuse hulk. Soojenemiskõver omandab joonisel 303 antud kuju (kõver τ).



Joon. 303.

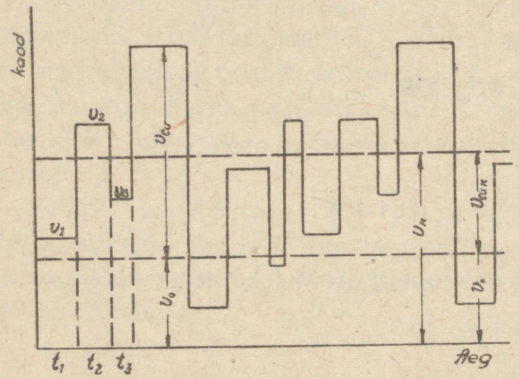
Meie ülesandeks võimsuse valikul jääb nüüd sellise efektiivse koormuse N_{ef} määramine, mis samas ajavahemikus tõstab mootori temperatuuri sama väärtuseni τ_{max}, mille andis antud muutuv koormus. Kuna temperatuur oleneb mootoris tekkivast soojusehulgast ja see omakorda kadudest mootoris, siis ülesseatud tingimust

võib pidada täldetuks, kui leiame kestva koormuse väärtuse, millejuures kaod on ekvivalentsed antud muutuval koormusel tekkivate keskmiste kadudega.

Me teame, et kõik mootori kaod ei olene koormusest. Keskmiste kadude määramisel võib arvestamata jätta koormusest mitteolenevaid kadusid. Koormusest olenevad kaod aga on võrdelised voolutugevuse ruuduga.

Olgu võimsuskaod ajavahemikus t_1 võrdsed v_1, ajavahemikus t_2—v_2 jne. (joon. 304), siis keskmised kaod kogu tööperioodi vältel on:

$$v_k = \frac{v_1 t_1 + v_2 t_2 + v_3 t_3 + \dots}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots}.$$



Joon. 304.

või n ajavahemiku vältel

$$v_k = \frac{\sum_{k=1}^{k=n} v_k t_k}{\sum_{k=1}^{k=n} t_k}.$$

Koormusest mitteolenevad kaod on võrrandi vasakpoolses osas ja kõikides parempoolse osa liikmetes ühesugused, seepärast neid võib välja jätta ning arvestada ainult koormusest olenevate kadudega.

$$v_{\mathrm{Cu}\,k} = \frac{\sum_{k=1}^{k=n} v_{\mathrm{Cu}\,k} \cdot t_k}{\sum_{k=1}^{k=n} t_k}.$$

Asendades

$$v_{\mathrm{Cu}\,k} = C_{\mathrm{Cu}} \cdot I_{ef}^2;\ v_{\mathrm{Cu}\,k} = C_{\mathrm{Cu}} \cdot I_k^2,$$

kus C_{Cu} on džaulikadude proportsionaalsuse tegur, I_k— voolutugevus graafikule vastava võimsuse puhul ja I_{ef}— keskmistele kadudele vastav efektiivvoolutugevus. Saame

$$C_{\mathrm{Cu}} \cdot I_{ef}^2 = \frac{\sum_{k=1}^{k=n} C_{\mathrm{Cu}} \cdot I_k^2 \cdot t_k}{\sum_{k=1}^{k=n} t_k}.$$

Tuues välja püsivsuuruse C_{Cu} summa märgi ette ja koondades seda sama suurusega võrrandi vasakpoolses osas, saame:

$$I_{ef}^2 = \frac{\sum_{k=1}^{k=n} I_k^2 \cdot t_k}{\sum_{k=1}^{k=n} t_k},$$

kust

$$I_{ef} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{k=n} I_k^2 \cdot t_k}{\sum_{k=1}^{k=n} t_k}}.$$

Saadud nn. keskmine kvadratuurne voolutugevuse väärtus rahuldab püstitatud tingimust ja nimelt: selline vool, voolates tööstusmasina antud tööperioodi vältel, tõstab mootori temperatuuri sama palju, kui seda teeks antud graafiku järgi muutuv koormus. Sellele voolutugevusele vastav mootori võimsus ongi mootori nimivõimsuseks. Et leida seda võimsust, tuletame meelde, et elektrilise võimsuse määrab voolutugevuse korrutis püsiva võrgupingega. Suurema veata võib seepärast oletada, et kasulik võimsus on võrdeline voolutugevusega, s. o.

$$I = C \cdot N.$$

Selle oletusega me eeldame, et mootori kasutegur, ja keerdvoolumootoritel samuti võimsustegur, ei olene koormusest, mis küll ei vasta tõsioludele, kuid põhjustab ainult tähtsusetu ebatäpsuse.

Asetades selle avaldise eelmisse võrrandisse, saame:

$$C \cdot N_{ef} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{k=n} C^2 \cdot N_k^2 \cdot t_k}{\sum_{k=1}^{k=n} t_k}}.$$

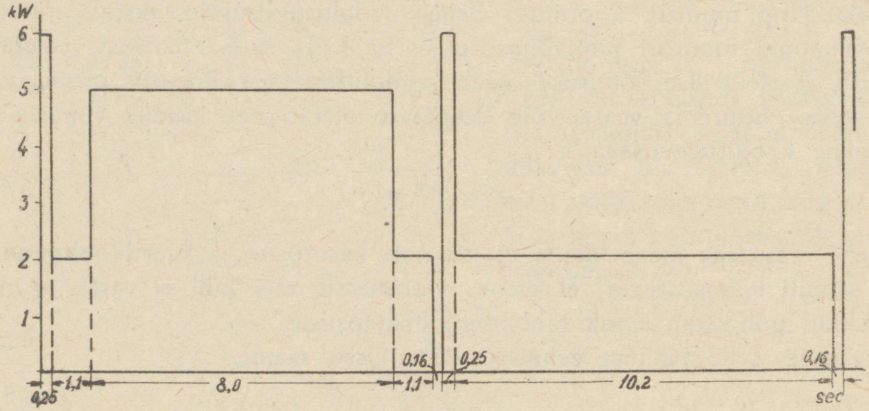
või, tuues C^2 summa märgi ette, juurides ja koondades sama väärtusega võrrandi vasakpoolses osas, saame lõplikult:

$$N_{ef} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{k=n} N_k^2 \cdot t_k}{\sum_{k=1}^{k=n} t_k}}.$$

See keskmise kvadratuurse võimsuse valem lubab määrata mootori võimsust, kui on teada koormuse graafik.

Näitena vaatleme mootori võimsuse valikut harilikule hööveipingile, mille koormuse graafik on toodud joonisel 305.

Näide 42. Hööveipinki käitatakse keerdvoolu asünkroonmootoriga, mille võll hammasajami ja hammaslati kaudu on ühendatud pingi lauaga. Ajavahemikul t_1, mis võrdub 0,25 sek., mootorit koos pingiga kiirendatakse kuni töökäigu täiskiiruseni. See käivitusprotsess teostub suure voolutugevusega, mis annab graafikus kõrge tipu. Ajavahemikul $t_2 = 1{,}1$ sek. laud toimetab töödeldava eseme lõiketera alla. Järgmisel ajavahemikul $t_3 = 8$ sek. toimub laastu võtmine; seejärel lõiketera eemaldub esemest ja ajavahemiku $t_4 = 1{,}1$ sek. mööudes mootor lahutatakse võrgust ning mehaaniline pidur peatab mootori. Mootor jääb seisma aja $t_5 = 0{,}16$ sek. mööudes pidurdamise algusest. Nüüd mootor reverseeritakse ja käivitatakse vastassuunas. Ajaga $t_6 = 0{,}25$ sek. mootor saavutab tagasikäigu kiiruse, mis ühe kiiruseastmega keerdvoolumootoril on arusaadavalt võrdne töökäigu kiirusega.



Joon. 305.

Tagasikäik kestab $t_7 = 10{,}2$ sek. Tagasikäigu lõpul mootor pidurdatakse mehaanilise piduriga ja jääb seisma ajavahemikuks $t_8 = 0{,}16$ sek. Siis mootor reverseeritakse uuesti ja terve töötsükkel kordub. Üksikute mainitud protsesside võimsused on märgitud graafikusse joonisel 305.

Mootori võimsuse määrame valemiga

$$N_{ef} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{k=n} N_k^2 \cdot t_k}{\sum_{k=1}^{k=n} t_k}}.$$

Asendades vastavad andmed graafikust:

$$N_{ef} = \sqrt{\frac{6^2 \cdot 0{,}25 + 2^2 \cdot 1{,}1 + 5^2 \cdot 8 + 2^2 \cdot 1{,}1 + 6^2 \cdot 0{,}25 + 2^2 \cdot 10{,}2}{0{,}25 + 1{,}1 + 8 + 1{,}1 + 0{,}16 + 0{,}25 + 10{,}2 + 0{,}16}};$$

$$N_{ef} = 3{,}55 \text{ kW}.$$

Valime kataloogist lähima suurema mootori võimsuse

$$N_n = 4{,}3 \text{ kW}.$$

Keskmise kvadratuurse võimsuse järgi valitud mootor ei ülekuumene töötades antud graafiku järgi. Kuid soojenemistingimustega ei piirdu kõik tingimused, milledele peab vastama mootori võimsus. Mootori ülekoormuse võimalus oleneb mootori tüübist ja seda tuleb tingimata arvestada võimsuse valikul. Alalisvoolumootorite ülekoormus on piiratud häirevaba kollektori töötamisega. Suurtel koormustel esineb kollektori sädelemine, mis võib vigastada kollektorit. Kaasaegsed alalisvoolumasinad peavad taluma 50% ülekoormust 15 sek. vältel.

Keerdvoolu-asünkroonmootorite ülekoormus on piiratud nende vääratusmomendiga, mida võib arvestada lühisrootoriga mootoritel 1,65-kordsena ja faasirootoriga mootoritel 1,8-kordsena nende nimivõimsusest.

Olles valinud mootori keskmise kvadratuurse võimsuse järgi, tuleb seda kindlasti kontrollida ülekoormuse võimalusele. Kui mootori maksimaalne koormus on N_{max}, siis ta nimivõimsus peab rahuldama tingimust:

alalisvoolumootoritel:

$$N_n \geqslant \frac{N_{max}}{1{,}5};$$

keerdvoolu-asünkroonmootoritel:

lühisrootoriga

$$N_n \geqslant \frac{N_{max}}{1{,}65};$$

faasirootoriga

$$N_n \geqslant \frac{N_{max}}{1{,}8}.$$

Meie näites

$$N_{max} = 6 \text{ kW}$$

$$\frac{N_{max}}{1{,}65} = 3{,}64 \text{ kW},$$

mis on tunduvalt madalam meie poolt valitud nimivõimsusest $N_n = 4{,}3$ kW. Seega võimsuse suhtes valitud mootor rahuldab kõik tingimused.

127. Mootori võimsuse valik korduv-lühiajaliseks töötamiseks.

Enamasti mootori koormus on sedavõrd ebamäärane, et ei ole võimalik ehitada koormuse graafikut. Sel korral on võimalik valida mootorit selle ekspluatatsioonitegurite kasutamisel.

Ekspluatatsioonitegurid iseloomustavad mootori kasutamise astet ajas ja võimsuses.

Ajas kasutamise tegur (ehk lülitustegur) on mootori sisselülimise aja T suhe kogu ajaga T_0, milles on arvesse võetud ka mootori seisuajad:

$$e' = \frac{T}{T_0}.$$

Nii näiteks, kui mootor töötab viis tundi seitsmetunnilisest vahetusest siis lülitustegur on

$$e' = \frac{5}{7} = 0{,}71.$$

Võimsuse kasutamise tegur (ehk koormustegur) on keskmise võimsuse suhe maksimaalse võimsusega:

$$e'' = \frac{N_k}{N_{\max}}.$$

Nende tegurite korrutist nimetatakse üldiseks ekspluatatsiooniteguriks:

$$e = e' \cdot e''.$$

Näide 43. Kui ühe vahetuse vältel — 7 tundi — mootor töötab ühe tunni maksimaalvõimsusega 4 kW, kaks tundi võimsusega 2,5 kW, poolteist tundi võimsusega 2 kW ja ülejäänud aja seisab, siis selle lülitustegur on:

$$e' = \frac{1+2+1{,}5}{7} = \frac{4{,}5}{7} = 0{,}64.$$

Koormustegur on:

$$e'' = \frac{N_k}{N_{\max}},$$

kus

$$N_k = \frac{\sum_{k=1}^{k=n} N_k \cdot t_k}{T} = \frac{4 \cdot 1 + 2{,}5 \cdot 2 + 2 \cdot 1{,}5}{1+2+1{,}5} = 2{,}7 \text{ kW},$$

kust

$$e'' = \frac{2{,}7}{4} = 0{,}68$$

ja üldine ekspluatatsioonitegur

$$e = e' \cdot e'' = 0{,}64 \cdot 0{,}68 = 0{,}43.$$

Teades maksimaalvõimsust ja mootori ekspluatatsiooni tegurit, võib määrata mootori võimsust ligikaudse valemiga

$$N = N_{\max} \cdot \sqrt{e}.$$

Näide 44. Valida mootor puurmasinale maksimaalse (passi-) võimsusega $N_{max} = 4$ kW. Masin on universaaltüüpi.

Valides ekspluatatsioonitegurid e' ja e'' vastavalt 0,6 ja 0,7, saame täieliku ekspluatatsiooniteguri

$$e = e' \cdot e'' = 0{,}42$$

ja mootori võimsuse

$$N = N_{max} \cdot \sqrt{e} = 4 \cdot \sqrt{0{,}42} = 2{,}6 \text{ kW}.$$

Lähim mootor kataloogist on

$$N_n = 3{,}2 \text{ kW}.$$

Maksimaalne ülekoormus

$$\frac{N_{max}}{N_n} = \frac{4}{3{,}2} = 1{,}25 < 1{,}65$$

järelikult on lubatav.

Toodud valemid võimsuse valikuks, nii ekspluatatsioonitegurite abil kui ka keskmise kvadratuurse võimsuse järgi, on kasutatavad ainult lühiajaliste ja muutuva koormusega tööperioodide ja lühiajaliste töövaheaegade puhul. Üksikute perioodide kestus ei tohi ületada 10—15 minutit.

Alalis- ja vahelduvvoolu kraanamootorid on arvestatud korduv-lühiajalisele töörežiimile. Nagu eespool nägime, sellist töörežiimi iseloomustavad kaks suurust: võimsus ja tööperioodi kestuse tegur. Viimane on tööperioodi suhe kogu töötsükli kestusega (tööaeg + vaheajad).

$$\varepsilon = \frac{\Sigma t}{\Sigma t + \Sigma t_0} \cdot 100. \qquad (108)$$

Siin Σt — mootori tööaegade summa ja Σt_0 — töövaheaegade summa sama ajavahemiku vältel.

Kataloogides antakse võimsused tööperioodi kestuse teguri kolme väärtuse jaoks:

$$\varepsilon = 15\%, \quad \varepsilon = 25\% \text{ ja } \varepsilon = 40\%.$$

Korduv-lühiajalisele töörežiimile arvestatud mootori võimsuse valik teostatakse järgmiselt. Määratakse keskmine kvadratuurne võimsus N_e ilma vaheaegu arvestamata — valemi (106) abil ja relatiivne lülitusaeg ε. Viimast võib leida antud tsüklite arvust tunnis z ja mootori töötamiskestusest ühe tsükli vältel t.

Kui ajad t ja t_0 (vaheaeg) on antud sekundites, siis tsüklite arv

$$z = \frac{3600}{t + t_0}$$

või, asendades valemisse (108)

$$\varepsilon = \frac{t \cdot z}{3600} \cdot 100.$$

Kuna arvutatud ε harilikult läheb lahku kataloogis märgitud väärtustest, siis võimsus N_e tuleb ümber arvutada kataloogi lähima ε_k väärtusele. Selleks võib kasutada suhet

$$\frac{N^2}{N_e^2} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_k},$$

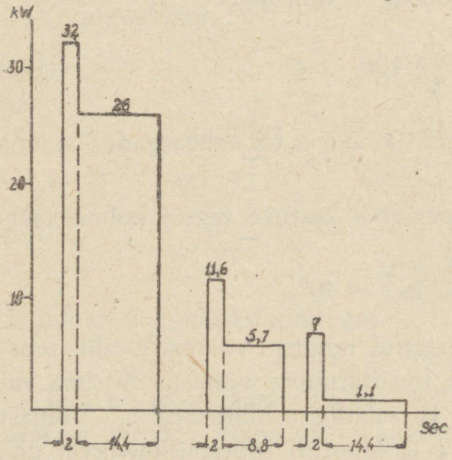
kust otsitav mootori võimsus

$$N = N_e \cdot \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_k}}. \qquad (109)$$

Näide 45. Määrata keerdvoolu-kraanamootori võimsus, kui kraana töötab joonisel 306 näidatud koormusgraafiku järgi. Tsüklite arv tunnis $z = 23$. Tsükkel koosneb neljast operatsioonist: raskuse tõstmine, tühja konksu tõstmine, tühja konksu allalaskmine ja raskuse allalaskmine. Viimane operatsioon teostub väljalülitatud mootoriga ja seepärast graafikus joonisel 306 puudub.

Määrame keskmise kvadratuurse võimsuse N_e valemi (106) abil.

$$N_e = \sqrt{\frac{32^2 \cdot 2 + 26^2 \cdot 14{,}4 + 11{,}6^2 \cdot 2 + 5{,}7^2 \cdot 8{,}8 + 7^2 \cdot 2 + 1{,}1^2 \cdot 14{,}4}{43{,}6}}$$



Joon. 306.

$$N_e = \sqrt{\frac{12466}{43{,}6}} = 16{,}9 \text{ kW}.$$

Relatiivne lülitusaeg on:

$$\varepsilon = \frac{t \cdot z}{3600} \cdot 100 = \frac{43{,}6 \quad 23}{3600} \cdot 100 = 28\%.$$

Arvutame ümber võimsuse lähimale kataloogi väärtusele $\varepsilon_k = 25\%$

$$N = N_e \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_k}} = 16{,}9 \sqrt{\frac{28}{25}} = 17{,}9 \text{ kW}.$$

Valime mootori kataloogist võimsusega 22 kW.

128. Mootori valik rühmajamile.

Mootori võimsuse rühmajamile määravad üksikute tööstusmasinate võimsused, mida käitatakse antud transmissioonilt, ja nende masinate ekspluatatsioonitegurid. Neil andmetel leitakse antud transmissiooni tööstusmasinate poolt tarvitatav keskmine võimsus.

Kui tööstusmasina võimsus on N_{tm} ja tema ekspluatatsioonitegurid e'_{tm} ja e''_{tm}, siis tööstusmasina keskmine tarvitatav võimsus on:

$$N_{tm\ ksk} = N_{tm} \cdot e'_{tm} \cdot e''_{tm}.$$

Kõikide tööstusmasinate poolt tarvitatav keskmine võimsus on võrdne üksikute antud transmissioonile ühendatud masinate keskmiste võimsuste summaga

$$\Sigma\ N_{tm} e'_{tm} e''_{tm}.$$

Mootori keskmise võimsuse leiame arvestades transmissiooni kasuteguri η_{tr}:

$$N_{m\ ksk} = \frac{\Sigma\ N_{tm} e'_{tm} e''_{tm}}{\eta tr}. \qquad (110)$$

Kui transmissiooniga käitatakse võrdlemisi suurt arvu töö iseloomu ja võimsuse poolest ühesuguseid tööstusmasinaid (20—25 tööstusmasinat), siis koormus transmissioonil on ühtlane ja seda võib võtta püsivana ning võrdsena keskmise võimsusega.

Sel juhul valem (110) annab otsekohe käitamismootori võimsuse.

Väikese tööstusmasinate arvuga, ja iseäranis erilaadiliste tööstusmasinate puhul transmissioonil on märgata suuremaid või väiksemaid võimsuse kõikumisi. Siis keskmine võimsus, leitud valemi (110) abil, osutuks mitteküllaldaseks ning mootor ülekuumeneks. Valemiga (110) leitud võimsust tuleb seetõttu suurendada 10—20% võrra.

Näide 46. Transmissioon teenindab 5 treipinki passivõimsusega à 1,5 kW, ja 4 automaatset stantspressi, võimsusega à 2 kW.

Ekspluatatsiooni tegurid treipinkidele valime

$$e'_{tm} = 0{,}5 \text{ ja } e''_{tm} = 0{,}6.$$

Automaatidel lülitustegur on suurem; valime

$$e'_{tm} = 0{,}8 \text{ ja } e''_{tm} = 0{,}6.$$

Siis transmissiooni keskmine koormus on:

$$\Sigma N_{tm} \cdot e'_{tm} \cdot e''_{tm} = 5 \cdot 1{,}5 + 0{,}5 \cdot 0{,}6 + 4 \cdot 2 \cdot 0{,}8 \cdot 0{,}6 = 2{,}25 + 3{,}85 = 6{,}1 \text{ kW}.$$

Lugedes transmissiooni kasuteguriks $\eta_{tr} = 0{,}75$, saame keskmise võimsuse mootoril

$$N_{m\ ksk} = \frac{\Sigma N_{tm} \cdot e'_{tm} \cdot e''_{tm}}{\eta_{tr}} = \frac{6{,}1}{0{,}75} = 8{,}15 \text{ kW}.$$

Kuna käesoleval juhul tööstusmasinate arv ei ole suur (kõigest 9 masinat), siis ei saa lugeda transmissiooni koormust ühtlaseks. Seepärast mootori võimsus tuleb valida veidi kõrgemana. Lisades 15% saame

$$N = N_{m\ ksk} \cdot 1{,}15 = 8{,}15 \cdot 1{,}15 = 9{,}4 \text{ kW}.$$

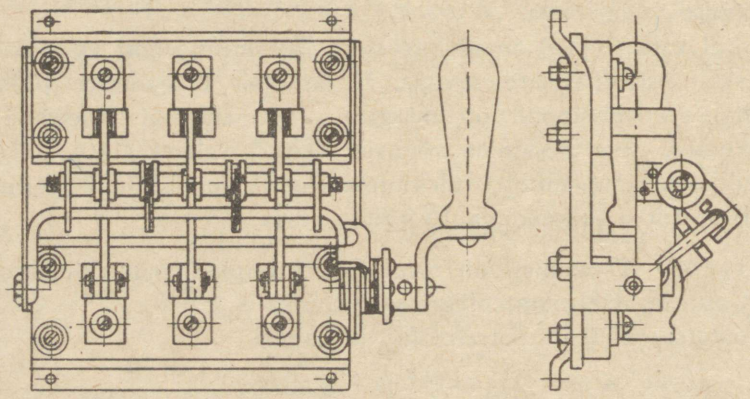
Kataloogist lähim mootori võimsus on

$$N_n = 10 \text{ kW}.$$

129. Mootorite juhtimine.

Sõltuvalt kasutamise otstarbest kasutatakse mootorite juhtimiseks mitmesuguseid seadiseid: lülitus- ja lahutus-, käivitus-, reguleerimis- ja mootori ülekoormuse kaitseseadiseid.

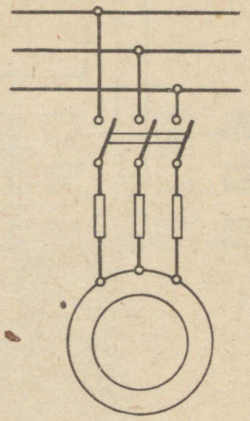
Lihtsaimaks lülitus- ja lahutusseadiseks on vinnaklüliti, kahepooluseline — alalisvoolumootoritele ja kolmepooluseline—keerdvoolumootoritele (joon. 307).



Joon. 307.

Mootorite ja võrkude kaitsemiseks tugevate voolude eest, mis tekivad suurte ülekoormuste või juhuslike lühiste puhul, kasutatakse sulavkaitsmeid. Need koosnevad kergeltsulavast metallist valmistatud sulavelemendist, mis lülitatakse kõikidesse juhtmetesse võrgu ja mootori vahele.

Vinnaklüliti ja sulavkaitsmed moodustavad küllaldase aparatuuri mootori juhtimiseks lihtsamal juhul, näiteks väikevõimelise keerdvoolu-asünkroonmootori juhtimiseks. Joonisel 308 on näidatud sellise mootori lülitusskeem vinnaklülitiga ja sulavkaitsmetega.

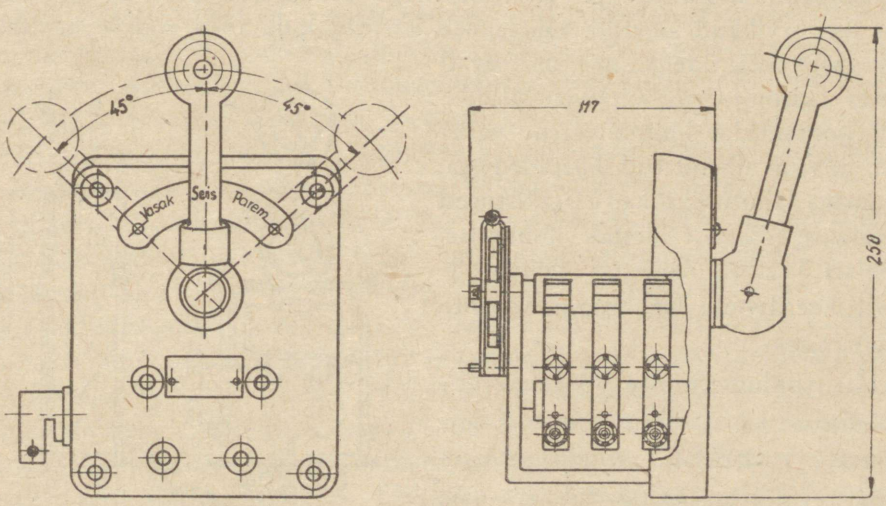


Joon. 308.

Sagedate käivitamiste puhul, nagu see esineb üksikajamites, eelkirjeldatud vinnaklülitite asemel kasutatakse tavaliselt rullümberlüliteid, mis on vastupidavamad ja lubavad kõrgemat lülitussagedust.

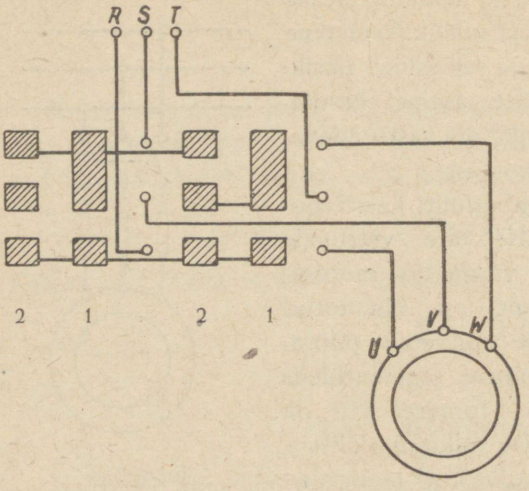
Joonisel 309 on näidatud rullümberlüliti keerdvoolumootori reverseerimiseks. Paigalseisvate vetruvate kontaktvedrudega on ühendatud võrgu ja mootori juhtmed. Rullile, sellest isoleeritult, on kinnitatud vaskplaadid — segmendid. Pideme abil rulli pööramisel kontaktvedrud loovad ühenduse segmentidega ja seega lülitavad mootori võrku. Joonisel 310 on näidatud mootori lülitusskeem sellise rullümberlülitiga, kusjuures ümberlüliti on skeemil kujutatud laotatult.

Joonisel 310 paigalseisvad kontaktvedrud on märgitud ringidega. Neid on kuus ja nad asetsevad kahes reas. Pöördsegmendid on kujutatud viirutatud ristkülikutega. Segmendid, mis skeemis on ühendatud tugevate horisontaaljoontega, on omavahel elektrilises ühenduses. Ümberlülitil on kolm fikseeritud asendit. Joonisel näidatud asendis mootor on lahutatud võrgust. Parempoolses asendis *1* segmendid vasakul



Joon. 309.

püstjoonel *1* on ühenduses vasakpoolsete kontaktidega ja segmendid parempoolsel püstjoonel *1* — parempoolsete kontaktidega.



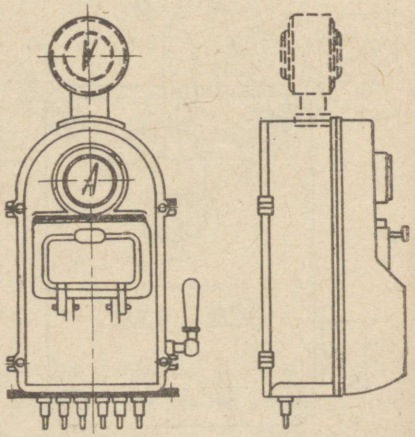
Joon. 310.

Tulemusena võrgu klemm *R* on ühendatud mootori klemmiga *U*, klemm *S* — klemmiga *V* ja klemm *T* klemmiga *W*. Ümberlüliti üleviimisega vasakpoolsesse asendisse *2*, vasakpoolsed segmendid *2* ühinevad parempoolsete kontaktidega, ja parempoolsed segmendid *2* — vasakpoolsete kontaktidega. Selle tulemusena mootori klemm *V* ühendub võrguklemmiga *T* ja klemm *W* — klemmiga *S*. Klemm *U* jääb endiselt ühendusse võrguklemmiga *R*. Mootor muudab oma pöörlemissuunda. Joonisel 309 kujutatud ümberlüliti on sisse ehitatud erilisse lülituskasti, mis kinnitatakse otse tööstusmasinale või selle lähedusse.

Rulllülitid ja -ümberlülitid asetatakse malmkasti, kuhu paigutatakse ka sulavkaitsmed. Selline lülituskast on kujutatud joonisel 311.

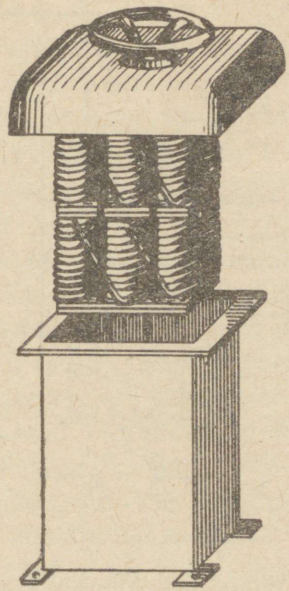
Alalisvoolumootorite ja faasirootoritega asünkroonmootorite käivitamiseks on tarvilikud käivitid. Lihtsaimad käivitid kujutavad endast traattakistusi vaskkontaktidega, mis asetsevad kaares marmor- või kiltkivist plaadil. Neil kontaktidel libiseb vetruv vaskhari, mis on ühendatud käepidemega. Paremaks jahutuseks käiviti takistused asetatakse õliga täidetud anumasse. Joonisel 312 on näidatud selline õlikäiviti keerdvoolu-asünkroonmootorite käivitamiseks.

Haruvoolumootorite pöörete reguleerimiseks kasutatakse samuti traatreostaate. Madalate voolutugevuste tõttu reguleerimisreostaadid ei vaja eri jahutust.

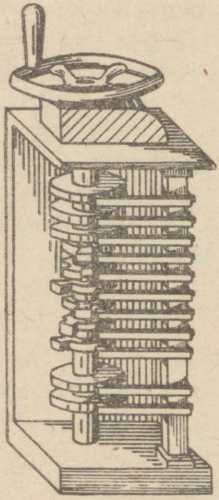


Joon. 311.

Paljudes ajamites tavalised reostaadid sagedate käivitamiste, väljalülitamiste, pidurdamiste jms. tagajärjel kuluvad kiiresti ega ole otstarbekohased. Sellistel juhtudel tavaliselt kasutatakse juhtimist kontrolleritega.



Joon. 312.



Joon. 313.

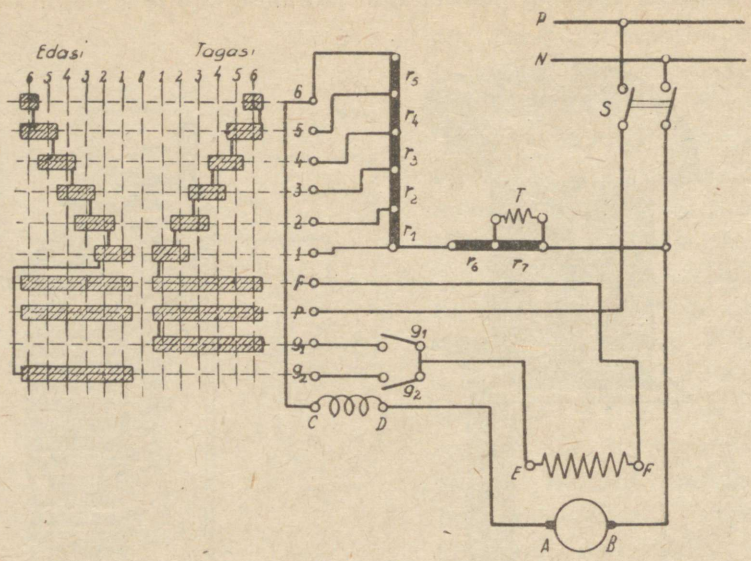
Kontroller koosneb üldjoontes käepidemega pööratavast malmrullist sellele kinnitatud vasest kontaktsegmentidega ja paigalseisvatest kontaktvedrudest. Viimaste juurde on toodud ühendused skeemi üksikelementidelt, nagu võrguklemmidelt, mootoriklemmidelt, reostaatidelt jne.

Käepideme pööramisega rulli kontaktsegmendid viiakse paigalseisvate vedrukontaktide alla, ühendades neile lülitatud skeemi elemente.

Joonisel 313 on näidatud kontroller ja joonisel 314 on kujutatud lihtsaima kraana-kontrolleri skeem alalisvoolu peavoolumootori juhtimiseks.

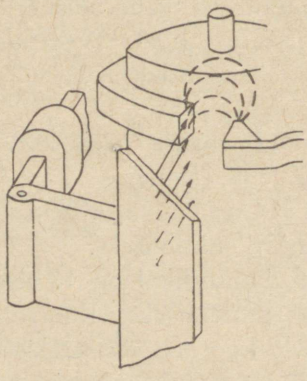
Skeemi vasakpoolses osas laotatult kujutatud kontrolleril on 13 seisu: kuus edasikäiguks, kuus — tagasikäiguks ja üks peatamiseks. Kontrolleri kontaktvedrud on endiselt märgitud ringidega. Käiviti koosneb viiest takistussektsioonist $r_1 - r_5$. Samad takistused on ära kasutatud ka pöörete arvu reguleerimiseks. Tähtedega g_1 ja g_2 on märgitud lõpplülitid, millede ülesandeks on mootori võrgust lahutamine kraana jõudmisel ühte äärmistest seisudest, et vältida avariisid. Elektromagnetiline pidur T pidurdab võrgust lahutatud mootorit. Vooluahelate katkestamisel kontrolleris tekib kaartuli,

mis põhjustab kontaktide sissepõletamist. Selle nähte kõrvaldamiseks kontrollereid harilikult varustatakse sädemekustutamise katsadega.



Joon. 314.

Sellise katsa töötamise põhimõte on kujutatud joonisel 315. Vooluga toidetav katsa tekitab oma pooluse ja kontrolleri rulli vahel tugeva magnetvälja, milles toimubki kontaktide katkestamine. Magnetväljas tekkiv kaartuli kaldub kiiresti ülespoole mõju tagajärjel, mida avaldavad elektromagnetilised jõud kaartuld moodustavatele liikuvatele elektrilaengutele. Kaare pikkus järsult suureneb ja kaartuli kiirelt kustub.



Joon. 315.

Joonisel 314 sädemekustutamise katsa on märgitud tähtedega *CD*.

Jälgigem voolu teekonda kontrolleri üksikutes asendites. Esimene käivitusasend „edasi" vastab vasakpoolse püstjoone *1* ühtumisele kontaktvedrudega. Seega luuakse ahel: liin *P*, vinnaklüliti *S*, kontrolleri kontaktvedru *p*, kontaktvedru *F*, mis jääb ühendusse kontaktvedruga *p* kontaktsegmentide kaudu kõigis kuues rulli „edasi"-asendis, ergutusmähis punktist *F* punkti *E*, „edasi"-käigu lõpplüliti g_2, kontaktvedru g_2, kontaktvedru 1, kõik viis käiviti takistus-

astet, sädemekustutamise katsa *CD*, mootori ankur harjalt *A* harjale *B*, vinnaklüliti *S* ja võrguliin *N*.

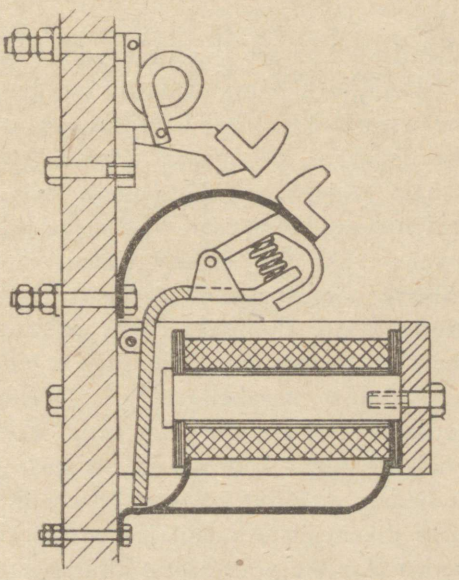
Samaaegselt paralleelselt ankruahelaga lülitatakse pidur *T*, misjuures vool läheb kontaktvedrult 1, takistuse r_6 piduri *T* katsa ja vinnaklüliti *S* kaudu võrgujuhtmesse *N*. Piduri katsast voolu läbimisel pidur vabastab mootori.

Kontrolleri viimine järgmistesse asenditesse muudab, nagu seda on lihtne jälgida skeemil, ainult sisselülitatud käiviti sektsioonide arvu ja lõpuks asendis *(6)* on kogu käivitustakistus välja lülitatud. Kontaktvedru g_2 on kontrolleri kontaktsegmentide kaudu otseühendatud kontaktvedruga *(6)* ja selle kaudu sädemekustutamise katsaga ja mootori ankruga.

Mootori peatamine sünnib kontrolleri viimisega asendisse *O*. Mootor lahutatakse võrgust ja samaaegselt katkeb vool piduri katsas ning seega mootor järsku pidurdatakse. Automaatselt jääb mootor seisma, kui kraana saavutab „edasi"-käigul äärmise seisu, millejuures lahutub lõppkontakt g_2. Ka sel juhul astub tegevusse pidur. Kontrolleri pööramisel ühte parempoolsesse „tagasi"-asendisse toimuvad, nagu nähtub skeemist, järgmised muutused: vool võrgujuhtmest *P* läbib kontrolleri ja „tagasi"-käigu lõpplüliti g_1, ergutusmähise punktist *E* punkti *F*, s. o. vastupidiselt „edasi"-käigule, ja edasi endisel viisil läbi käivititakistuse, sädemekustutamiskatsa ja mootori ankru, kus voolusuund ei muutu, mille tagajärjel mootor reverseerub.

„Tagasi"-käigul on kuus samasugust asendit, nagu käigul „edasi". Piduri katsa on šunteeritud takistusega r_7, mille ülesandeks on vastu võtta kaduva magnetvälja energiat piduri võrgust lahutamisel. Vastasel korral tekiks võrdlemisi kõrge omainduktsiooni EMJ.

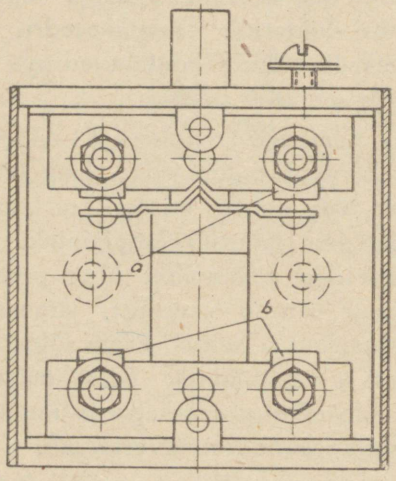
Käesoleval ajal levivad laialt automaatseadmed, mis võimaldavad teostada minimaalse ajakuluga mootori juhtimise üksikuid operatsioone, nagu käivitamist, reverseerimist, peatamist jne. Automaatse juhtimise põhiseadiseks on elektromagnetiline lüliti, nn. kontaktor. Joonisel 316 on kujutatud ühepooluseline kontaktor. Nõrga abivoolu läbimisel elektromagneti katsast elektromagnet tõmbab ligi ankru ja sellega



Joon. 316.

ühendatud peavoolukontakt ühineb teise kontaktiga ning lülitab peavooluahela. Voolu katkestamisel katsas ankur eemaldub ja katkestab vooluahela.

NSV Liidu tehased valmistavad kolmepooluselisi kontaktoreid vinnaklüliti näol, mida lülitab elektromagnet. Katkestus toimub voolu katkestamisel katsas kontaktosade endakaaluga. Voolu juhtimine katsasse toimub survenuppudega või automaatselt, näiteks tööstusmasina liikuva osaga ühendatud väikese kontrolleri poolt.

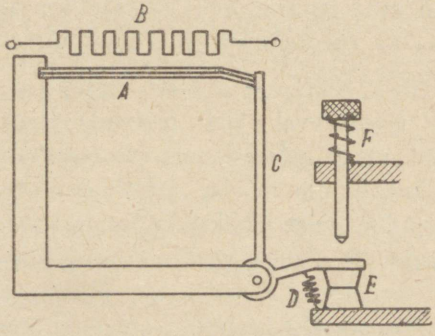


Joon. 317.

Survenupp omab kahte „normaalselt suletud", s. o. nupu vabas asendis sisselülitatud kontakti (kontaktid *a* joonisel 317) ja kahte „normaalselt avatud", s. o. survenupu vabas asendis katkestatud kontakti (kontaktid *b* joonisel 317). Vastavalt skeemile kasutatakse esimesi või teisi kontakte. Mõnedes skeemides leiavad kasutamist mõlemad kontaktide paarid.

Mootorite kaitsmiseks ülekoormuse vastu survenuppudega juhtimise süsteemides ei kasutata tavaliselt mitte sulavkaitsmeid, millede uuendamine läbi põlemisel on seotud ajakuluga, vaid nn. maksimaalreleesid, mis ei vaja uuendamist pärast kaitstava vooluringi katkestamist.

Joonisel 318 on näidatud termiline maksimaalrelee. Selle põhiosaks on metallplaat *A*, mis on kokku keevitatud kahest erineva soojuspaisumise teguriga metallplaadist (näiteks valgevask ja invar — nikli ja terase erisulam väga väikese soojuspaisumisteguriga). Sealjuures plaadi alumiseks osaks on suurema soojuspaisumise teguriga metall.

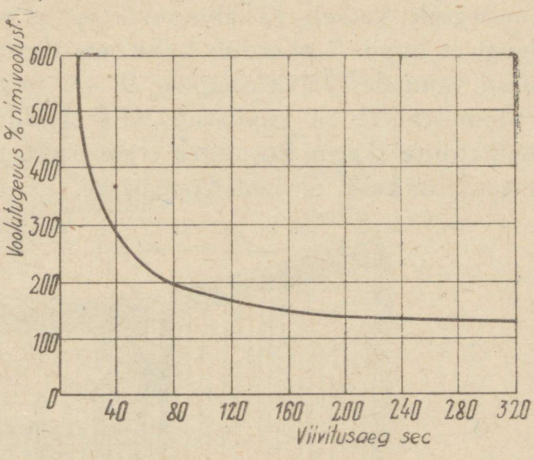


Joon. 318.

Mootori peaahelasse on lülitatud soojenduselement *B*. Kui seda läbib vool, mis ületab normaalse, siis plaat *A* soojeneb, paindub ülespoole ebaühtlaste pikenemiste tagajärjel, plaadi ots libiseb maha kangi *C* otsalt ja see, vedru *D* mõjul pöördudes, lahutab kontaktori katsa ahelasse lülitatud kontaktid *E*. Survenupp *F* on ette nähtud relee viimiseks algasendisse.

Termilise relee peaeemuseks on see, et ta ei katkesta mootori peaahelat silmapilkselt, kui vool ületab normaaltaseme, vaid teatava aja möödumisel. Sealjuures tugevamad ülekoormused sunnivad releed kiiremale tegevusele kui madalamad. See vastab mootori omadustele, sest mootor kannatab välja suuremaid ülekoormusi lühema aja vältel kui madalamaid koormusi, nendest põhjustatud tugevama soojenemise tõttu.

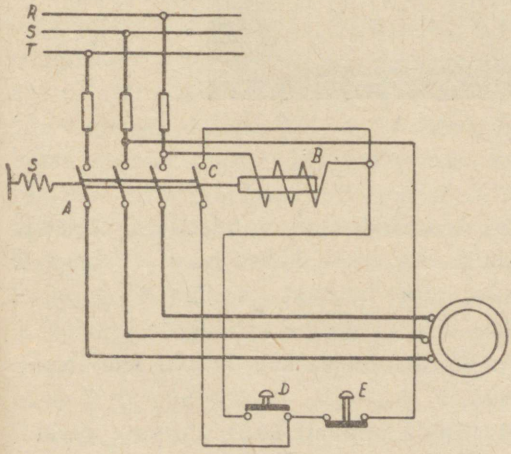
Joonisel 319 on näidatud sellise relee karakteristik. Sellest nähtub, et umbes 140% koormuse puhul relee lahutab mootori 5 minuti möödumisel ja koormuse puhul 250% nimikoormusest — vähem kui minuti kestel.



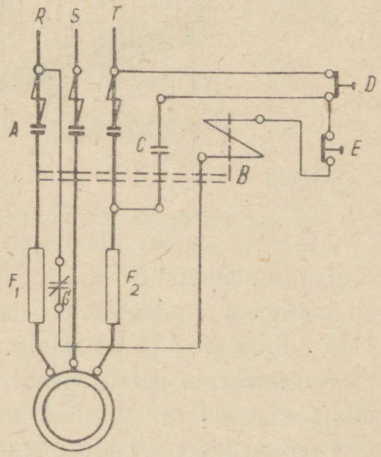
Joon. 319.

Nüüd võime ühendada automaatjuhtimise üksikud elemendid ühisesse skeemi. Joonisel 320 on näidatud lühisrootoriga keerdvoolu asünkroonmoootori automaatse juhtimise skeem.

Surumisel käivitusnupule *D* vool võrgu faasist *R* kontaktori katsa *B* kaudu läbib ühendatud kontaktid *D*, peatamisnupu kontaktid *E* ja suundub võrgu faasi *S*. Seega kontaktor *A* lülitub ja ühendab mootori võrguga.



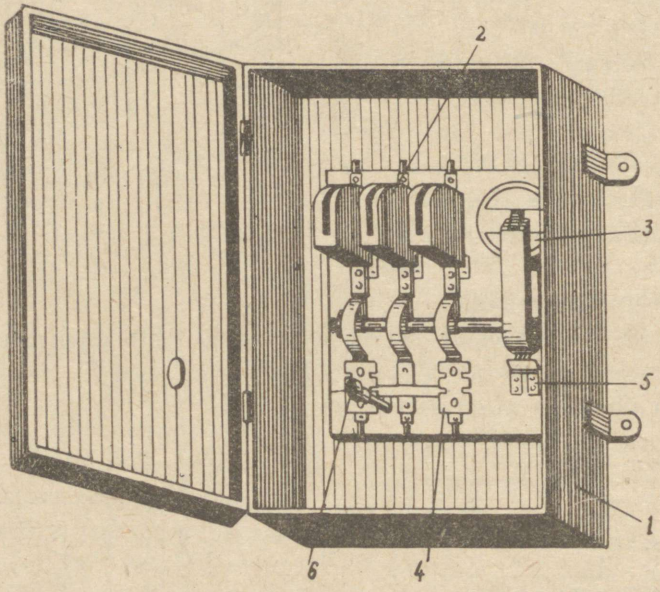
Joon. 320.



Joon. 321.

Nüüd võime vabastada käivitusnupu. Siis vool suundub mööda teist ahelat ja nimelt: faasist *R* katsasse *B*, läbi sulgunud kontaktori abikontakti *C*, käivitusnupu *D* parempoolse kontakti ja pöördub endist teed mööda võrgufaasi *S*. Nupu *D* kontaktid on katkestatud, kuid katsa *B* jääb voolu alla ja kontaktor sisselülitatuks. Vajutamisel peatamisnupule *E* katsa *B* jääb vooluta, vedru *S* katkestab kontaktori *A* ja mootor jääb seisma. Kuna samaaegselt katkeb ka abikontakt *C*, ei saa kontaktor taas sisse lülituda, olgugi et nupp *E* pöördub kohe oma algasendisse. Sisselülimine on võimalik uuesti vajutades käivitusnupule *D*.

Joonisel 321 on kujutatud NSV Liidu tööstuste poolt valmistatavate kontaktorite skeem, kusjuures erinevuseks eelmisest skeemist on kasutatud praegu tarvitusel olevaid leppemärke.



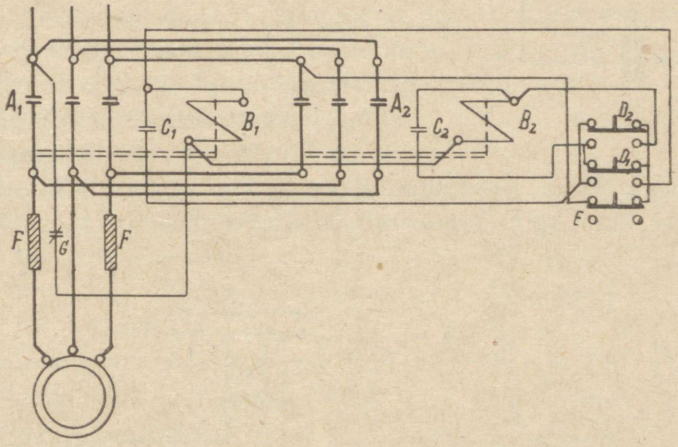
Joon. 322.

Mootori kaitset ülekoormuse vastu teostatakse termoreleedega. Releede soojenduselemendid F_1 ja F_2 on lülitatud võrgu kahte faasi. Tähega *G* on märgitud normaalselt suletud termorelee kontakt (kontakt *E* joonisel 318). Joonisel 322 on näidatud sellise käivitusseadise välisvaade.

Reverseeriva käivitusseadise skeem lühisrootoriga keerdvoolu-asünkroonmootori jaoks on toodud joonisel 323.

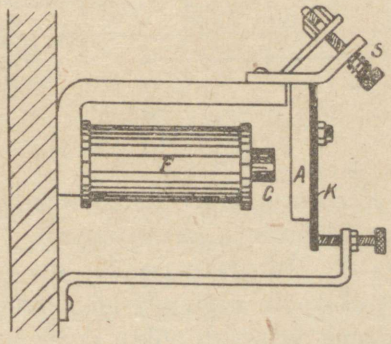
Siin on kaks kontaktorit A_1 ja A_2, mida juhivad kaks nuppu: parempoolse käigu nupp D_1 ja vasakpoolse käigu nupp D_2.

Skeemilt on hõlpus jälgida, et vajutades nupule D_1 sisselülitatud kontaktori A_2 puhul katkestatakse vool selle kontaktori katsas B_2, mis lahutab kontaktori A_2 ja ainult pärast seda lülitub vool katsasse B_1, mis kuulub kontaktorile A_1. Samasugune side on teostatud kontaktori A_1 ja nupu D_2 vahel. Sellega hoitakse ära mõlema kontaktori samaaegse lülitamise võimalus, mis arusaadavalt põhjustaks lühise.



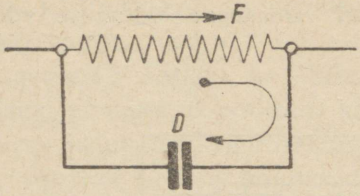
Joon. 323.

Haruvoolumootorite käivitamisel on õigel momendil nõutav käivitustakistuse automaatne väljalülitamine. Selleks kasutatakse nn. ajareleed. Joonisel 324 on näidatud elektromagnetiline ajarelee, missugust kasutatakse alalisvoolumootorite käivitamisel. Südamikule C on asetatud katsa F, mis magneedib südamiku, kui temast voolu läbi lasta. Südamik tõmbab ligi ankru A ja see katkestab kontakti K. Katsaga F paralleelselt lülitatud mingi kontakti D lülitamisel (joon. 325) omainduktsiooni EMJ, mida indutseerib kaduv magnetvoog, säilitab teatava aja vältel voolu katsas F (sisemine nool joonisel 325), südamik C vabastab ankru A ning suleb kontaktid K ainult teatud aja möödumisel pärast relee katsa lühistamist. See ajavahemik peab olema küllaldane mootori käivitusprotsessi teostumiseks.



Joon. 324.

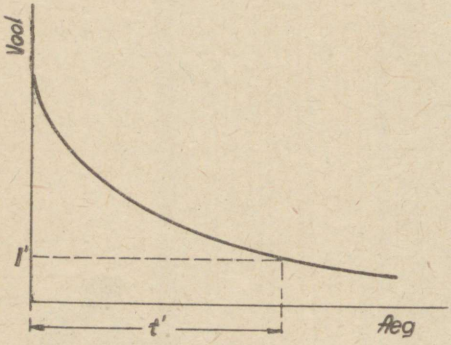
Joonisel 326 on kujutatud sellise relee karakteristik. Kui südamik vabastab ankru voolutugevusega I' katsas, siis kontaktide K sulgumine toimub aja t' möödudes, arvatud relee katsa lühistamise momendist. Aeg t' on reguleeritav vedru S pingutusega (joonis 324). Selliseid releesid valmistatakse kahte tüüpi: väikesed viivitusajaga kuni 1 sek. ja suured ajaviivitusega kuni 5 sek.



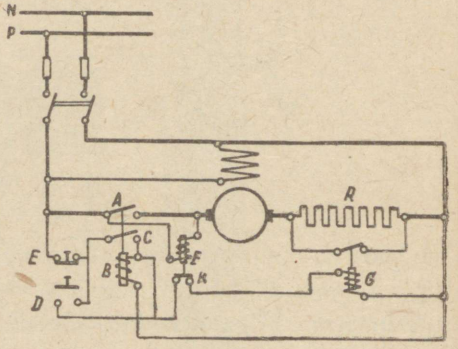
Joon. 325.

Joonisel 327 on kujutatud haruvoolumootori käivitusskeem ajareleega.

Vinnaklüliti K sisselülitamisel tekib vool mootori ergutusmähises ja ajarelee katsas F, mis on lülitatud paralleelselt peakontaktori A kontaktidega. Seega sisselülitatud vinnaklüliti puhul relee südamik on magneeditud, ankur külge tõmmatud ja ajarelee kontaktid K lahutatud.



Joon. 326.



Joon. 327.

Käivitusnupu D lülitamisel vool läbib peakontaktori A katsa B, kontaktor lülitub ja ühendab võrku mootori ankru järjestikku käivitustakistusega R. Samal momendil lühistub ajarelee katsa F ja vool selles aegamööda kaob, nagu see oli kirjeldatud eespool. Teatud aja möödudes relee südamik vabastab ankru ja ühendab kontaktid K.

Seega tekib järgmine ahel: võrgujuhe P, peatusnupp E, peakontaktori abikontakt C, ajarelee kontaktid K, käivituskontaktori katsa G, võrgujuhe N. Käivituskontaktori kontaktid G sulguvad ja lühistavad käivitustakistuse R. Seega on käivitusprotsess lõppenud.

Peatusnupule E vajutamisel katkeb vool peakontaktori katsas B, mille tulemusena mootor lahutub võrgust ja kogu skeem pöördub algseisukorda.

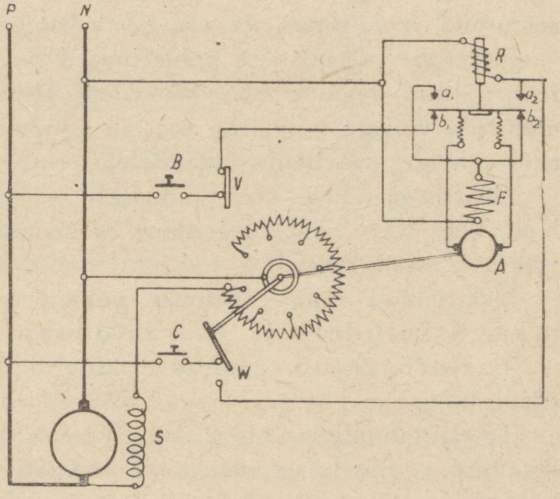
Mootori kaitset teostatakse termoreleedega (joonisel ei ole näidatud) ja sulavkaitsmetega.

Peale käivitamise ja seiskamise haruvoolumootorid nõuavad veel pöörete arvu reguleerimist. Automaatse käivitusseadme kasutamisel võib seda teostada kas käsitsi või ka nuppudega.

Sellise nuppudega teostatava haruvoolumootori kiiruse reguleerimise lihtsustatud skeem on kujutatud joonisel 328. Reguleerimisreostaadi käepidet pöörab väike peavoolu-abimootor *A*, nn. servomootor, mida juhitakse releega *R* ja kahe nupuga: „kiiremini" *B* ja „aeglasemalt" *C*. Kaks lõpukontakti *V* ja *W* lülitavad automaatselt välja servomootori *A*, kui reostaadi käepide jõuab ühte lõpupunktidest.

Nii näiteks joonisel 328 kujutatud asendis reostaat on seatud minimaalsele pöörete arvule ja nupu *C* lülitamine ei avalda mingit efekti, sest lõpukontakt *W* on katkestatud.

Et suurendada pöörete arvu, tuleb vajutada nupule *B*. Tekib järgmine vooluahel: võrgujuhe *P*, nupp *B*, lõpukontakt *V*, relee *R* kontakt b_1, servomootori *A* ankur, relee *R* kontakt b_2, servomootori ergutusmähis *F* ja võrgu juhe *N*. Servomootor käivitub ja tiguajami kaudu pöörab reostaadi käepidet niikaua, kui on lülitatud nupp *B*.



Joon. 328.

Mootori ergutusmähisele lülitub järjestikku järjest suurem reostaadi takistus ja mootori pöörete arv tõuseb. Vabastades nupu *B* me katkestame mootori *A* vooluringi ja reostaadi käepide peatub. Kui mootor saavutab maksimaalse pöörete arvu, reostaadi käepide katkestab lõpukontakti *V* ja servomootor peatub automaatselt.

Kui nüüd vajutada nupule *C* — „aeglasemalt" —, siis tekib järgmine vooluahel: võrgujuhe *P*, nupp *C*, lõpukontakt *W*, relee *R* katsa, võrgujuhe *N*.

Relee ankur tõuseb ja suleb ülemised kontaktid.

Tekib järgmine ahel: võrgujuhe *P*, nupp *C*, lõpukontakt *W*, kontakt a_2, servomootori ankur *A*, kontakt a_1, servomootori ergutusmähis *F*, võrgujuhe *N*. Võrreldes voolusuunda servomootoris suunaga eelmisel juhul, näeme,

et voolusuund on muutunud vastupidiseks ankrus, kuid jäi endiseks servomootori ergutusmähises. Selle tagajärjel servomootori pöörlemissuund muutub vastupidiseks ja sellele vastavalt reostaadi käepide hakkab pöörlema paremale, vähendades takistust ja seega vähendades mootori pöörete arvu.

XXVII peatükk.

ELEKTROTERMIA. ELEKTERKEEVITUS.

130. Elektrotermia.

Viimasel ajal ikka enam leiab kasutamist tööstustes soojendamine elektriga, mida rakendatakse mitmesugustes tehnoloogilistes protsessides, tänu eemustele, mida omab see viis teiste soojendusviisidega võrreldes.

Elektriga soojendamise põhieemused on järgmised: sujuv ja täpne ahju temperatuuri reguleerimise võimalus, tehnoloogilist protsessi kahjulikult mõjutada võivate kõrvaliste gaaside puudumine, võimalus saavutada teistes ahju tüüpides saavutamatuid kõrgeid temperatuure.

Elektrisoojenduse põhipuuduseks on elektrienergia võrdlemisi kõrge hind, kuid koos elektrifitseerimise arenemisega see puudus omandab järjest väiksema osatähtsuse.

Elektriahjud oma töötamise põhimõttelt liigituvad kahte põhitüüpi: takistusahjudeks ja kaarahjudeks.

Takistusahjud töötavad elektrivooluga läbitavates takistustes tekkiva džaulisoojusega.

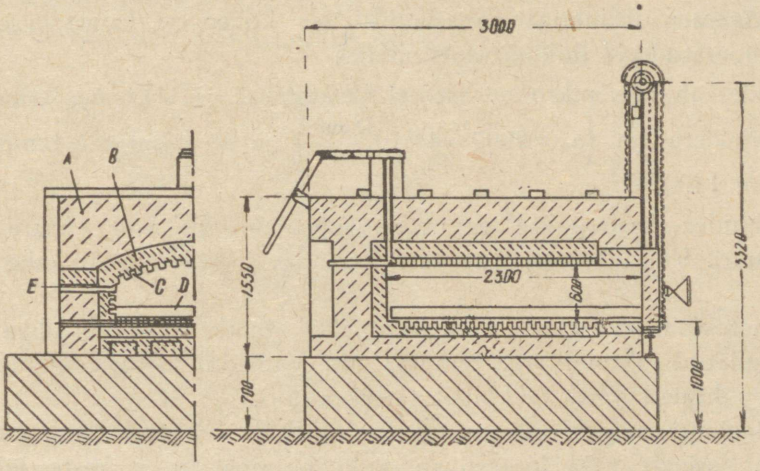
Takistusahjude arvutuse aluseks võetakse Joule'i seadus, mis määrab tekkinud soojusehulga vahekorra kulutatud elektrienergiaga. Enamasti on kütteelemendiks neis ahjudes raskeltsulavast ja kõrge eritakistusega materjalist valmistatud juhtmete süsteem.

Harilikult valmistatakse kütteelemente metallsulamist nikroom, mis kõige enam vastab esitatud nõuetele. Mõnikord kütteelemendi moodustab söevarraste süsteem. Kui puuduvad mehaanilised mõjud, osutub viimaste ahjude iga pikemaks. Joonisel 329 on näidatud nikroomist kütteelementidega takistusahi.

Kütteelementidega ahjudes soojuse ülekanne soojendatavale esemele toimub konvektsiooni, soojusjuhtivuse ja kiirgamise teel.

On huvitav mainida teist elektrisoojendusviisi takistusmeetodil, kus vool vahetult läbib soojendatava materjali, eraldades selles džaulisoojust. Sellel viisil esineb vähem soojuskadusid, mistõttu ta on majanduslikult kasulikum eelmisest. Kuid selle viisi rakendamine ei ole alati võimalik ja seepärast kütteelementidega ahje tuleb pidada universaalsemateks.

Kütteelementideta takistusahjudes voolu juurdejuhtimine teostub induktiivselt. Selleks asetatakse esemed vahelduvasse magnetvälja ning see indutseerib voolu soojendatavates esemetes. Vastavalt nende töötamise põhimõttele selliseid ahjusid nimetatakse induktsioonahjudeks. Meil NSV Liidus kasutatakse niisuguseid induktsioonahje värviliste metallide sulatamiseks ja raudtee veerevkoosseisu rattapaaride bandaažide soojendamiseks.



Joon. 329.

Tuleb tähendada, et takistusmeetodil otsese soojendamisega takistusahjud on rakendatavad ainult juhtivate, peamiselt metallesemete jaoks.

Tegeliku näitena vaatleme detailsemalt väiksema karastusahju ehitust. Need on tüüpilised karastusahjud ja neid võib sageli näha ekspluatatsioonis meie Liidu tehastes.

Ahjus esemed laotakse nikroomist valatud alusplaadile. Ühtlase temperatuuri saavutamiseks kütteelemendid jaotatakse kogu tööpinnale viiest küljest: alla — alusplaadi alla, üles, külgseintele ja ette — ukse sisepinnale.

Ümmarguse ristlõikega, 5 mm läbimõõdus, nikroomist kütteelemendid on asetatud laineliselt keraamiliste plaatide soontesse. Need kütteelemendid soojendavad õhku ahjus, samuti aga ka soojendatavaid esemeid kiirgamise teel.

Maksimaalne temperatuur ahjus on 960° C. Sealjuures kütteelementide temperatuur on sellest 70—100° C võrra kõrgem. Temperatuuri 960° C tuleb võtta piirtemperatuurina, kuna nikroom talub temperatuure kuni 1100° C.

Sellised ahjud sageli varustatakse automaatse temperatuuri reguleerimisseadmega. Reguleerimine teostub voolu sisse- ja väljalülitamisega teatavate

ajavahemikkude järel, olenevalt ahju koormusest ja ettekirjutatud ahju temperatuurist. Keskmiselt sisse-väljalülitamise periood kestab 2—3 minutit. Reguleerimist ja kontrolli teostavad automaatselt elektrilised püromeetrid. Sellise elektrilise regulaatoriga võib saavutada täpsust kuni ± 2° C ettekirjutatud temperatuurist. Automaatseadme rikke juhuks on ahju asetatud peenike kuldtraat, mis sulab temperatuuril 1063° C ja eri relee lahutab siis ahju võrgust. Elektriline püromeeter reguleerib ja registreerib ahju temperatuuri kõvera näol liikuval paberlindil. See kõver on karastamisel kasutatud temperatuuride dokumentatsiooniks.

Mõnedes ahjudes nikroomi asemel kasutatakse siliiti, mis erineb oma kõrge eritakistusega $\left(\varrho = 3000-4000\ \frac{\Omega\,\mathrm{mm}^2}{\mathrm{m}}\right)$ ja on kasutatav temperatuuridele kuni 1400° C.

Kaarahjudes kasutatakse esemete soojendamiseks volta kaare kõrget temperatuuri. Volta kaar on tugevasti helendav gaaside pilveke kahe juhtme vahel.

Voolu tekkimiseks gaasis volta kaare näol on tarvilik vooluallika miinusega ühendatud juhtme kõrge temperatuur. Vahelduvvooluga on tarvilik, et mõlemad juhtmed omaksid kõrget temperatuuri.

See tingimus põhineb järgmistel kaalutlustel: kõrgetel temperatuuridel igas kehas esineb väga intensiivne, kuid korrapäratu osakeste liikumine. Sellest liikumisest võtavad osa kuumutatud kehas asuvad vabad elektronid, kusjuures nende liikumine muutub sedavõrd tugevaks, et keha pinnal asuvad elektronid võivad välja lennata ruumi.

Uurides volta kaare füüsikalist olemust, jõuame selgusele, et hõõguva keha ümbrus küllastub vabade elektronidega ja kui selle juhtme juurde tuua positiivselt laetud teine juhe ja hõõguv keha ühendada vooluallika negatiivse poolusega, siis tekib püsiv elektrivool kogu ahelas ja juhtmete vahel helendavate gaaside pilveke.

Pärast volta kaare tekkimist kõrge temperatuur püsib vahet pidamata jooksva voolu arvel. Volta kaar püsib seni, kui elektroodid ise kõrge temperatuuri mõjul sedavõrd ära põlevad, et nende vahe muutub liiga suureks.

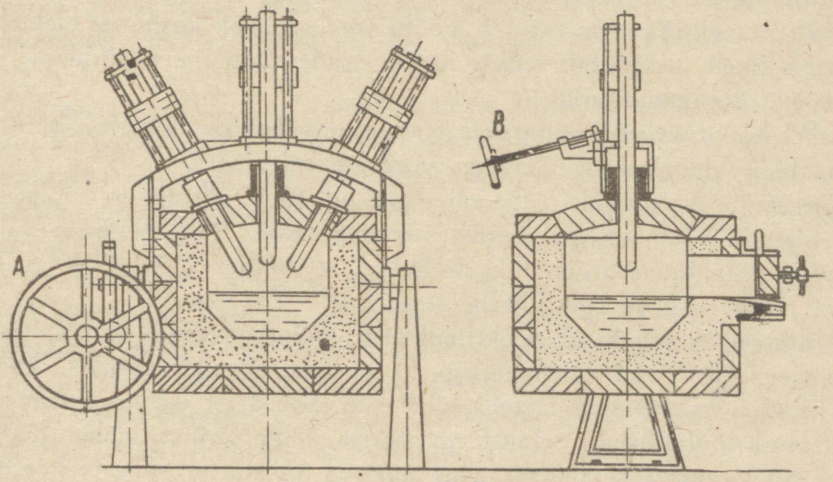
Volta kaare süütamisel toimitakse järgmiselt: kaks elektroodi ühendatakse üheks momendiks. Seejuures kõrge voolutugevus elektroodide puutepinnas kuumutab neid. Kui tekib hele hõõguv punkt, elektroodid eemaldatakse üksteisest mõne sentimeetri kaugusele ja reostaadiga reguleeritakse voolutugevust nõutava suuruseni.

Volta kaare temperatuuri ei ole seni veel täpselt kindlaks määratud, kuid igal juhul on see üle 3000° C.

Volta kaare elektroodideks tarvitatakse harilikult kahte silindrilist söe-

varrast; need on kinnitatud eritüüpi vaskhoidjatesse, mida kasutatakse ühtlasi ka voolu juurdetoomiseks.

Volta kaart rakendatakse sageli valgustehnikas helgiheitjate, kino projektsioonseadmete jms. valgusallikana, kuid sellega ei piirdu volta kaare rakendamise võimalused. Kaare kõrge temperatuur võimaldab tema rakendamist mitmesuguste metallide sulatamisel. Sageli sulatusahju aluspinnal asuv sulametall on üheks elektroodiks. Sellise voolu juurdejuhtimise viisi juures kasutatakse maksimaalselt kaarega tekitatav soojus.



Joon. 330.

Käesoleval ajal toodetakse elektrijõujaamades keerdvoolu, mis evib terve rea eemusi võrreldes teiste voolusüsteemidega. Seepärast on kasutamisel keerdvoolu kaarahjud, kus üheks kolmest elektroodist on sulametall ja ülejäänud kaks asetatakse selle kohale. Kolme elektroodiga keerdvoolu ahi on kujutatud joonisel 330.

Volta kaare õigeks põlemiseks on elektroodide vahel tarvilik 30—40 V pinget.

Valgustehnikas kaart toitva voolutugevuse väärtused ei ületa harilikult mõndakümmet amprit. Kaarahjudes kasutatakse märksa kõrgemaid voolutugevusi, mis ulatuvad mitmekümne tuhandesse amprisse.

131. Elekterkeevitus.

Elekterkeevitusena mõistame kahe metallosa kindlat ühendamist elektrivoolu abil.

Tootmises esineb järgmisi elekterkeevituse viise:

1) takistusviis (Thomsoni meetod):
   a) jätkkeevitus,
   b) sulatuskeevitus,
   c) punktkeevitus,
   d) õmbluskeevitus;
2) kaarkeevitus:
   a) Benardose meetodil,
   b) Slavjanovi meetodil.

Takistuskeevitus rajaneb voolu soojustoimel, kusjuures elektrivoolu juhitakse ühelt metallosalt teisele nende osade puutepinna kaudu, mis soojeneb keevitustemperatuurini.

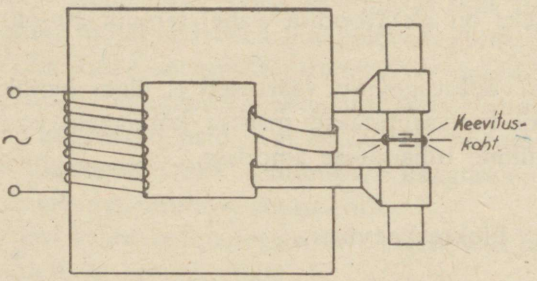
Sellel keevitusviisil kasutatakse eranditult vahelduvvoolu, mis on odavam ja annab keevitamisel alalisvooluga võrdseid tulemusi.

Keevitamiseks tarvilik pinge on harilikult 10 V piirides ja voolutugevus võib ulatuda kümnetesse tuhandetesse ampritesse. Voolutugevus valitakse sõltuvalt keevitatavate detailide ristlõikest — umbes 2000—3000 A keevitatava pinna ristlõike ruutsentimeetrile.

Arusaadavalt üle kanda elektrienergiat voolutugevusega mitu tuhat amprit pingega 10 V ka lühematelegi kaugustele ei ole võimalik, kuna see nõuaks väga suurte ristlõigetega juhtmeid. Seepärast iga keevitusmasin on varustatud individuaalse transformaatoriga, mille primaarmähis lülitatakse 120—250 V võrku, sekundaarmähis aga on teostatud väheste keerdudega ja suure ristlõikega vasklatist.

Vaatleme üksikult takistuskeevituse eri viise.

Jätkkeevitust teostatakse järgmiselt: keevitatavad detailid kinnitatakse keevitustransformaatori sekundaarmähisega ühendatud näpitsatesse ning surutakse kokku (joonis 331). Läbikäiv vool kuumendab kõige intensiivsemalt detailide puutepindu. Kui soojenemine on saavutanud vajaliku piiri, vool katkestatakse ja esemed surutakse tugevasti kokku.



Joon. 331.

Sulatuskeevitus erineb jätkkeevitusest sellega, et kokkusurutud esemed kohe eemaldatakse üksteisest 2—3 mm kaugusele. Voolu katkestuse juures tekkiv kaar teostab keevitatavate pindade soojenda-

mist ja sulatamist. Harilikult tuleb esemeid lähendada ja eemaldada mitu korda, sest algul, kui pinnad on veel külmad, kaartuli põleb korratult ja kustub. Selle viisi juures energiakulu on veidi väiksem ja saavutatakse tugevamat keevitatud ühendust kui jätkkeevitamisel. Ka ei ole siin tarvilik nii täpne keevitatavate pindade ettevalmistamine, kuid sulatuskeevitamine vajab vilunud keevitajat.

Punktkeevitus leiab rakendamist lehtmaterjalide keevitamisel. Keevitatavad lehed asetatakse üksteisele ja pigistatakse kahe vasest varbelektroodi vahele. Elektrivool kuumutab lehti elektroodide puutepindades. Masin peab olema varustatud seadmega, mis lülitab välja voolu enne elektroodide eemaldamist; vastasel korral tekkiv kaartuli võib õhukesed lehed läbi põletada.

Õmbluskeevitus on punktkeevituse täiendus ning seda kasutatakse samuti lehtmaterjalide juures. Selle keevitusviisi korral elektroodide otsad varustatakse rullidega, millede vahelt ühtlase kiirusega tõmmatakse läbi keevitatavad lehed. Õmbluskeevitus annab vee- ja gaasikindla metalllehtede ühenduse.

Kaarkeevitus põhineb keevitatavate esemete soojendamisel ja lisametalli sulatamisel kaartule poolt eraldatava soojusega.

Kaartuli Benardose meetodil tekib söeelektroodi ja keevitatava eseme vahel. Seejuures lisametalli antakse kõrvalt.

Slavjanovi meetodil kaartuli tekib raudelektroodi ja keevitatava eseme vahel. Selle viisi juures lisametalliks on järjest sulav metallelektrood.

Viimasel ajal kasutatakse Benardose viisi ainult metallide elektriga lõikamisel.

Kaarkeevituseks kasutatakse eranditult Slavjanovi meetodit.

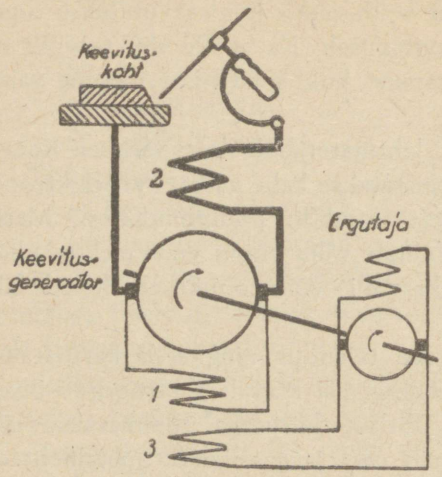
Kaarkeevitamisel puudutatakse eset elektroodiga ja eemaldatakse viimane kohe 3—10 mm kaugusele (söeelektroodidega keevitust teostatakse pikema kaartulega — kuni 40 mm). Keevitust võib teostada nii alalis- kui ka vahelduvvooluga. Kaartule tekitamiseks vajalikku energiat saadakse alalisvoolu erimasinast või transformaatorilt.

Kaare klemmipinge on piirides 18 kuni 20 V. Vooluallika tühijooksupinge on harilikult 35—75 V. Kaartule voolutugevus on 50—500 A piirides. Peenemateks töödeks kasutatakse madalamaid voolutugevusi.

Keevitamine alalisvooluga on umbes 15% kallim keevitamisest vahelduvvooluga. Sealjuures alalisvoolu-keevitusmasin on umbes 2,5 korda kallim transformaatorist. Siiski eelistatakse sageli keevitamisel alalisvoolu keevitatud õmbluse suurema tugevuse tõttu.

Keevitusseadet toitev vooluallikas peab häireteta välja kannatama lühiseid, sest igakordne eseme elektroodiga puudutamine on tegelikuks lühiseks.

Seoses sellega alalisvooluga keevitades kasutatakse ergeneraatorit. Sellise, nn. Krämeri generaatori skeem on kujutatud joonisel 332.



Joon. 332.

Selle generaatori ankru konstruktsioon ei erine millegagi harilikust alalisvoolu-generaatorist. Erinev on aga ergutusmähis, mis koosneb kolmest eri mähisest. Peale hariliku haruvoolu mähise siin on veel vastulülitatud peavoolumähis. Selle mõjul lühisesse sattudes generaator magneetub lahti ja lühisvoolutugevus ületab generaatori nimivoolutugevuse ainult poolteisekordselt. Peale nimetatud kahe mähise on olemas veel kolmas võõrergutuse mähis, toidetav eri vooluallikast, nn. ergutajast. See kolmas mähis soodustab generaatori EMJ kiiret kasvu lühise möödudes. Vastasel korral, ainult endaergutusega, oleks möödunud mitu sekundit, enne kui generaator EMJ saavutaks nimiväärtuse.

1. Keerdvoolu-asünkroonmootorite normaalvõimsused.

Tüüp	Võimsused (kW) sünkroonpööretega minutis					
	3000	1500	1000	750	600	500
AD—21	1,6	1,0	0,55	—		
AD—22	2,2	1,5	0,85	—		
AD—31	3,2	2,2	1,2	—		
AD—32	4,2	3,2	1,8	—		
AD—41	5,1	4,3	2,7	—		
AD—42	7,2	5,8	3,5	—		
AD—51	10,0	7,8	5,0	2,8		
AD—52	12,0	10,0	6,0	3,5		
MA—201/1		8	5,7	—		
MA—201/2		10,4	7,3	—		
MA—202/1		13,0	9,1	6,4		
MA—202/2		17,0	11,8	8,3		
MA—203/1		22,0	15,2	11,0		
MA—203/2		28,5	19,7	14,0		
MA—204/1		37,5	25,5	18,1		
MA—204/2		46,0	32,0	23,5		
MA—205/1		60,0	40,0	30,0		
MA—205/2		72,0	48,0	36,0		
MA—206/1		85,0	58,0	44,0		
MA—206/2		105,0	72,0	53,0		
AM—114		125	80	60	45	—
AM—115		150	100	75	55	40
AM—116		170	120	90	70	50
AM—117		190	140	100	85	60
AM—125		—	165	120	105	75
AM—126		240	195	140	125	90
AM—127		275	225	165	145	105
AM—128		320	260	190	165	125
AM—136		375	—	220	—	—
AM—137		430	310	260	190	150
AM—138		—	360	300	220	175
AM—147		—	—	—	260	220
AM—148		—	—	370	300	255
AM—1410—12		—	—	—	360	310

2. Alalisvoolumootorite normaalvõimsused.

Tüüp	Võimsused (kW) normaalsete pööretega minutis				
	3000	1500	1000	750	600
PN—2,5	0,7	0,25	0,28	—	—
PN—5	1,05	0,52	0,3	—	—
PN—10	2,4	1,0	0,65	—	—
PN—17,5	3,7	1,75	1	—	—
PN—28,5	5,3	2,8	1,6	—	—
PN—45	7	4,4	2,5	—	—
PN—68	10	6,5	3,7	—	—
PN—85	—	9,8	5,8	—	—
PN—100	—	15	9,5	5,8	—
PN—145	—	21	13,5	8,5	—
PN—205	—	34,5	22	15,5	—
PN—290	—	45	30	20,5	—
PN—400	—	74	46	—	24,5
PN—550	—	100	60	—	32
PN—750	—	115	76	—	40,5
PN—1000	—	137	105	72	55,5
PN—1320	—	170	130	88	68
PN—1750	—	200	167	118	80

3, Keerdvoolu kinnised kraanamootorid, tüüp KT.

Tüüp	Relatiivne lülituskestus %					
	15		25		40	
	Võimsus kW	Pöörded minutis	Võimsus kW	Pöörded minutis	Võimsus kW	Pöörded minutis
22/1002	2,65	880	2,2	900	1,6	930
30/1002	3,9	885	3,0	910	2,1	940
40/1003	4,8	900	4,0	920	2,9	945
55/1003	7	910	5,5	930	3,9	950
75/1004	9	940	7,5	950	5,5	965
110/1004	15	945	11	960	8	975
110/755	14	685	11	700	9	710
150/755	19	700	15	710	12	720
220/756	27	710	22	720	17	730
300/756	39	715	30	725	24	735
300/607	40	550	30	567	24	575
400/607	52	560	40	570	32	580
500/608	67	570	50	580	40	585
640/608	83	580	64	585	51	590
800/609	110	580	80	585	65	590
1000/609	130	585	100	590	80	595
1250/609	165	585	125	590	100	595

SISUKORD

I. ALALISVOOL.

Lk.

I peatükk. Põhimõisted 5

1. Voolutugevus 5
2. Juhid ja mittejuhid. Takistus 7
3. Pinge. Elektromotoorne jõud 11

II peatükk. Alalisvoolu põhiseadused 13

4. Ohmi seadus 13
5. Takistuste ja vooluallikate järjestikku-lülitus 15
6. Takistuste ja vooluallikate paralleel-lülitus 17
7. Elektrivoolu töö ja võimsus 20

III peatükk. Voolu termiline ja keemiline toime 22

8. Voolu termiline toime 22
9. Voolu keemiline toime 25
10. Akumulaatorid 27
11. Galvaanilised elemendid 31

IV peatükk. Elektromagnetism 32

12. Magnetism 32
13. Magnetiline induktsioon. Magnetvoog 35
14. Magnetväli voolu ümber 37
15. Magnetringi seadused 40
16. Raua magneetimine 43
17. Magneti tõstejõud 46
18. Elektromagnetiline jõud 49

V peatükk. Elektromagnetiline induktsioon 50

19. Indutseeritud elektromotoorne jõud 50
20. Vastastikune induktsioon. Omainduktsioon 55
21. Elektromagnetilise induktsiooni seaduse üldkuju 57
22. Pöörisvoolud 58
23. Alalisvoolu-generaator 60
24. Generaatorite ergutus 63
25. Haruvoolu-generaator 66

II. VAHELDUVVOOL. Lk.

VI peatükk. Vahelduvvoolu saamine 71
26. Põhimõisted 71
27. Sinusoidaalse elektromotoorse jõu saamine 74
28. Vektordiagramm 77
29. Voolu ja pinge efektiivväärtused 78

VII peatükk. Aktiivne ja induktiivne takistus 81
30. Vooluring aktiivse takistusega 81
31. Omainduktsiooni nähe 83
32. Induktiivsusega vahelduvvooluring 85
33. Aktiivse ja induktiivse takistusega vooluring 89
34. Iseloomustavad kolmnurgad 95

VIII peatükk. Võimsus. Tarvitajate ühendamine 98
35. Vahelduvvoolu võimsus 98
36. Võimsustegur ja selle tähtsus kaasaegses tööstuses 104
37. Tarvitajate järjestikku-lülitus 108
38. Tarvitajate paralleel-lülitus 112
39. Mahtuvusega vahelduvvooluring 114

IX peatükk. Keerdvool 121
40. Keerdvoolu saamine 121
41. Tähtlülitus 123
42. Kolmnurklülitus 132
43. Keerdvoolu võimsus 137

X peatükk. Vahelduvvoolu-generaatorid 139
44. Generaatorite ehitus 139
45. Generaatorite töötamine 144

XI peatükk. Transformaatorid 146
46. Töötamise põhimõte 146
47. Transformaatori koormamine 149
48. Transformaatorite ehitus 154
49. Autotransformaator 156

III. ELEKTRIMÕÕTMISED JA ELEKTRIMÕÕTERIISTAD.

XII peatükk. Ampermeetrite ja voltmeetrite süsteemid 159
50. Keerdkatsa-süsteem 159
51. Pehmeraua-süsteem 160
52. Termiline süsteem 162
53. Elektrodünaamiline süsteem 163
54. Induktsioonsüsteem 165

XIII peatükk. Voolu, pinge ja takistuse mõõtmine 165
55. Voolu mõõtmine 165
56. Pinge mõõtmine 166
57. Takistuse mõõtmine ampermeetri ja voltmeetri abil 167

Lk.
58. Takistuse mõõtmine sildadega 169
59. Takistuse mõõtmine voltmeetri abil 170
60. Takistuse mõõtmine oommeetriga 170
61. Sageduse mõõtmine 171

XIV peatükk. Võimsuse ja töö mõõtmine 172

62. Alalisvoolu võimsuse mõõtmine 172
63. Vahelduvvoolu võimsuse mõõtmine 175
64. Keerdvoolu võimsuse mõõtmine 179
65. Alalisvoolu töö mõõtmine 180
66. Vahelduvvoolu töö mõõtmine 181
67. Keerdvoolu töö mõõtmine 181

XV peatükk. Mõõtepiirkonna laiendamine 181

68. Ampermeetrite mõõtepiirkonna laiendamine 181
69. Voltmeetrite mõõtepiirkonna laiendamine 184
70. Vattmeetrite ja voolumõõtjate mõõtepiirkonna laiendamine 185

IV. ALALISVOOLU-MOOTORID.

XVI peatükk. Üldised omadused 187

71. Töötamise põhimõte 187
72. Voolutugevus mootori ankrus 190
73. Pöördmoment 191
74. Pöörete arv 193

XVII peatükk. Haruvoolu-mootor 194

75. Voolutugevus, pöördmoment ja pöörete arv 195
76. Käivitamine 200
77. Pöörete arvu reguleerimine 202
78. Pöörlemissuuna muutmine 204
79. Pidurdamine 204
80. Haruvoolu-mootori lülitusskeem 205

XVIII peatükk. Peavoolu- ja kompaundmootorid 206

81. Peavoolu-mootor, voolutugevus, pöördmoment, pöörete arv 206
82. Pöörete arvu reguleerimine 209
83. Pöörlemissuuna muutmine 210
84. Peavoolu-mootori lülitusskeem 210
85. Kompaundmootor 210

V. VAHELDUVVOOLU-MOOTORID.

XIX peatükk. Asünkroonmootorid 212

86. Keerdväli 212
87. Staatori ja rootori mähised 218
88. Pöördmoment ja pöörete arv 221
89. Asünkroonmootorite käivitamine 227
90. Käivitamine staatori pinge alandamisega 228

Lk.
91. Käivitamine reostaadiga rootori ahelas 230
92. Eritüübilised asünkroonmootorid 232
93. Pöörete arvu reguleerimine 235
94. Reverseerimine 239
95. Võimsustegur 239

XX peatükk. Sünkroonmootorid 241
96. Töötamise põhimõte 241
97. Käivitamine 244
98. Ergutuse mõju võimsustegurile 246

XXI peatükk. Kaod mootorites ja kasuteguri määramine 247
99. Kadude liigitus 247
100. Koormusest olenevad kaod 248
101. Tühijooksukaod 248
102. Kasutegur 249
103. Kasuteguri määramine 250
104. Masinate soojenemine 255
105. Mootori kaitsemine ja jahutus 260

VI. ELEKTRISEADMED.

XXII peatükk. Valgustus 264
106. Valgustehnilised suurused ja ühikud 264
107. Hõõglambid 266
108. Armatuur 267
109. Lambi valgusvoo määramine 269

XXIII peatükk. Elektron- ja ioonriistad 270
110. Elektron- ja ioonalaldajad 271
111. Katoodvõimendajad ja ioonreleed 276
112. Fotoelemendid ja fotoreleed 283

XXIV peatükk. Energia ülekandmine ja jaotamine 287
113. Tehase energiaga toitmise skeem 287
114. Elektrijaamad 288
115. Õhu- ja maa-alused ülekandeliinid 290
116. Kõrgepingeseadmed 293
117. Töökodade võrk 294
118. Juhtmete ristlõike määramine pingelanguse järgi 295
119. Juhtmete ristlõike valik soojenemise järgi 298

XXV peatükk. Muundajad 301
120. Mootorgeneraator 301
121. Üheankru-umformer 303
122. Elavhõbedaauru-alaldaja. Füüsikaline protsess 304
123. Elavhõbedaauru-klaasalaldajad 307
124. Elavhõbedaauru-metallalaldajad 308

Lk.

XXVI peatükk. **Elektriga käitamine** 311

125. Mootori valik karakteristiku ja võimsuse järgi 311
126. Mootori võimsuse valik kestvaks töötamiseks 312
127. Mootori võimsuse valik korduv-lühiajaliseks töötamiseks 318
128. Mootori valik rühmajamile 321
129. Mootorite juhtimine 322

XXVII peatükk. **Elektrotermia. Elekterkeevitus** 334

130. Elektrotermia 334
131. Elekterkeevitus 338

Lisad:

1. Keerdvoolu-asünkroonmootorite normaalvõimsused 341
2. Alalisvoolu-mootorite normaalvõimsused 342
3. Keerdvoolu kinnised kraanamootorid, tüüp KT 342

Tõlkinud R. KULBAS ja V. PÕHJANE.

Vastutav toimetaja H. NORMAN.
Keeleline toimetaja J. VÄINASTE.

Ladumisele antud 22. X 1947. Trükkimisele antud 31. I 1948. Trükiarv 7200. Paber 67 x 97 1/16. Trükipoognaid 21,75. Arvutuspoognaid 27,8. Trükitähti trükipoognas 51125. MB-02482. Trükikoda „Kommunist", Tallinn, Pikk tän. 2. Tellimise nr. 3364.

На эстонском языке.
С. А. Астафьев и др. Электротехника.

RBL. 10.—