A. Voldek

ELEKTRI-MASINAD I

Hanno, Abb

14.08

A-32591

A. VOLDEK

ELEKTRIMASINAD

I

ALALISVOOLUMASINAD JA TRANSFORMAATORID

Tartu Riiklik Ülikool
Raamatukogu

KIRJASTUS „VALGUS" · TALLINN 1972

6T2.1
V82

Kunstiliselt kujundanud: A. Säde

Originaali tiitel:

А. И. Вольдек

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования РСФСР в качестве учебника для энергетических и электротехнических высших учебных заведений и факультетов
Издательство «Энергия», Москва 1966 Ленинград

Raamatus esitatakse elektrimasinate teooria põhiküsimused, vaadeldakse masinate ehitust, analüüsitakse töörežiime ning selgitatakse ekspluatatsioonitingimusi.

Raamat on kirjutatud vastavalt NSV Liidu Kõrgema ja Keskerihariduse Ministeeriumi poolt kinnitatud kursuse «Elektrimasinad» programmile ning on õpikuks energeetiliste ja elektrotehniliste kõrgemate õppeasutuste ning teaduskondade elektromehaanika ja -energeetika eriala üliõpilastele. Seda võivad kasutada ka mitmesuguste elektrotehnika erialade insenerid.

Vene keelest tõlkinud A. Pärlist ja E. Vallaste

2
Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu
80498

3—3—10
47—72

EESSÕNA EESTIKEELSELE VÄLJAANDELE

Käesolev raamat on ette nähtud kõrgemate koolide õpikuks ja selle andis vene keeles välja kirjastus «Energia» 1966. a. Raamatu sisu ja esituslaadi aitasid kujundada õppetöö kogemused Tallinna Polütehnilises Instituudis aastail 1950 ... 1961.

Raamatu kirjutamisel püüdsin võimalust mööda täielikult ja arusaadavalt esitada elektrimasinaehituse kaasaegse teooria ja praktika tähtsamaid küsimusi, seejuures on peamine tähelepanu pööratud elektrimasinates esinevate nähtuste füüsikalise külje selgitamisele. Rööbiti sellega osutatakse suurt tähelepanu neid nähtusi iseloomustavate matemaatiliste seoste väljatoomisele. Samuti on toodud põhilised andmed elektrimasinate ekspluatatsiooniomaduste ja praktilise kasutamise kohta.

Minu kolleegid Tallinna Polütehnilise Instituudi elektrimasinate kateedrist tegid raamatu tõlkimisel ära suure ja raske töö. Olen rõõmus, et minu raamat ilmub nüüd eesti keeles, s. o. keeles, milles selle sisu esmakordselt Tallinna Polütehnilises Instituudis loengutel esitasin.

Raamatu venekeelse väljaande võtsid lugejad vastu üsna heatahtlikult. Loodan, et raamat osutub kasulikuks abimeheks ka eesti lugejatele.

Autor

SISSEJUHATUS

S-1. ELEKTRIMASINAD JA NENDE TÄHTSUS RAHVAMAJANDUSES

Elektrienergia tähtsus rahvamajanduses ja koduses majapidamises kasvab pidevalt. Kommunistliku ühiskonna loomisel kuulub tähtis osa elektrifitseerimisele, mis on väljendatud V. I. Lenini geniaalses formuleeringus: «Kommunism — see on nõukogude võim pluss kogu maa elektrifitseerimine.»

Tööstuse, transpordi, põllumajanduse ja kommunaaltarbijate elektrifitseerimine tingib mitmepalgelise elektrotehnilise varustuse rakendamise hädavajalikkuse. Selle varustuse üheks põhiliigiks on elektrimasinad, mille ülesandeks on mehaanilise energia muundamine elektriliseks ja vastupidi, aga samuti ka üht liiki elektrienergia muundamine teiseks.

Mehaanilist energiat muundatakse elektriliseks elektrimasinate abil, mida nimetatakse *elektrigeneraatoriteks*. Generaatorid pannakse pöörlema auru-, hüdro- või gaasiturbiinide, sisepõlemismootorite või teiste primaarjõuallikate abil.

Paljudel juhtudel aga muundatakse elektrijaamades toodetud elektrienergia mehaaniliseks, et panna tööle mitmesuguseid masinaid ja mehhanisme. Selleks kasutatakse elektrimasinaid, mida nimetatakse *elektrimootoriteks*.

Praegusaja elektrijaamades toodetakse harilikult vahelduvvooluenergiat, mille ülekandmiseks tarbijatele elektriülekandeliinide ja elektrivõrkude kaudu on tingimata vaja muuta vahelduvvoolupinget. Niisugune vahelduvpinge muutmine või transformeerimine toimub *trafodeks* nimetatavate muundurite abil. Trafod on pöörlevaid osi mitteomavad staatilised elektromagnetilised aparaadid, mille töötamis- ja ehituspõhimõttes on pöörlevate elektrimasinatega palju ühist ning seepärast peetakse neid ka elektrimasinateks selle sõna laiemas mõttes. On olemas ka veel teisi elektrimasinate eriliike.

Sõltuvalt voolu liigist jagatakse elektrimasinad alalis- ja vahelduvvoolumasinateks. Nende võimsus ulatub vati murdosast sadade tuhandete kilovattideni.

1965. a. valmistati NSV Liidus elektrigeneraatoreid koguvõimsusega 14,4 miljonit kW, trafosid võimsusega *ca* 91,5 miljonit kVA, vahelduvvoolu elektrimasinaid (ühikuvõimsusega üle 0,25 kW) koguvõimsusega 19,6 miljonit kW. Peale selle toodeti küllalt palju

väiksema võimsusega elektrimootoreid ja mitmesuguseid väiksemaid eri liiki mikromasinaid automatiseeritud tööstuslike, transpordi-, riigikaitse- jne. seadmete jaoks.

Vastavalt NSV Liidu rahvamajanduse arendamise plaanile 1971. a. kuni 1975. aastani peab elektrienergia tootmine meie maal kasvama 507-lt miljardilt kilovatt-tunnilt 1970. aastal 830 ... 850 miljardi kilovatt-tunnini 1975. aastal, s. o. *ca* 1,65 korda. Ligikaudu sama palju peab kasvama ka elektrimasinate tootmine.

S-2. ÜLDANDMEID ELEKTRIMASINATEST

Nüüdisaegsetes elektrimasinates muundatakse energiat magnetvälja vahendusel. Niisuguseid masinaid nimetatakse *induktiivseteks*. On võimalik aga ka luua elektrimasinaid, milles energiat muundatakse elektrivälja vahendusel (*mahtuvuslikud masinad*). Et need pole siiski levinud, seletub järgnevaga.

Mõlemat liiki masinas toimub koostöö üksikute osade vahel ja energia muundamine välja kaudu, mis asub koos töötavate osade vahelist ruumi täitvas keskkonnas. Harilikult on see keskkond õhk või mingi teine samasuguste magnetiliste ja elektriliste omadustega aine. Praktiliselt saavutataval magnet- või elektrivälja intensiivsusel on taolise keskkonna energia hulk mahuühiku kohta magnetvälja puhul tuhandeid kordi suurem kui elektriväljal. Seepärast arendavad mõlemat liiki masinate ühesuguste välismõõtmete korral induktiivmasinad tunduvalt suuremat võimsust.

Võimalikult tugevamate magnetväljade saamiseks kasutatakse ferromagnetilisi südamikke, mis on iga elektrimasina lahutamatuks osaks. Vahelduvmagnetväljade korral valmistatakse südamikud pöörisvoolude nõrgendamise ja nende poolt põhjustatud energiakadude vähendamise eesmärgil elektrotehnilisest lehtterasest. Elektrimasina teiseks lahutamatuks osaks on traadist mähised, milles kulgeb elektrivool. Mähiste elektriliseks isoleerimiseks kasutatakse mitmesuguseid elektriisoleermaterjale.

Nagu raamatu järgnevatest osadest selgub, on elektrimasinatel pööratavuse omadus: iga elektrigeneraator võib töötada mootorina ja vastupidi, igas trafos ja masinmuunduris võib energia muundamise suuna aga pöörata vastupidiseks. Kuid iga elektrimasinatehase poolt välja lastav pöörlev masin on harilikult ette nähtud ühe kindlaksmääratud töörežiimi jaoks, näiteks generaatori või mootorina. Täpselt samuti töötab ka trafode üks mähistest elektrienergia vastuvõtjana (primaarmähis), teine (sekundaarmähis) aga energia edasiandjana. Seejuures saab parimal viisil

kohandada masinat ettenähtud töötingimustele ja jõuda materjalide optimaalseima kasutamiseni, s. t. saada suurimat võimsust masina kaaluühiku kohta.

Energia muundamine elektrimasinates on paratamatult seotud kadudega, mis tekivad ferromagnetiliste südamike ümbermagneetimisel, voolu kulgemisel läbi mähiste juhtmete, hõõrdumisel laagrites ning õhus jne. Seepärast on elektrimasina poolt tarbitav võimsus alati suurem toodetavast, või kasulikust võimsusest, kasutegur aga väiksem kui 100%. Sellele vaatamata on elektrimasinad, võrreldes soojus- ja mõnede teiste masinatega, suhteliselt suure kasuteguriga küllaltki kaasaegsed energiamuundurid. Nii näiteks on kõige võimsamates elektrimasinates kasutegur võrdne 98... ...99,5%-ga, 10-W masinates aga 20...40%. Väikeste võimsuste korral ei ole niisugune kasuteguri väärtus paljude teiste masinatega saavutatavgi.

Elektrimasinate head energeetilised parameetrid, energia juurde- ja ärajuhtimise mugavus, kõige erinevamatele võimsustele ja pöörlemiskiirustele valmistamise võimalus, aga ka teenindamismugavus ja juhtimise lihtsus on põhjustanud nende laialdase leviku.

Elektrimasinates kulutatav energia muundub soojuseks ja põhjustab masina üksikute osade soojenemist. Töökindluse ja ettenähtud -ea tagamiseks võivad masinaosad soojeneda ainult mingi kindla piirini. Soojenemise suhtes osutuvad kõige tundlikumateks elektriisoleermaterjalid; nende kvaliteediga määrataksegi elektrimasinate soojenemise lubatavad piirid. Suur tähtsus on ka elektrimasinate soojuse ärajuhtimise ja jahtumise headel tingimustel.

Energiakaod elektrimasinas kasvavad koormuse suurenemisel ja koos sellega suureneb ka soojenemine. Seepärast määratakse lubatav koormus peamiselt soojenemise lubatava piiriga, aga ka masina üksikute osade mehaanilise tugevusega, vooluvõtu tingimustega liugkontaktidelt jne. Vahelduvvoolumasinate töörežiimi elektromagnetiliste koormuste (magnetilise induktsiooni, voolutiheduse väärtuse jne.), energiakadude ja soojenemise suhtes ei määrata aktiiv-, vaid näivvõimsusega, sest magnetvoo väärtus masinas määratakse näivpingega, mitte aga selle aktiivkomponendiga. Kasulikku võimsust, millele on arvestatud elektrimasin, nimetatakse *nimivõimsuseks*. Kõiki teisi suurusi, mis iseloomustavad masina tööd sel võimsusel, nimetatakse samuti nimisuurusteks. Nende hulka kuuluvad: nimipinge, -vool, -pöörlemiskiirus, -kasutegur ja teised suurused, vahelduvvoolumasina korral veel ka nimisagedus ja nimivõimsustegur ($\cos \varphi$).

Põhilised nimisuurused tuuakse nimisildil, mis on kinnitatud masina külge. Mootori puhul on tavaliselt nimivõimsus kasulik

võimsus mootori võllil, generaatori puhul aga selle väljundklemmidelt antav elektriline võimsus. Seejuures vahelduvvoolugeneraatorite puhul antakse kas nimi-näivvõimsus või -aktiivvõimsus (viimaste NSV Liidu standardite järgi nimi-näivvõimsus). Trafode ja mõningate teiste vahelduvvoolumasinate puhul tuuakse tabelis alati nimi-näivvõimsus.

Elektrimasinate nimisuurused, teimimismeetodid, aga ka nende teised tehnilis-majanduslikud andmed ja nõuded reglementeeritakse NSV Liidus elektrimasinate riiklike standarditega.

Elektrimasinate nimipinged on ГОСТ-is kooskõlastatud elektrivõrkude standardsete nimipingetega. Elektrimootorite ja trafode primaarmähiste nimipinged võrdsustatakse seejuures elektrivõrkude standardpingetega, generaatorite ja trafode sekundaarpinged aga võetakse 5...10% võrra kõrgematena pingelangu kompenseerimiseks võrkudes. Enam kasutatavad elektrimasinate nimipinged on järgmised: alalisvoolumootoritel 110, 220 ja 440 V, alalisvoolugeneraatoritel 115, 230 ja 460 V, vahelduvvoolumootoritel ja trafode primaarmähistel 220, 380, 660 V ja 3, 6, 10 kV, generaatoritel ja trafode sekundaarmähistel 230, 400, 690 V ja 3,15; 6; 10,5; 21 kV (trafode sekundaarmähistel samuti ka 3,3; 6,6; 11 ja 22 kV). Kõrgematest pingetest on trafode primaarmähistele standardsed 35, 110, 150, 220, 330, 500 ja 750 kV ning sekundaarmähistele 38,5; 121; 165; 242; 347; 525 ja 787 kV. Kolmefaasiliste seadmete jaoks tuuakse nimisildil liinipingete väärtused.

NSV Liidus, aga samuti enamikus teistes maailma riikides on tööstuslik sagedus võrdne 50 Hz ning seepärast ehitatakse enamik vahelduvvoolumasinaid samuti 50 hertsile. USA-s ja teistes Ameerika riikides on tööstuslik sagedus võrdne 60 Hz. Mitmesugustes seadmetes (elektrotehnilised seadmed, automaatikaseadised jne.) kasutatakse ka teistsugustele sagedustele mõeldud elektrimasinaid.

Võimsuse järgi võib elektrimasinad jagada järgmistesse gruppidesse: kuni 0,5 kW — üsna väikese võimsusega masinad ehk mikromasinad, 0,5...20 kW — väikese võimsusega masinad, 20...250 kW — keskmise võimsusega masinad ja üle 250 kW — suure võimsusega masinad. Need piirid gruppide vahel on teataval määral tinglikud.

S-3. MÕÕTÜHIKUTE SÜSTEEMID

Vastavalt ГОСТ 9867-61 kasutatakse NSV Liidus elektrilisteks, magnetilisteks, mehaanilisteks ja teisteks mõõtmisteks rahvusvahelist mõõtühikute süsteemi (SI), mille põhiühikuiks on meeter, kilogramm (massiühik), sekund ja amper. Uue ГОСТ-i projekti

SI ja CGS mõõtühikuid

Suuruse nimetus	SI mõõtühiku nimetus	Mõõtühiku tähis		CGS mõõtühiku nimetus	Mõõtühiku tähis		CGS süsteemi ühiku suurus SI ühikuis
		vene	ladina		vene	ladina	
Pikkus	meeter	*м*	m	sentimeeter	*см*	cm	10^{-2} m
Mass	kilogramm	*кг*	kg	gramm	*г*	g	10^{-3} kg
Aeg	sekund	*сек*	s	sekund	*сек*	s	1 s
Elektrivool	amper	*а*	A	—	—	—	$c_0^{-1} \cdot 10$ A
Jõud	njuuton	*н*	N	düün	*дин*	dyn	10^{-5} N
Töö ja energia	džaul	*дж*	J	erg	*эрг*	erg	10^{-7} J
Võimsus	vatt	*вт*	W	—	—	—	10^{-7} W
Elektrilaeng	kulon	*к*	C	—	—	—	$c_0^{-1} \cdot 10$ C
Pinge, elektromotoorjõud, potentsiaalide vahe	volt	*в*	V	—	—	—	$c_0 \cdot 10^{-8}$ V
Elektrivälja tugevus	—	*в/м*	V/m	—	—	—	$c_0 \cdot 10^{-6}$ V/m
Elektrimahtuvus	farad	*ф*	F	—	—	—	$c_0^{-2} \cdot 10^{9}$ F
Elektritakistus	oom	*ом*	Ω	—	—	—	$c_0^{-2} \cdot 10^{-9}$ Ω
Magnetvoog	veeber	*вб*	Wb	maksvell	*мкс*	Mx	10^{-8} Wb
Magnetvootihedus (magnetiline induktsioon)	tesla	*тл, вб/м²*	T, Wb/m²	gauss	*гс*	Gs	10^{-4} T
Induktiivsus ja vastastikune induktiivsus	henri	*гн*	H	—	—	—	$c_0^{2} \cdot 10^{-9}$ H
Magneetimisergutus	amper või amperkeerd	*а; ав*	A	gilbert	*гб*	Gb	$1/4\pi \cdot 10$ A
Magnetvälja tugevus	amper meetri kohta	*а/м*	A/m	örsted	*э*	Oe	$1/4\pi \cdot 10^{3}$ A/m
Dünaamiline inertsmoment	—	*кг/м²*	kg · m²	—	*г · см²*	g · cm²	10^{-7} kg · m²

Märkus: $c_0 = 2{,}998 \cdot 10^{10} \approx 3 \cdot 10^{10}$ — valguse kiiruse arvuline väärtus tühjuses cm/s.

järgi lubatakse 1. jaanuarini 1975. a. kasutada ka absoluutset mõõtühikute süsteemi CGS, mille põhiühikuiks on sentimeeter, gramm (massiühik), sekund. Selle elektriline konstant ε_0 ning magnetiline konstant μ_0 elektromagnetilise välja võrrandite ratsionaliseerimata kuju korral on võrdsed ühega.

Tabelis S-1 on toodud SI ja CGS süsteemi ühikute nimetusi ja tähiseid, aga ka nendevahelisi arvsuhteid. Üksikute ühikute nimetused ei ole veel senini kindlaks määratud. Nurki mõõdetakse SI-s radiaanides.

SI mõõtühikuid hakatakse laialdaselt kasutama ka soojuslike ja teiste suuruste mõõtmiseks.

Käesolevas raamatus kasutatakse SI mõõtühikuid ja matemaatilised seosed esitatakse ratsionaliseeritud kujul, kusjuures kordaja 4π eemaldatakse kõige üldisematest seaduspärasustest ja viiakse sisse sfäärilist sümmeetriat iseloomustavatesse seostesse. Seejuures elektriline konstant

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi c_0^2} \cdot 10^7 \text{ faradit meetri kohta (F/m)},$$

kus $c_0 = 3 \cdot 10^8$ m/s — valguse kiirus tühjuses, ja magnetiline konstant

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ henrit meetri kohta (H/m)}.$$

Mugavuse mõttes kasutatakse raamatus mõnikord ka ühikuid, mis kujutavad endast SI ühikute kümnendosi või kümnendkordseid väärtusi, näiteks kilovatt (kW), kilovolt (kV), millimeeter (mm) jne. Tuleb aga silmas pidada, et kõikidesse matemaatilistesse seostesse, kui ei ole erilisi piiravaid tingimusi, tuleb kõikide suuruste väärtused paigutada SI põhiühikutes.

Tabel S-2

SI süsteemi mittekuuluvaid mõõtühikuid

Suuruse nimetus	Mõõtühiku nimetus	Mõõtühiku tähis	Mõõtühiku suurus SI ühikuis
Jõud	jõukilogramm	kG, kgf	9,81 N
Töö ja energia	kilogramm-meeter	kGm	9,81 J
Võimsus	hobujõud	HP, hj	735,5 W (75 kGm/s)
Energia, soojushulk	kilokalor	kcal	$427 \cdot 9{,}81 = 4{,}19 \cdot 10^3$ J
	kalor	cal	4,187 J
Energia	kilovatt-tund	kWh	$3{,}6 \cdot 10^6$ J
Rõhk	tehniline atmosfäär	at	$9{,}81 \cdot 10^4$ N/m² (1 kG/cm²)

Käesoleva raamatu valemites väljendatakse pöörlemiskiirust n kõikjal pöörete arvuga sekundis (p/s). Soovides n väljendada pöörete arvuga ühes minutis (p/min), tuleb see valemis asendada suurusega $n/60$.

Tabelis S-2 tuuakse mõned sagedamini esinevad SI süsteemi mittekuuluvad ühikud.

S-4. ELEKTRIMASINATES KASUTATAVAD MATERJALID

Materjalide klassifikatsioon. Elektrimasinates kasutatavad materjalid jagatakse kolme kategooriasse: konstruktsiooni-, aktiiv- ja isoleermaterjalid.

Konstruktsioonimaterjale kasutatakse masina niisuguste detailide ja osade valmistamiseks, mille peamiseks ülesandeks on mehaaniliste koormuste vastuvõtmine ja ülekandmine (võllid, kered, laagrikaaned ja laagripuksid, erinevad kinnitusdetailid jne.). Konstruktsioonimaterjalidena kasutatakse elektrimasinais terast, malmi, värvilisi metalle ja nende sulameid ning plastmasse, mis peavad vastama masinaehituses kehtivatele nõuetele.

Aktiivmaterjalid jagatakse juhtme- ja magnetmaterjalideks ning nendest valmistatakse masinate aktiivosi (mähised ja magnetsüdamikud).

Isoleermaterjale tarvitatakse mähiste ja teiste voolu juhtivate osade elektriliseks isoleerimiseks, aga ka elektrotehnilisest terasest lehtede teineteisest isoleerimiseks kihilises magnetsüdamikus. Eri grupi moodustavad materjalid, millest valmistatakse masinate harju, mida kasutatakse voolu ärajuhtimiseks elektrimasinate liikuvatelt osadelt.

Allpool tuuakse lühidalt elektrimasinates kasutatavate aktiiv- ja isoleermaterjalide iseloomustus.

Juhtmematerjalid. Elektrimasinates kasutatakse laialdaselt hea elektrijuhtivusega ja suhteliselt odavat juhtmematerjali — elektrolüütilist vaske, viimasel ajal aga ka rafineeritud alumiiniumi. Nende materjalide füüsikalised omadused on toodud tabelis S-3. Mõnikord valmistatakse elektrimasinate mähised vase- ja alumiiniumisulameist, mille omadused sõltuvalt nende koostisest muutuvad laiades piirides. Vasesulameid kasutatakse veel voolu juhtivate konstruktsioonide valmistamiseks (kontaktrõngad, poldid jne.). Värviliste metallide säästmiseks või mehaanilise tugevuse suurendamiseks tehakse niisugused osad tihti ka terasest.

Vase takistuse temperatuuritegur temperatuuril ϑ °C võrdub

$$\alpha_\vartheta = \frac{1}{235+\vartheta}. \qquad \text{(S-1)}$$

Tabel S-3

Vase ja alumiiniumi füüsikalised omadused

Materjal	Sort	Erikaal N/m^3	Eritakistus 20 °C temperatuuril Ωm	Takistuse temperatuuritegur ϑ [°C] 1/Kg	Joonpaisumistegur 1/K	Erisoojusmahtuvus $W \cdot s/kg \cdot K$	Erisoojusjuhtivus $W/m \cdot K$
Vask	Elektrolüütiline, lõõmutatud	$8{,}73 \cdot 10^4$	$(17{,}24 \ldots 17{,}54)\ 10^3$	$\frac{1}{235 + \vartheta}$	$1{,}68 \cdot 10^5$	390	390
Alumiinium	Rafineeritud	$(2{,}55 \ldots 2{,}65)\ 10^4$	$28{,}2 \cdot 10^3$	$\frac{1}{245 + \vartheta}$	$2{,}3 \cdot 10^{-5}$	940	210

Tabel S-4

Elektrotehnilise terase füüsikaliste omaduste sõltuvus ränisisaldusest

Terase margi esimene number	1	2	3	4
Ränisisaldus (Si), %	0,8 ... 1,8	1,8 ... 2,8	2,8 ... 4,0	4,0 ... 4,8
Erikaal, N/m^3	$7{,}65 \cdot 10^4$	$7{,}6 \cdot 10^4$	$7{,}5 \cdot 10^4$	$7{,}4 \cdot 10^4$
Eritakistus, Ωm	$25 \cdot 10^4$	$40 \cdot 10^4$	$50 \cdot 10^4$	$58 \cdot 10^4$
Takistuse temperatuuritegur, 1/K	0,0025	0,0015	0,001	0,0008
Erisoojusmahtuvus, $W \cdot s/kg \cdot K$	460	—	—	480

Kui vaskmähise takistus temperatuuril ϑ_x on võrdne r_x, siis selle takistus temperatuuril ϑ_τ on

$$r_\tau = \frac{235+\vartheta_\tau}{235+\vartheta_x} r_x. \qquad \text{(S-2)}$$

Vase takistuse sõltuvust temperatuurist kasutatakse elektrimasina mähise temperatuuri ϑ_τ määramiseks selle töötamisel kuumas olekus ümbritseva keskkonna temperatuuri ϑ_0 korral. Seose (S-2) alusel võib ületemperatuuri arvutamiseks

$$\Delta\vartheta = \vartheta_\tau - \vartheta_0$$

saada valemi

$$\Delta\vartheta = \frac{r_\tau - r_x}{r_x}(235+\vartheta_x) + \vartheta_x - \vartheta_0, \qquad \text{(S-3)}$$

kus r_τ on kuuma mähise takistus;
r_x — mähise takistus ümbritseva keskkonna temperatuuril;
ϑ_0 — ümbritseva keskkonna temperatuur masina töötamisel, siis kui mõõdetakse takistust r_τ;
ϑ_x — külma mähise temperatuur.

Seosed (S-1), (S-2) ja (S-3) on kasutatavad ka alumiiniummähiste arvutamisel, kui neis 235 asendada 245-ga.

Magnetmaterjalid. Elektrimasinate magnetahelate üksikuteosade valmistamiseks kasutatakse elektrotehnilist lehtterast, konstruktsioonilehtterast, valuterast ja malmi. Malmi kasutatakse madalate magnetiliste omaduste tõttu suhteliselt harva.

Kõige tähtsama magnetiliste materjalide klassi moodustavad elektrotehnilise lehtterase mitmesugused sordid. Hüstereesi- ja pöörisvoolukao vähendamiseks lisatakse elektrotehnilise terase koostisesse räni. Niisugused lisandid nagu süsinik, hapnik ja lämmastik halvendavad elektrotehnilise terase kvaliteeti. Suurt mõju elektrotehnilise terase kvaliteedile avaldab ka valmistamise tehnoloogia. Harilikku elektrotehnilist lehtterast saadakse kuumvaltsimisega. Viimastel aastatel on kiiresti kasvanud külmalt valtsitud tekstuurterase kasutamine, mille magnetilised omadused piki valtsimissuunda on tunduvalt paremad kui harilikul kuumalt valtsitud elektrotehnilisel terasel.

Elektrotehnilise terase sortiment ning selle terase üksikute markide füüsikalised omadused määrab ГОСТ 802-58. Elektrimasinates kasutatakse peamiselt elektrotehnilisi teraseid mark Э11, Э12, Э13, Э21, Э22, Э31, Э32, Э41, Э42, Э310, Э320, Э350. Markide nimetused algavad tähega Э, mille järele paigutatakse number 1, 2, 3 või 4, mis näitab terase räniga legeerimise astet: 1 — madalaltlegeeritud, 2 — keskmiseltlegeeritud, 3 — kõrgeltlegeeritud ja 4 — ülikõrgelt legeeritud. Teine number tähe Э järel

näitab terase garanteeritud omadusi: 1, 2 ja 3 — vastavalt normaalne, vähenenud ja madal erikadu 50 Hz juures, 4 — normaalne erikadu 400 Hz juures; 5 ja 6 — vastavalt normaalne ja suurenenud magnetiline läbitavus väljades väljatugevusega alla 1 A/m, 7 ja 8 — vastavalt normaalne ja suurenenud magnetiline läbitavus väljades väljatugevusega 10 ... 100 A/m. Kolmas number 0 pärast tähte Э tähendab, et see on külmalt valtsitud tekstuurteras. Elektrotehnilise terase omadused, sõltuvalt räni sisaldusest, on toodud tabelis S-4.

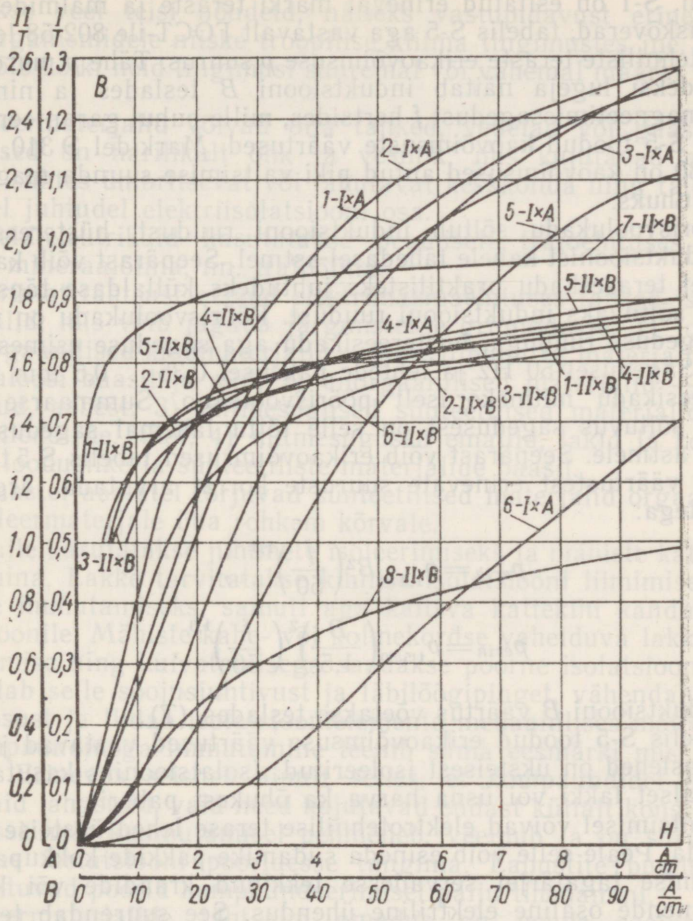
Ränisisalduse suurenemisega muutub teras rabedamaks. Mida väiksem on masin, järelikult, mida väiksemad on hammaste ja uurete mõõtmed, seda raskem on kasutada kõrgelt- ja ülikõrgelt legeeritud terast. Seepärast kasutatakse kõrgeltlegeeritud terast ainult trafode ja väga võimsate vahelduvvoolugeneraatorite valmistamiseks.

Masinates toitesagedusega kuni 100 Hz kasutatakse harilikult elektrotehnilist lehtterast paksusega 0,5 mm, mõnikord ka, eriti tra-

Tabel S-5

Erikao võimsus elektrotehnilises terases

Terase mark	Lehe paksus mm	Erikao võimsus W/kg		
		$p_{1,7/50}$	$p_{1,5/50}$	$p_{1,0/50}$
Э11	0,50	3,3	7,7	—
Э12	0,50	3,2	7,5	—
Э13	0,50	2,8	6,5	—
Э21	0,50	2,5	6,1	—
Э22	0,50	2,2	5,3	—
Э31	0,50	2,0	4,4	—
Э32	0,50	1,8	3,9	—
Э41	0,50	1,55	3,5	—
	0,35	1,35	3,0	—
Э42	0,50	1,40	3,1	—
	0,35	1,20	2,8	—
Э43	0,50	1,25	2,9	—
	0,35	1,05	2,5	—
Э310	0,50	1,10	2,45	3,2
	0,35	0,8	1,75	2,5
Э320	0,50	0,95	2,10	2,8
	0,35	0,7	1,5	2,2
Э330	0,50	0,8	1,75	2,5
	0,35	0,6	1,3	1,9



Joon. S-1. Ferromagnetiliste materjalide magneetimiskõverad: *1* — elektrotehniline teras Э11, Э21; *2* — elektrotehniline teras Э31, Э41; *3* — vähese süsiniku sisaldusega valuteras, valtsteras ja sepised elektrimasinatele; *4* — lehtteras poolustele paksusega 1 . . . 2 mm; *5* — teras 10; *6* — teras 30; *7* — külmalt valtsitud elektrotehniline teras Э330; *8* — hallmalm koostisega: C — 3,2%, Si — 3,27%, Mn — 0,56%, P — 1,05%; *I×A* — mõõtkavad telgedel *I* ja *A*; *II×B* — mõõtkavad telgedel *II* ja *B*.

fodes, paksusega 0,35 mm. Suurematel sagedustel kasutatakse õhemat lehtterast. Elektrotehnilise terase lehtede mõõtmed on standardiseeritud, kusjuures lehtede laius on 240 . . . 1000 mm, pikkus 1500 . . . 2000 mm. Viimasel ajal on laienenud elektrotehnilise terase tootmine rullidesse keritud lintidena.

Joon. S-1 on esitatud erinevat marki teraste ja malmide magneetimiskõverad, tabelis S-5 aga vastavalt ГОСТ-ile 802-58 levinud elektrotehniliste teraste erikaovõimsuse p suurus. Tähe p murdarvulise indeksi lugeja näitab induktsiooni B teslades ja nimetaja ümbermagneetimissagedust f hertsides, mille puhul garanteeritakse tabelis S-5 toodud kaovõimsuste väärtused. Markidel Э 310, Э 320 ja Э 330 on kaovõimsused antud piki valtsimise suunda magneetimise juhuks.

Pöörisvoolukadu sõltub induktsiooni ruudust, hüstereesikadu aga induktsioonist kahele lähedasel astmel. Seepärast võib ka summaarset teraseskadu praktilisteks juhtudeks küllaldase täpsusega lugeda sõltuvaks induktsiooni ruudust. Pöörisvoolukadu on võrdeline sageduse ruuduga, hüstereesikadu aga sageduse esimese astmega. Sagedusel 50 Hz ja lehtede paksusel 0,35 ... 0,5 mm ületab hüstereesikadu mitmekordselt pöörisvoolukao. Summaarse teraseskao sõltuvus sagedusest on selle tõttu lähemal sageduse esimesele astmele. Seepärast võib erikaovõimsused tabelis S-5 toodud B ja f väärtustest erinevate suuruste korral arvutada järgmiste valemitega:

$$p_{erik} = p_{1,0/50} B^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3},$$

$$p_{erik} = p_{1,5/50} \left(\frac{B}{1,5}\right)^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3},$$

kus induktsiooni B väärtus võetakse teslades (T).

Tabelis S-5 toodud erikaovõimsuse väärtused vastavad juhule, kui teraslehed on üksteisest isoleeritud. Isolatsiooniks kasutatakse spetsiaalset lakki või üsna harva ka õhukest paberit.

Stantsimisel võivad elektrotehnilise terase lehed üksteise külge kleepuda. Peale selle võib esineda südamike pakkide kokkupanekul stantsimise tagajärjel servadesse tekkinud kraadide või kidade kaudu nende osaline elektriline ühendus. See suurendab teraseskadu 1,5 ... 4,0 korda.

Isolatsiooni ning lehtede lainelisuse ja ebaühtlase paksuse tõttu ei ole kogu pressitud südamiku maht terasega täidetud. Teraspaki täitetegur lakkisolatsiooni korral on keskmiselt $k_t = 0,93$ 0,5 mm ja $k_t = 0,90$ 0,35 mm paksuste lehtede korral.

Isoleermaterjalid. Elektrimasinates kasutatavatele isoleermaterjalidele esitatakse järgmised nõuded: võimalikult suur elektriline läbilöögitugevus, mehaaniline tugevus, kuumuskindlus ja soojusjuhtivus, aga väike hügroskoopsus. Tähtis on, et isolatsioon oleks võimalikult õhukene, sest selle paksuse suurendamine halvendab soojuse ülekandumist ja vähendab uurde täitetegurit, mis omakorda põhjustab masina nimivõimsuse vähenemise. Real juhtudel

esitatakse veel teisi nõudeid, näiteks vastupidavust erinevatele mikroorganismidele niiske troopilise kliima tingimustes jne. Praktikas võib kõiki neid tingimusi suuremal või vähemal määral rahuldada.

Isoleermaterjalid võivad olla tahked, vedelad või gaasilised. Gaasilised on harilikult õhk ja vesinik, mis kujutavad endast masina suhtes ümbritsevat või jahutavat keskkonda ning täidavad paljudel juhtudel elektriisolatsiooni osa.

Vedeldielektrikuid kasutatakse peamiselt trafoehituses spetsiaalse mineraalõlina, nn. trafoõlina.

Suurimat tähtsust evivad elektrimasinaehituses tahked isoleermaterjalid, mis võib jagada järgmistesse gruppidesse: 1) looduslikud orgaanilised kiudmaterjalid — puuvillpunutis, materjalid puidutselluloosi baasil ja siid; 2) anorgaanilised materjalid — vilk, klaaskiud, asbest; 3) mitmesugused sünteetilised materjalid vaikude, kilede jne. näol; 4) mitmesugused emailid, lakid ja komponendid looduslike ja sünteetiliste materjalide baasil.

Viimastel aastatel tõrjuvad sünteetilised materjalid orgaanilisi kiudisoleermaterjale üha rohkem kõrvale.

Emaile kasutatakse juhtmete isoleerimiseks ja mähiste katteisolatsioonina. Lakke tarvitatakse kihilise isolatsiooni liimimiseks ja mähiste immutamiseks, samuti aga kaitsva kattekihi kandmiseks isolatsioonile. Mähiste kahe- või kolmekordse vahelduva lakkidega immutamise ning kuivatamisega saadakse poorne isolatsioon, mis suurendab selle soojusjuhtivust ja läbilöögipinget, vähendab hügroskoopsust ja liidab isolatsioonielemente mehaanilises mõttes.

Kompaundidega immutamine teenib sama eesmärki mis lakkidegagi. Erinevus seisneb ainult selles, et kompaundidel ei ole lenduvaid lahusteid, vaid need kujutavad endast küllalt konsistentset massi, mis kuumutamisel pehmeneb, veeldub ja on surve all võimeline isolatsiooni pooridesse tungima. Lahustite puudumise tõttu täituvad poorid kompaundeerimisel palju tihedamini.

Isoleermaterjalide tähtsaim omadus on nende soojuskindlus, mis mõjub otsustavalt elektrimasinate töökindlusele ja -eale. Elektrimasinates ja -aparaatides kasutatavad isoleermaterjalid liigitatakse soojuskindluse järgi vastavalt ГОСТ 8865-58 seitsmesse klassi järgmiste maksimaalselt lubatavate temperatuuridega ϑ_{max}:

Isolatsiooniklass		Y	A	E	B	F	H	C
ϑ_{max},	°C	90	105	120	135	155	180	> 180

Eelmiste aastate standardites sisalduvad mõnede isolatsiooniklasside vanad tähised: Y, E, F, H asemel on vastavalt O, AB, BC, CB.

Klassi Y kuuluvad vedeldielektrikutega immutamata ja neisse kastmata puuvillast, tselluloosist ja siidist kiudmaterjalid, aga samuti rida sünteetilisi polümeere (polüetüleen, polüstürool, polüvinüülkloriid jt.). Sellesse kuuluvaid isoleermaterjale kasutatakse elektrimasinates harva.

Klassi A kuuluvad puuvillast, tselluloosist ja siidist kiudmaterjalid, mida on immutatud vedelate isoleermaterjalidega või kastetud neisse. Klassi A kuuluvad veel juhtmete emailisolatsioon õli ja polüamiidresoollakkide (kapron) baasil, polüamiidkiled, butüülkautšuk ja teised materjalid, aga ka immutatud puit ja kihiline puitplastik. Antud isolatsiooniklassi immutusained on trafoõli, mineraalõli ja asfaltlakid ning teised vastava soojuskindlusega ained. Sellesse klassi kuuluvad mitmesugused lakkriided, lindid, elektrotehniline papp, getinaks, tekstoliit ja teised isoleermaterjalid. Isolatsiooniklassi A kuuluvaid materjale kasutatakse laialdaselt pöörlevates elektrimasinates võimsusega kuni 100 kW ja rohkem, aga samuti trafodes.

Klassi E kuulub emailjuhtmete isolatsioon ja elektriisolatsioon polüvinüülatsetaal (vinüfleks, metallviin), polüuretaan, epoksü-, polüester- (lavsaan-) vaikude baasil ning teised sünteetilised materjalid analoogilise soojuskindlusega. Isolatsiooniklass E põhineb uutel sünteetilistel materjalidel, mille kasutamine laieneb kiiresti väikese ja keskmise võimsusega (kuni 100 kW ja rohkem) masinates.

Klassi B kuuluvad isoleermaterjalid anorgaaniliste dielektrikute (vilk, asbest, klaaskiud) ja suurema soojuskindlusega liim-, immutus- ning kattelakkide ja orgaanilise päritoluga vaikude baasil, kusjuures orgaanilisi aineid ei või neis kaaluliselt olla üle 50%. Siia kuuluvad kõigepealt materjalid õhukese helvesvilgu baasil (mikalint, mikafoolium, mikaniit), mida kasutatakse laialdaselt elektrimasinaehituses. Viimasel ajal kasutatakse ka vilkmaterjale, mille aluseks on pidev vilklint vilgu plaadikestest suurusega kuni mõni millimeeter ja paksusega mõni mikromeeter.

Klassi B kuuluvad samuti mitmesugused sünteetilised materjalid: polüestervaigud ftaalanhüdriidi baasil, polüklorotrifluoroetüleen (fluorplast-3), mõned polüuretaanvaigud, plastmassid anorgaanilise täidisega jt.

Isolatsiooniklassi B kuuluvaid materjale kasutatakse laialdaselt keskmise ja suure võimsusega elektrimasinates.

Klassi F moodustavad materjalid vilgu, asbesti ja klaaskiu baasil, kuid orgaaniliste lakkide ja vaikude kasutamisega, mida on modifitseeritud räniorgaaniliste (polüorganosiliko-) ja teiste suure soojuskindlusega vaikudega, või teistegi vastava soojuskindlusega sünteetiliste vaikude kasutamisega (polüestervaigud

Tabel S-6

Harjade tehnilisi andmeid

Harja klass	Harja mark	Nimi-voolutihedus A/m²	Maksimaalne ringkiirus m/s	Erisurve N/m²	Siirdepingelang harjapaari kohta V	Hõõrdetegur	Kommutatsiooni liik, mille puhul soovitatakse harja kasutada
Süsigrafiit	УГ4	$7 \cdot 10^4$	12	$(1{,}96 \ldots 2{,}45)\ 10^4$	1,6 ... 2,6	0,25	Raskendatud
Grafiit	Г8	$11 \cdot 10^4$	25	$(1{,}96 \ldots 2{,}95)\ 10^4$	1,5 ... 2,3	0,25	Normaalne
Elektrografiit	ЭГ4	$12 \cdot 10^4$	40	$(1{,}47 \ldots 1{,}96)\ 10^4$	1,6 ... 2,4	0,20	Normaalne
„	ЭГ8	$10 \cdot 10^4$	40	$(1{,}96 \ldots 3{,}92)\ 10^4$	1,9 ... 2,9	0,25	Kõige raskem
„	ЭГ12	$(10 \ldots 11)\ 10^4$	40	$(1{,}96 \ldots 2{,}95)\ 10^4$	2,5 ... 3,5	0,25	Raske
„	ЭГ84	$9 \cdot 10^4$	45	$(1{,}96 \ldots 2{,}95)\ 10^4$	2,5 ... 3,5	0,25	Kõige raskem
Vaskgrafiit	МГ2	$20 \cdot 10^4$	20	$(1{,}76 \ldots 2{,}26)\ 10^4$	0,3 ... 0,7	0,20	Kõige kergem

iso- ja tereftaalhapete baasil jt.). Selle klassi isolatsioon ei tohi sisaldada puuvilla, tselluloosi ja siidi.

Klassi H kuulub isolatsioon vilgu, klaaskiu ja asbesti baasil koos räniorgaaniliste (polüorganosiliko), polüorganometallosiliko ja teiste vaikudega. Niisuguseid vaike kasutades valmistatakse mikaniiti ja sludiniiti, aga ka klaasmikaniite, -mikafooliume, -mikalinte, klaassludiniite, klaaslakkriiet, klaastekstoliiti. Klassi H kuulub ka isolatsioon polütetrafluoretüleeni tefloni (fluorplast-4) baasil. Klassi H materjale kasutatakse küllalt rasketes tingimustes (mäe- ja metallurgiatööstuses, transpordiseadmeis jm.) töötavates elektrimasinates.

Klassi C kuuluvad vilk, kvarts, klaaskiud, klaas, portselan ja teised keraamilised orgaaniliste sideaineteta või anorgaaniliste sideainetega materjalid.

Soojuse, vibratsiooni ja teiste füüsikalis-keemiliste faktorite toimel isolatsioon avaneb, s. t. tema mehaaniline tugevus ja isoleerivad omadused järk-järgult vähenevad. Katseliselt on kindlaks tehtud, et isolatsiooniklasside A ja B tööiga väheneb kaks korda temperatuuri igakordsel tõusmisel 8 ... 10 °C üle 100 °C. Analoogiliselt väheneb tööiga temperatuuri tõusmisel ka teiste isolatsiooniklasside materjalidel.

Harjad jagatakse kahte gruppi: 1) süsigrafiit, grafiit ja elektrografiitharjad; 2) metallgrafiitharjad. Esimese grupi harjade valmistamiseks kasutatakse tahma, peenestatud looduslikku grafiiti ja antratsiiti ning sideainena kivisöevaiku. Harjade toorikud lõõmutatakse. Lõõmutusrežiim määrabki grafiidi kristallide kuju tootes. Kõrgetel lõõmutustemperatuuridel muundub tahmas ja antratsiidis olev süsinik grafiidiks, mille tagajärjel niisugust lõõmutusprotsessi nimetatakse grafiteerimiseks. Teise grupi harjad sisaldavad lisaks grafiidile ka metalle (vaske, pronksi, hõbedat). Levinumad on esimese grupi harjad.

Tabelis S-6 tuuakse mõningate harjamarkide andmed. Mitmesuguste faktorite mõju harjade töötingimustele selgitatakse 6. peatükis.

ALALISVOOLUMASINAD

Esimene peatükk

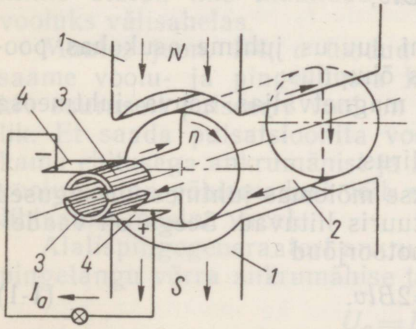
ALALISVOOLUMASINATE TÖÖTAMISPÕHIMÕTE JA EHITUS

1-1. ALALISVOOLUMASINA TÖÖTAMISPÕHIMÕTE

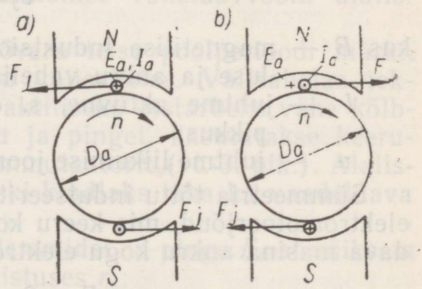
Lihtsaima masina ehitus. Joonisel 1-1 on toodud lihtsaim alalisvoolumasin, joon. 1-2 on aga selle masina skemaatiline teljesuunaline kujutis. Masina liikumatu osa, mida nimetatakse *induktoriks*, koosneb *poolustest* ja ümmargusest teras- (harvem malm-) *ikkest*, mille külge kinnitatakse poolused.

Induktor tekitab masinas põhimagnetvoo. Joonisel 1-1 kujutatud lihtsaima masina induktoril on kaks poolust *1* (joon. 1-1 ei ole näidatud induktori iket).

Masina pöörlev osa koosneb võllile kinnitatud silindrilisest *ankrust* *2* ja *kommutaatorist* *3*, ankur omakorda aga elektrotehnilise terase lehtedest koostatud *südamikust* ja selle uuretesse kinnitatud *mähisest*. Joon. 1-1 ja 1-2 näidatud lihtsaima masina ankrumähisel on üks keerd. Keeru otsad on antud juhtumil ühendatud kahe, võllist isoleeritud vasest kommutaatorilestaga (lamelliga). Kommutaatorile on asetatud kaks liikumatut harja *4*, mille abil ankrumähis ühendatakse välisahelaga.



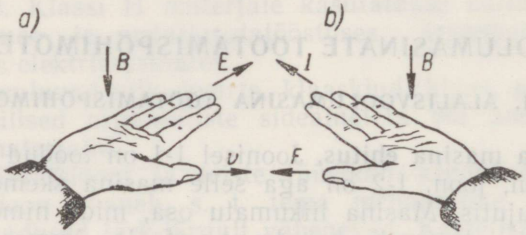
Joon. 1-1. Lihtsaim alalisvoolumasin



Joon. 1-2. Lihtsaima alalisvoolumasina töö generaatorirežiimis (*a*) ja mootorirežiimis (*b*)

Tavalistes alalisvoolumasinates luuakse põhimagnetvoog pooluste südamikele paigutatud ning alalisvooluga toidetava ergutusmähisega. Magnetvoog suundub põhjapooluselt *N* läbi ankru lõunapoolusele *S* ning viimasest läbi ikke tagasi põhjapoolusele. Poolusesüdamikud ja ike valmistatakse samuti ferromagnetilisest materjalist.

Generaatorirežiim. Vaatleme esmalt masina töötamist generaatorina.



Joon. 1-3. Paremakäejuhis (*a*) ja vasakukäejuhis (*b*)

Oletame, et masina ankur (joon. 1-1 ja 1-2, *a*) pannakse pöörlema kellaosuti liikumise suunas. Ankrumähise juhtmetes indutseeritakse siis elektromotoorjõud, mille suunda saab määrata paremakäejuhisega (joon. 1-3, *a*) ning mida näeme joon. 1-1 ja 1-2, *a*. Et pooluste magnetvoog on eelduse kohaselt muutumatu, siis see elektromotoorjõud indutseeritakse vaid ankru pöörlemise tõttu ja kannab p ö ö r l e m i s e e l e k t r o m o t o o r j õ u n i m e t u s t.

Ankrumähise juhtmes indutseeritud elektromotoorjõu suurus

$$e_j = Blv,$$

kus B — magnetilise induktsiooni suurus juhtme asukohas pooluse ja ankru vahelises õhupilus;
l — juhtme aktiivne, s. o. magnetväljas asuva juhtmeosa pikkus;
v — juhtme liikumise joonkiirus.

Sümmeetria tõttu indutseeritakse mõlemas juhtmes ühesugused elektromotoorjõud, mis keeru kontuuris liituvad. Seega on vaadeldava masina ankru kogu elektromotoorjõud

$$E_a = 2e_j = 2Blv. \qquad (1\text{-}1)$$

Elektromotoorjõud E_a on vahelduv, kuna ankrumähise juhtmed mööduvad vaheldumisi põhja- ja lõunapoolusest, mille tulemusel juhtme elektromotoorjõu suund muutub. Kõvera kuju sõltu-

valt ajast t on sarnane induktsiooni B jaotumise kõveraga piki õhupilu (joon. 1-4, *a*).

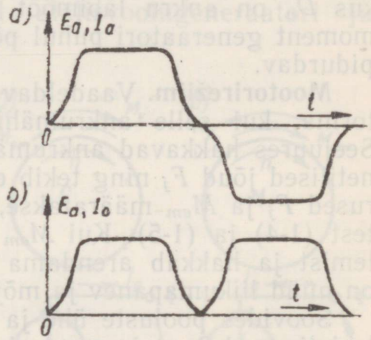
Kahepooluselise masina elektromotoorjõu sagedus f on võrdne ankru pöörlemiskiirusega n, avaldatuna pöörete arvuga sekundis:

$$f=n,$$

üldjuhul aga, kui masinal on p vahelduva polaarsusega poolusepaari, siis

$$f=pn. \qquad (1\text{-}2)$$

Kui ankrumähis on harjade abil välisahela kaudu suletud, siis tekib nii selles ahelas kui ka ankrumähises vool I_a. Ankrumähises on see vool vahelduv ning kujult sarnane elektromotoorjõu kõveraga (joon. 1-4,*a*). Välisahelas aga voolu suund ei muutu, mis on seletatav kommutaatori mõjuga. Tõepoolest, üheaegselt ankru ja kommutaatori pöördumisega 90° võrra ning elektromotoorjõu suuna muutumisega juhtmetes toimub ka kommutaatorilestade (lamellide) vahetus harjade all. Selle tõttu on ülemise harja all alati lest, mis on ühendatud põhjapooluse all asuva juhtmega, kuna alumise harja all asuv lest on ühendatud lõunapooluse all oleva juhtmega. Selle tulemusena jääb harjade polaarsus ja voolu suund välisahelas muutumatuks. Kommutaator on seega mehaaniline alaldi, mis muundab ankrumähise vahelduvvoolu alalisvooluks välisahelas.



Joon. 1-4. Lihtsaima alalisvoolumasina elektromotoorjõu ja voolu kõverad ankrus (*a*) ja välisahelas (*b*)

Muutes joon. 1-4, *a* toodud kõvera teise poolperioodi märki, saame voolu- ja pingekõvera kuju välisahelas. Välisahelas tekkiv suuruselt pulseeriv vool on praktiliseks otstarbeks vähe kõlblik. Et saada pulsatsioonita voolu ja pinget, kasutatakse keerukama ehitusega ankrumähist ja kommutaatorit (vt. 3. ptk.). Alalisvoolumasina põhiomadusi võib siiski kindlaks teha ka vaadeldava lihtsaima masina varal.

Alalispingegeneraatori ankru klemmidel on pinge E_a-st väiksem pingelangu võrra ankrumähise takistuses r_a:

$$U_a=E_a-I_a r_a. \qquad (1\text{-}3)$$

Et ankrumähise juhtmed vooluga I_a asuvad magnetväljas, mõjuvad neile ka elektromagnetilised jõud (joon. 1-2, *a*)

$$F_j = BlI_a, \tag{1-4}$$

mille suunda saab määrata vasakukäejuhise abil (joon. 1-3, *b*). Need jõud tekitavad mehaanilise pöördemomendi M_{em}, mida nimetatakse elektromagnetiliseks momendiks. Joon. 1-2, *a* kohaselt on see võrdne:

$$M_{em} = F_j D_a = BlD_a I_a, \tag{1-5}$$

kus D_a on ankru läbimõõt. Nagu joon. 1-2, *a* näha, mõjub see moment generaatori puhul pöörlemissuunale vastu ning on seega pidurdav.

Mootorirežiim. Vaadeldav lihtsaim masin võib töötada ka mootorina, kui selle ankrumähist toita alalisvooluga välisallikast. Seejuures hakkavad ankrumähise juhtmetele mõjuma elektromagnetilised jõud F_j ning tekib elektromagnetiline moment M_{em}. Suurused F_j ja M_{em} määratakse, nagu generaatori puhulgi, võrranditest (1-4) ja (1-5). Kui M_{em} on küllalt suur, alustab ankur pöörlemist ja hakkab arendama mehaanilist võimsust. Moment M_{em} on nüüd liikumapanev ja mõjub pöörlemissuunas.

Soovides pooluste ühe ja sama polaarsuse korral, et generaatori (joon. 1-2, *a*) ja mootori (joon. 1-2, *b*) pöörlemissuunad ühtiksid, peab momendi M_{em} mõjumise suund ja järelikult ka voolu I_a suund mootoris olema vastupidine, võrreldes generaatoriga (joon. 1-2, *b*).

Mootori puhul muundab kommutaator välisahelast tarbitava alalisvoolu ankrumähises vahelduvvooluks, töötades seega voolu mehaanilise inverterina.

Mootori ankrumähise juhtmed pöörlevad samuti magnetväljas ning seetõttu indutseeritakse ka neis elektromotoorjõud E_a, mille suurus määratakse võrrandiga (1-1). Selle suund mootoris (joon. 1-2, *b*) on sama mis generaatoriski (joon. 1-2, *a*). Seega on E_a mootoris suunatud vastu voolule I_a ja ankru klemmidele rakendatud pingele U_a. Sellepärast nimetatakse mootori ankru elektromotoorjõudu vastuelektromotoorjõuks.

Mootori ankrule rakendatud pinge tasakaalustub elektromotoorjõuga E_a ja pingelanguga ankrumähises:

$$U_a = E_a + I_a r_a. \tag{1-6}$$

Võrrandite (1-3) ja (1-6) võrdlusest on näha, et generaatoris $U_a < E_a$, mootoris aga $U_a > E_a$.

Pööratavuse põhimõte. Eelnevast järeldub, et iga alalisvoolumasin võib töötada nii generaatorina kui ka mootorina. See on omane kõigile pöörlevatele elektrimasinatele ja seda nimetatakse pööratavuseks.

Alalisvoolumasina üleviimiseks generaatorirežiimist mootori-

režiimi või vastupidi pooluste ja harjade muutumatu polaarsuse ja sama pöörlemissuuna puhul on vaja muuta voolu suunda ankrumähises. Seepärast võib niisugune üleminek toimuda väga lihtsalt ning teatud tingimustel isegi automaatselt.

Analoogiliselt võib toimuda töörežiimi muutmine ka vahelduvvoolumasinais.

Energia muundamine. Joon. 1-5 on näidatud mehaaniliste ja elektriliste suuruste mõjumissuunad alalisvoolugeneraatori ja -mootori ankrus.

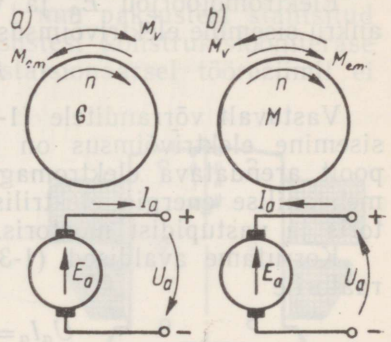
Vastavalt pöörlevale kehale rakendatud Newtoni kolmandale seadusele tasakaalustuvad sellele kehale mõjuvad liikumapanevad ja pidurdavad pöördemomendid. Seepärast generaatori püsirežiimis

$$M_{em} = M_v - M_h - M_{te}, \quad (1\text{-}7a)$$

kus M_v — primaarmootori poolt generaatori võllil arendatav moment;

M_h — elektrimasina laagrites, õhus ja kommutaatoril tekkivate hõõrdejõudude moment;

M_{te} — ankrusüdamikus hüstereesi- ja pöörisvoolukaost tingitud pidurdav moment.



Joon. 1-5. Elektromotoorjõudude, voolu ja momentide suunad alalisvoolugeneraatoris (*a*) ja -mootoris (*b*)

See võimsuskadu tekib ankrusüdamiku pöörlemisel liikumatus pooluste magnetväljas. Seejuures mõjuvad elektromagnetilised jõud ankrule pidurdavalt, avaldudes hõõrdejõududena.

Püsirežiimis töötavas mootoris

$$M_{em} = M_v + M_h + M_{te}, \quad (1\text{-}7,b)$$

kus M_v on töömasina poolt tekitatud pidurdav moment mootori võllil (tööpink, pump jne.).

Generaatoris on M_{em} liikumapanev, mootoris aga pidurdav moment. Mõlemal juhtumil on M_v ja M_{em} vastassuunalised.

Elektromagnetilise momendi M_{em} poolt arendatavat võimsust P_{em} nimetatakse elektromagnetiliseks võimsuseks ja see võrdub

$$P_{em} = M_{em}\Omega, \quad (1\text{-}8)$$

kus

$$\Omega = 2\pi n \quad (1\text{-}9)$$

on pöörlemise nurkkiirus.

Paigutame avaldisesse (1-8) M_{em} ja Ω väärtused võrranditest (1-5) ja (1-9) ning võtame arvesse, et ankru pinna joonkiirus

$$v=\frac{\Omega D_a}{2}=\pi D_a n,$$

siis

$$P_{em}=2BlD_aI_a\pi n=2BlvI_a$$

ehk võrrandi (1-1) alusel

$$P_{em}=E_aI_a. \tag{1-10}$$

Elektromotoorjõu E_a ja voolu I_a mõjul tekib ankrumähises ankru sisemine elektrivõimsus

$$P_a=E_aI_a. \tag{1-11}$$

Vastavalt võrranditele (1-10) ja (1-11) $P_{em}=P_a$, s. t. ankru sisemine elektrivõimsus on võrdne elektromagnetilise momendi poolt arendatava elektromagnetilise võimsusega. See peegeldab mehaanilise energia elektriliseks muundamise protsessi generaatoris ja vastupidist mootoris.

Korrutame avaldised (1-3) ja (1-6) I_a-ga. Siis saame generaatorile

$$U_aI_a=E_aI_a-I_a^2r_a \tag{1-12}$$

ja mootorile

$$U_aI_a=E_aI_a+I_a^2r_a. \tag{1-13}$$

Nende avaldiste vasakpoolsed osad väljendavad elektrivõimsust ankru klemmidel, parempoolsete osade esimesed liikmed — ankru elektromagnetilist võimsust ja viimased liikmed — elektrivõimsuse kadu ankrus.

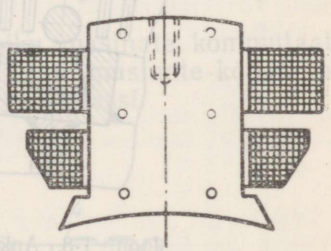
Kuigi toodud seosed on saadud lihtsaimale alalisvoolumasinale (joon. 1-1), on need üldjuhtumil kehtivad ka keerukama ankrumähise korral, sest üksikute juhtmete elektromotoorjõud ja momendid liituvad. Need seosed on energia jäävuse seaduse avaldisteks ning peegeldavad energia muundumise protsessi alalisvoolumasinas. Vastavalt nendele seostele muundub generaatori võllil primaarmootori poolt arendatav mehaaniline võimsus osaliselt kaovõimsuseks (mehaaniline ja magnetiline), ülejäänud osa aga elektrivõimsuseks ankrumähises. Selle mähise elektrivõimsus, välja arvatud kaovõimsus samas mähises, antakse välisahelasse. Mootoris kulutatakse välisahelast ankrusse antav elektrivõimsus osaliselt ankrumähise kadudele, ülejäänud osa aga muundub elektromagnetilise välja võimsuseks. Viimane muutub omakorda mehaaniliseks võimsuseks, mis, välja arvatud hõõrde- ja teraseskaovõimsus ankrus, antakse edasi töömasinale.

Eespool kindlaks tehtud üldised seaduspärasused energia muundumisest alalisvoolumasinas kehtivad ka vahelduvvoolumasinatele.

1-2. ALALISVOOLUMASINA EHITUS

Vaatleme veidi täpsemalt alalisvoolumasina ehitust ja toome selle peamiste konstruktsioonielementide lühikese kirjelduse.

Joon. 1-6 on kujutatud masina poolus. Poolusesüdamikud koostatakse elektrotehnilise terase 0,5 ... 1 mm paksustest stantsitud lehtedest, vahel ka kuni 2 mm paksustest konstruktsiooniterase lehtedest. Et pooluste magnetvoog statsionaarsel töörežiimil ei muutu, siis lehti üksteisest ei isoleerita. Poolusesüdamik tõmmatakse kokku tikkpoltidega, mille otsad on laiaks needitud. Südamiku alumist laiemat osa nimetatakse *poolusekingaks*. Poolusel asuv mähis jaotatakse tihti 2 ... 4 pooliks, et tagada paremat jahutamist. Peapoolusi on alati paarisarv, kusjuures põhja- ja lõunapoolused vahelduvad, mis saavutatakse üksikute pooluste ergutusmähiste vastava ühendamise teel. Kõikide pooluste poolid ühendatakse tavaliselt järjestikku. Ergutuseks kulutatav võimsus on piirides 0,5 ... 3% masina nimivõimsusest. Esimene arv vastab masinatele võimsusega tuhandeid kilovatte, teine — masinatele võimsusega umbes 5 kW.



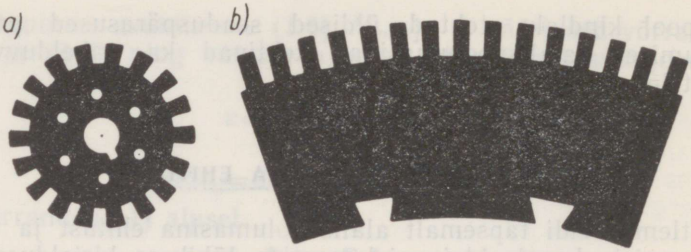
Joon. 1-6. Alalisvoolumasina peapoolus

Vooluvõtu tingimuste parandamiseks kommutaatorilt (vt. 6. ptk.) paigutatakse masinatesse, mille võimsus ületab 0,5 kW, peapooluste vahele väiksemate mõõtmetega lisapoolused. Lisapooluste südamikud valmistatakse tavaliselt konstruktsiooniterasest.

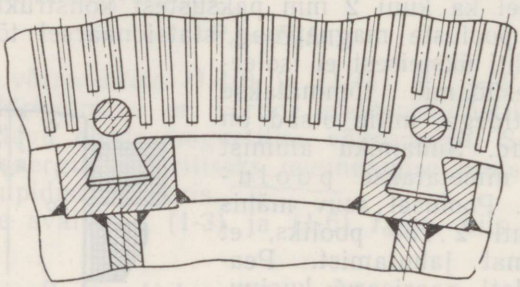
Nii pea- kui ka lisapoolused kinnitatakse ikke külge poltidega. Tänapäeva masinates valmistatakse ike tavaliselt terasest (väikese võimsusega masinates terastorudest, ka teraslehtedest ja samuti terasvaluna). Suhteliselt väikese magnetilise läbitavuse tõttu kasutatakse malmi harva.

Alalisvoolumasinates on massiivne ike ühtlasi ka kereks, s. t. selleks osaks, mille külge kinnitatakse teised masina liikumatud osad ja mille kaudu masin harilikult kinnitatakse vundamendi või mõne teise aluse külge.

Ankrusüdamik koostatakse 0,5 mm paksuse elektrotehnilise terase stantsitud ketastest (joon. 1-7,*a*). Kettad asetatakse kas



Joon. 1-7. Ankrusüdamiku terasleht (*a*) ja segment (*b*)



Joon. 1-8. Ankrusüdamiku segmentide kinnitus kalasabatapi abil

otse võllile (kui $D_a \leqslant 75$ cm), või võllile lükatavale ankrupuksile ($D_a \geqslant 40$ cm). Ankrusüdamikud, läbimõõduga 100 cm ja enam, koostatakse elektrotehnilise terase stantsitud segmentidest (joon. 1-7, *b*). Segmendid paigutatakse ankru kerele, mis valmistatakse tavaliselt lehtterasest, ja ühendatakse võlliga puksi abil. Ankru kere külge kinnitamiseks stantsitakse segmendid kas pesadega kalasabakujuliste tappide jaoks või väljaulatuvate kalasabakujuliste osadega (joon. 1-8).

Sõltuvalt valitud ventilatsioonisüsteemist võivad ankrusüdamikus olla aksiaal- või radiaalkanalid. Aksiaalkanalid moodustuvad südamiku ketastesse stantsitud avadest. Radiaalkanalid moodustatakse distantsribade abil, millega ankrusüdamik (joon. 1-9) jaotatakse üksikuteks 40 ... 70 mm pikkusteks pakkideks *1* ja 5 ... 10 mm laiusteks kanaliteks *2* nende vahel. Distantsribad needitakse või keevitatakse pakkide äärmiste plekkide külge. Ankrusüdamik surutakse kokku surveplaatide ehk äärikute *3* abil.

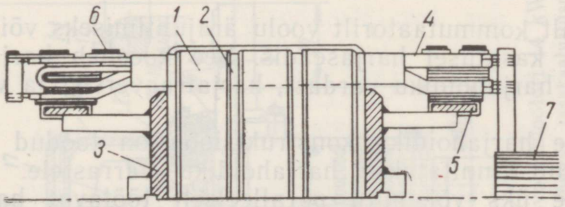
Ankrusüdamiku välispinnal asuvatesse uuretesse paigutatakse ankrumähise poolid (vt. 3. ptk.). Südamikust mõlemalt poolt välja

ulatuvad mähise laupühendused *4* (joon. 1,9) on silindrilise rõnga kujulised, toetudes oma sisemiste pindadega mähisetugedele *5*, välispindadel aga on kinnitatud bandaažidega *6*. Mähis ühendatakse kommutaatoriga *7*.

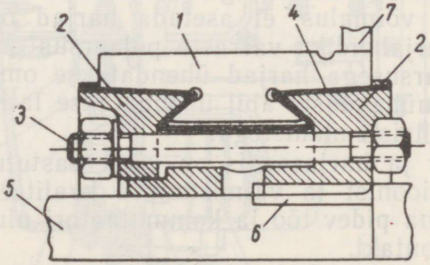
Õhupilu laius pooluste ja ankru vahel on väikestes masinates väiksem kui 1 mm, suurtes aga ulatub kuni 1 cm.

Väikese võimsusega masina kommutaatori ehitus on näha joon. 1-10. Kommutaator koosneb 3 ... 15 mm paksustest vasklestadest (lamellidest) *1*, mis on üksteisest isoleeritud 1 mm paksuste mikaniitvahekutega. Lestad on kiilukujulise ristlõikega ning moodustavad koos vahekutega õõnessilindri, mis kinnitatakse surveäärikutega *2* ja tõmmatakse kokku tõmbepoltidega *3*. Surveäärikutest on kommutaatorilestad isoleeritud mikaniitmansettidega *4*. Töökorras kommutaator kinnitatakse võllile *5* liistu *6* abil. Iga lesta külge ühendatakse ankrumähise ühendusjuhtmed jooteliblede ehk lipukeste *7* kaudu.

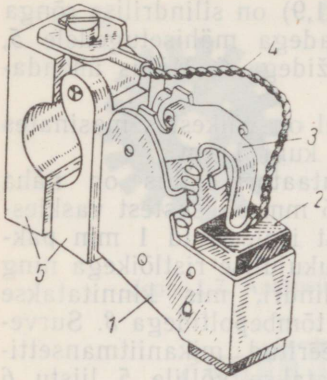
Niisugune on põhimõtteliselt enamiku masinate kommutaatorite ehitus. Viimasel ajal valatakse väikeste masinate kommutaatorite lestad koos mikaniitvahekutega plastmassi.



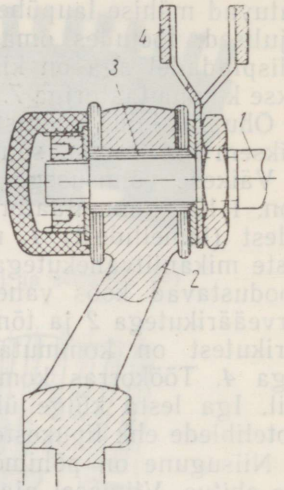
Joon. 1-9. Ankrusüdamik koos mähisega



Joon. 1-10. Kommutaator



Joon. 1-11. Harjahoidik koos harjaga:
1 — harjapesa; *2* — hari; *3* — survevedru; *4* — voolu juhtiv kaabel; *5* — harjahoidiku kinnitusklamber



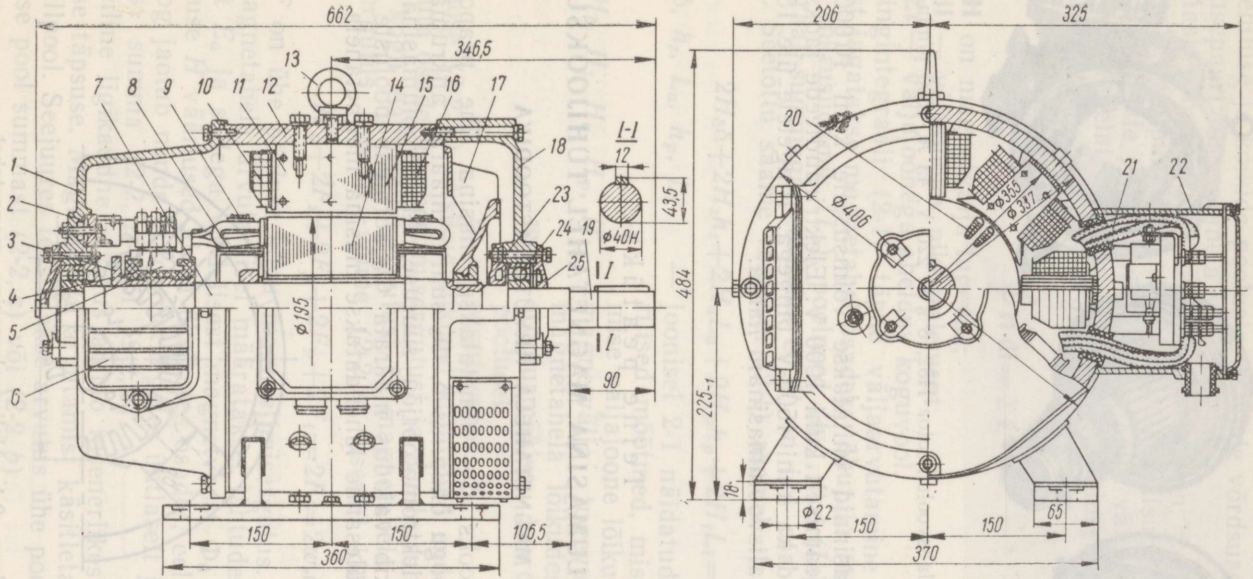
Joon. 1-12. Harjahoidiku varda kinnitus traaversile:
1 — varras; *2* — traavers; *3* — isolatsioon; *4* — voolu kogumislatt

Pöörlevalt kommutaatorilt voolu ärajuhtimiseks või sinna juhtimiseks on kasutusel harjaseadis. See koosneb harjadest, harjahoidikust, harjahoidiku vardast, harjatraaversist ja voolu kogumislattidest.

Tüüpiline harjahoidiku konstruktsioon on toodud joon. 1-11. Harjahoidikud kinnitatakse harjahoidiku varrastele. Igale neist paigutatakse üks või mitu paralleelselt töötavat harjahoidikut koos harjadega. Harjahoidiku vardad, mille arv on tavaliselt võrdne peapooluste arvuga, kinnitatakse traaversile ja isoleeritakse sellest (joon. 1-12). Traavers kinnitatakse masina liikumatu osa külge: väikese ja keskmise võimsusega masinates laagrikilbi rummu, suurtes masinates aga kere külge. Tavaliselt on ette nähtud traaversi pööramise võimalus, et asetada harjad õigesse asendisse (vt. 3. ptk.). Harjahoidiku varraste polaarsus on vahelduv, ning kõik sama polaarsusega harjad ühendatakse omavahel kogumislattide abil. Haruühenduste abil ühendatakse latid väljastusklemmide või masina teiste mähistega.

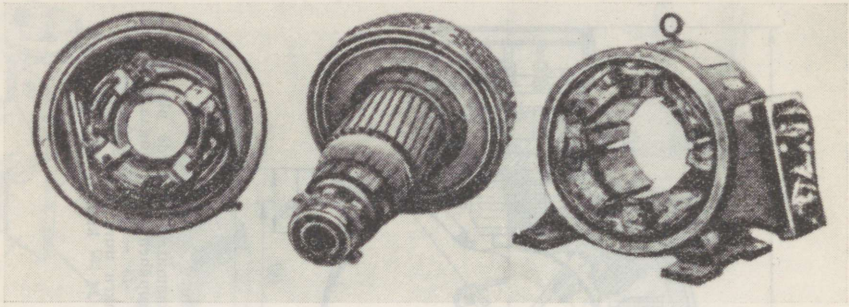
Kommutaator ja harjaseadis on väga vastutusrikkad sõlmed, mille konstruktsioonist ja valmistamise kvaliteedist sõltub suurel määral masina pidev töö ja kommutaatori ning harjade vaheline elektriline kontakt.

Joon. 1-13 on toodud alalisvoolumasina põhimõttejoonis, joon. 1-14 aga foto.



Joon. 1-13. Alalisvoolumootori 14 kW, 220 V, 1500 p/min üldvaade:

1 — eesmine laagrikilp; *2* — traavers; *3* — rõngas tasakaalustusraskuste paigutamiseks; *4* — kommutaatorilestade plastmasskinnitus; *5* — kommutaatorilest; *6* — vaateava kaas; *7* — võll; *8* — mähisehoidik; *9* — ankru laupühenduste bandaaž; *10* — lisapooluse mähis; *11* — lisapooluse südamik; *12* — kere; *13* — tõsterõngas; *14* — ankrusüdamik; *15* — peapooluse südamik; *16* — peapooluse mähis; *17* — ventilaator; *18* — tagumine laagrikilp; *19* — võlli vaba ots; *20* — ankru uure; *21* — ühendusjuhtmed (väljastused) mähistest klemmikarbi liistule; *22* — klemmikarp; *23* — tagumise laagri kaas; *24* — kuullaager; *25* — eesmise laagri kaas



Joon. 1-14. Alalisvoolumootor П52, 8 kW, 220 V, 43 A, 1500 p/min

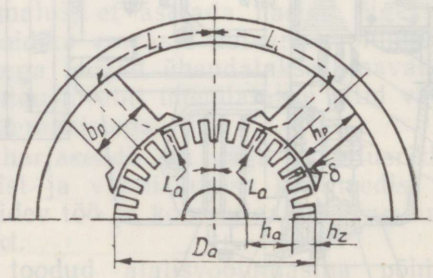
Alalisvoolumasinaid ehitatakse võimsustele kuni 10 000 kW ning pingetele peamiselt kuni 1000 V. Elektriraudteede jaoks toodetakse masinaid ka kuni 1500-V pingega. Pingetele üle 1500 V valmistatakse alalisvoolumasinaid harva.

Teine peatükk

ALALISVOOLUMASINA MAGNETAHEL TÜHIJOOKSUL

2-1. MAGNETAHELA ARVUTUSMETOODIKA

Põhimagnetvooks Φ_δ nimetatakse masina ühe peapooluse kohta tulevat voogu õhupilus δ. Φ_δ suurus määrab ankrumähises indutseeritava elektromotoorjõu suuruse. Alalisvoolumasina projekteerimisel tekib vajadus määrata Φ_δ sõltuvus pooluste ergutusvoolust. See ülesanne lahendatakse masina magnetahela arvu-



Joon. 2-1. Alalisvoolumasina magnetahel

tamise teel tühijooksul, kui ankruvool $I_a = 0$. Masina sümmeetrilise ehituse ja kõikide pooluste voogude võrdsuse tõttu piisab ühe poolusepaari magnetahela vaatlemisest.

Masina magnetahel on kujutatud joon. 2-1, kusjuures igale poolusele on punktiirjoonega näidatud niisugune magnetvoo Φ_δ väljajoon, mille pikkust võib lugeda kõigi väljajoonte keskmiseks.

Magnetahelat võib arvutada koguvooluseaduse põhjal keskmise väljajoone jaoks joon. 2-1:

$$\oint \mathbf{H}\, d\mathbf{l} = \Sigma i, \qquad (2\text{-}1)$$

kus **H** on magnetvälja tugevus;
dl — väljajoone pikkuselement;
Σi — väljajoonega ahelduv koguvool.

Ringintegraali (2-1) täpne väljaarvutamine on raske. Seepärast jagatakse magnetahel osadeks: õhupilu (δ), ankru hambad (h_z), ankrusüdamik (L_a), poolused (h_p), ike (L_i) ja asendatakse integraal summaga, eeldades et H on iga osa ulatuses muutumatu. Seetõttu saame võrrandi (2-1) asemel

$$2H_\delta\delta + 2H_z h_z + 2H_a L_a + 2H_p h_p + 2H_i L_i = 2w_i i_i, \qquad (2\text{-}2, a)$$

kus δ, h_z, L_a, h_p, L_i — joonisel 2-1 näidatud osade geomeetrilised mõõtmed, mis võrduvad keskmise väljajoone lõikude pikkustega;
H_δ, H_z, H_a, H_p, H_i — magnetvälja tugevused vastavates magnetahela lõikudes;
w_e — ergutusmähise keerdude arv ühel poolusel;
i_e — ergutusvool.

Seose (2-2, a) üksikud liikmed kujutavad endast magnetahela üksikute osade magneetimisergutusi ja nende summa — poolusepaari kogu magneetimisergutust. Et magnetahela iga osa magneetimisergutus $F = Hl$, võime (2-2, a) asemel kirjutada

$$2F_\delta + 2F_z + 2F_a + 2F_p + 2F_i = 2F = 2w_e i_e, \qquad (2\text{-}2, b)$$

kus F on ühe pooluse kogu magneetimisergutus.

Magnetahela arvutamisel määratakse, lähtudes etteantud suurusest E_a ja sellega võrdelisest magnetvoost Φ_δ õhupilus, väljatugevuse H väärtused ahela üksikutes osades, eeldades seejuures, et voog jaotub nende osade ristlõigetes ühtlaselt ja seejärel arvutatakse summa (2-2, a) või (2-2, b).

Selline ligikaudne arvutus annab insenerlikes arvutustes küllaldase täpsuse. Magnetahela arvutamist käsitletakse üksikasjaliselt allpool. Seejuures teostatakse arvutus ühe pooluse kohta, s. t. leitakse pool summast (2-2, a) või (2-2, b).

2-2. ÕHUPILU MAGNETVÄLI JA MAGNEETIMISERGUTUS

Sile ankur. Magnetväli on kõige komplitseerituma iseloomuga õhupilus, mille kohta tuleb kõige suurem osa summaarsest magneetimisergutusest (60 . . . 80%).

Esialgu eeldame, et uurded ja radiaalsed ventilatsioonikanalid ankru pinnal puuduvad.

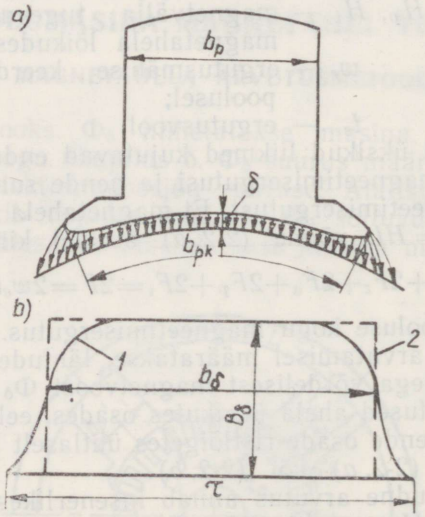
Joon. 2-2, *a* on näidatud magnetvälja jaotus õhupilus piki ankru ümbermõõtu ja joon. 2-2, *b* — magnetilise induktsiooni B_δ jagunemise kõver *1* poolusejaotuse ulatuses

$$\tau = \frac{\pi D_a}{2p},$$

kus D_a on ankru välisläbimõõt ja $2p$ — pooluste arv.

Arvutuse lihtsustamiseks asendatakse kõver *1* ristkülikuga *2* (kriipsjoon joon. 2-2, *b*), mille laius on b_δ ja kõrgus võrdub induktsiooni B_δ tegeliku väärtusega õhupilus pooluse keskkohas. Ristküliku pindala võrdub kõvera *1* ja abstsissteljega piiratud kujundi pindalaga.

Suurust b_δ nimetatakse arvutuslikuks poolusekaare pikkuseks; see erineb mõnevõrra tegelikust poolusekaare pik-



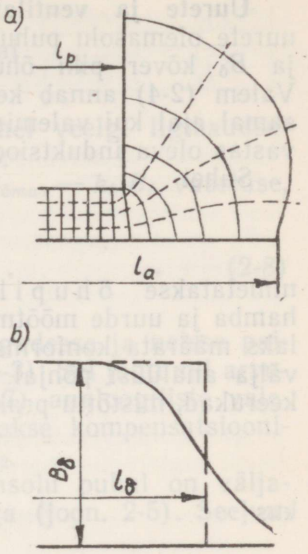
Joon. 2-2. Magnetilise induktsiooni jaotus õhupilus sileda ankru puhul

kusest b_{pk} (joon. 2-2, *a*). Selle erinevuse suurus sõltub poolusekinga kujust. Arvutusliku poolusekaare pikkuse b_δ täpse väärtuse võib kindlaks määrata õhupilus väljapildi ehitamise teel graafiliselt või arvutuslikult konformsete teisenduste meetodil. Nende meetodite kasutamine on aga suure töömahukuse tõttu raskendatud ja seepärast kasutatakse ligikaudseid seoseid, mis on arvutuslikult kindlaks määratud poolusekingade mitmesuguse kuju jaoks. Joon. 2-2, *a* näidatud poolusekinga kuju puhul

$$b_\delta = b_{pk},$$

kuid ühtlase õhupilu laiuse δ puhul kogu poolusekinga laiusel

$$b_\delta = b_{pk} + 2\delta.$$



Joon. 2-3. Magnetväli ankrusüdamiku otstes

Suurust

$$\alpha_\delta = \frac{b_\delta}{\tau}$$

nimetatakse arvutuslikuks pooluse katteteguriks. Lisapoolustega masinatel $\alpha_\delta = 0{,}6 \ldots 0{,}75$, lisapoolusteta masinatel $\alpha_\delta = 0{,}70 \ldots 0{,}85$.

Ankru teljesuunaline pikkus l_a võetakse sageli 5 ... 10 mm suurem pooluste pikkusest l_p (joon. 2-3, *a*). Seejuures ankru otsmises osas induktsioon nõrgeneb (joon. 2-3, *b*) ja ankru otspinnast sisenev voog väheneb. Selle tulemusena vähenevad otspinda läbivast voost tingitud pöörisvoolud surveplaatides ja ankrusüdamikus. Ankru arvutuslikuks pikkuseks võetakse antud juhul

$$l_\delta = \frac{l_a + l_p}{2}. \qquad (2\text{-}3)$$

Seega oleks induktsioon õhupilus

$$B_\delta = \frac{\Phi_\delta}{b_\delta l_\delta} \qquad (2\text{-}4)$$

ja õhupilu magneetimisergutus sileda ankru puhul

$$F_\delta = H_\delta \delta = \frac{B_\delta \delta}{\mu_0}. \qquad (2\text{-}5)$$

Uurete ja ventilatsioonikanalite mõju arvestamine. Ankru uurete olemasolu puhul väli nende kohal nõrgeneb (joon. 2-4, *a*) ja B_δ kõver piki õhupilu muutub hambuliseks (joon. 2-4, *b*). Valem (2-4) annab keskmise induktsiooni väärtuse B_δ õhupilus, samal ajal kui valemisse (2-5) on vaja asetada hamba keskkoha vastas oleva induktsiooni väärtus $B_{\delta max}$.

Suhet

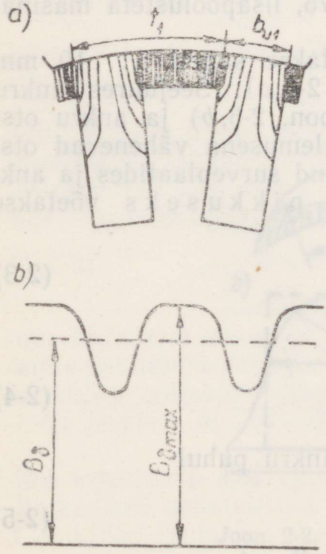
$$k_{\delta 1}=\frac{B_{\delta max}}{B_\delta}$$

nimetatakse õhupiluteguriks. Selle suurus on sõltuv hamba ja uurde mõõtmete suhetest. Teguri $k_{\delta 1}$ suuruse võib kindlaks määrata konformsete teisenduste meetodil uurete ja õhupilu välja analüüsi põhjal. Seejuures saadavad seosed on aga üpris keerukad, mistõttu praktikas kasutatakse ligikaudset seost

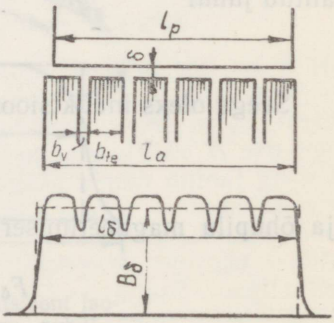
$$k_{\delta 1}=\frac{t_1}{t_1-\gamma_1\delta}, \qquad (2\text{-}6)$$

kus

$$\gamma_1=\frac{\left(\frac{b_1}{\delta}\right)^2}{5+\frac{b_1}{\delta}}; \qquad (2\text{-}7)$$



Joon. 2-4. Magnetväli õhupilus hambulise ankru puhul



Joon. 2-5. Õhupilu magnetvälja jaotustelje suunas

b_1 — uurdeava laius ankru pinnal;

$t_1 = \frac{\pi D_a}{Z}$ — hamba samm ankru pinnal

ja Z — ankru hammaste arv.

Võrrandi (2-6) asemel kasutatakse vahel veelgi ligikaudsemaid valemeid. Tavaliselt $k_{\delta 1} = 1{,}10 \ldots 1{,}35$.

Asetades valemisse (2-5) B_δ asemele $B_{\delta max} = k_{\delta 1} B_\delta$ väärtuse, saame

$$F_\delta = \frac{k_{\delta 1} \delta B_\delta}{\mu_0}. \tag{2-8}$$

Mõnikord tehakse uurded ka poolusekingadesse ja neisse paigutatakse nn. kompensatsioonimähis (vt. § 5-3). Sel juhtumil arvutatakse tegur $k_{\delta 1}$ võrranditele (2-6) ja (2-7) analoogiliste valemitega, kusjuures t_1 ja b_1 asemele asetatakse kompensatsioonimähise hamba samm t_2 ja uurdeava laius b_2.

Radiaalsete ventilatsioonikanalite olemasolu puhul on väljakõver ka telje suunas hambulise iseloomuga (joon. 2-5). Seejuures arvutatakse õhupilutegur järgmiselt:

$$k_{\delta 3} = \frac{b_{te} + b_v}{b_{te} + b_v + \gamma_3 \delta}, \tag{2-9}$$

kus

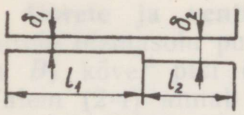
$$\gamma_3 = \frac{\left(\frac{b_v}{\delta}\right)^2}{5 + \frac{b_\delta}{\delta}}, \tag{2-10}$$

b_{te} — terasepaki pikkus ja b_v — ventilatsioonikanali laius.

Tuleb märkida, et mõnikord arvestatakse radiaalsete ventilatsioonikanalite mõju veelgi ligikaudsemalt, võttes valemis (2-3) l_a võrdseks mitte kogu ankrusüdamiku pikkusega (joon. 2-5), vaid summaarse terasepakkide pikkusega pluss pool summaarsest kanalite laiusest. Tegurit $k_{\delta 3}$ pole seejuures vaja arvutada.

Bandaažisüvendite mõju arvestamine. Kui ankrumähis kinnitatakse südamikule bandaažiga, suurendavad nende all olevad süvendid õhupilu ebaühtlust. Kuid selle ebaühtluse arvessevõtmine täiendava, analoogiliselt valemile (2-6) määratava õhupiluteguriga ei õigusta ennast. See tegur on saadud eeldusel, et uurded ja ventilatsioonikanalid on sügavad, kuid bandaažisüvendid on madalad. Sellisel juhtumil võib arvutuslikud seosed saada alljärgnevalt.

Kui õhupilu kuju telje suunas on astmeline (joon. 2-6), siis



Joon. 2-6. Bandaažisüvendiga ankur

õhupilu suhteline magnetiline juhtivus ankru ümbermõõdu pikkusühiku kohta

$$\lambda_{12}=\frac{l_1}{\delta_1}+\frac{l_2}{\delta_2},$$

ning juhtumil, kui $\delta_2=\delta_1$,

$$\lambda_1=\frac{l_1+l_2}{\delta_1}.$$

Suhe

$$k_{\delta 4}=\frac{\lambda_1}{\lambda_{12}}=\frac{(l_1+l_2)\,\delta^2}{l_1\delta_2+l_2\delta_1}$$

määrab juhtivuse vähenemise või ekvivalentse õhupilu suurenemise teguri suurema õhupiluga astme δ_2 olemasolul. Selle seose põhjal on ekvivalentse õhupilu suurenemise tegur mittemagnetilisest materjalist bandaaži tõttu

$$k_{\delta 4}=1+\frac{n_b b_b h_b}{l_\delta(\delta_1+h_b)-n_b b_b h_b}, \qquad (2\text{-}11)$$

kus n_b — bandaažisüvendite arv;
b_b — bandaažisüvendi laius;
h_b — bandaažisüvendi sügavus.

Kui bandaažid on valmistatud magnetmaterjalist, tuleb bandaažisüvendi ristlõiget $n_b b_b h_b$ vähendada bandaažitraatide summaarse ristlõike võrra või võtta $k_{\delta 4}$ ligikaudu võrdseks ühega.

Kokkuvõte. Nagu selle küsimuse analüüs näitab, võib üldise õhupiluteguri arvutada õhupilu osategurite korrutisena:

$$k_\delta=k_{\delta 1}k_{\delta 2}k_{\delta 3}k_{\delta 4}. \qquad (2\text{-}12)$$

Siis saame valemi (2-8) asemel

$$F_\delta=\frac{k_\delta\delta B_\delta}{\mu_0}. \qquad (2\text{-}13)$$

Seejuures B_δ määratakse nagu ennegi võrrandiga (2-4). Suurust

$$\delta'=k_\delta\delta$$

valemis (2-13) võib nimetada ekvivalentseks õhupilu laiuseks. Alalisvoolumasinates muutub k_δ suurus [vt. valemit (2-12)] piirides $k_\delta=1{,}1\ldots1{,}8$.

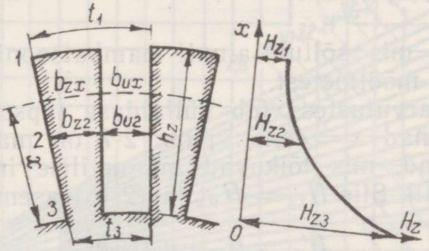
Praktilistes arvutustes väljendatakse B_δ sageli gaussides ($B_{\delta G}$) ja δ sentimeetrites (δ_{cm}). Minnes valemis (2-13) SI-süsteemi ühikutelt üle ülalmainitud ühikutele, saame

$$F_\delta=\frac{k_\delta\delta_{cm}\cdot10^{-2}B_{\delta G}\cdot10^{-4}}{4\pi\cdot10^{-7}}=0{,}8k_\delta\delta_{cm}B_{\delta G}. \qquad (2\text{-}14)$$

Mõningatel juhtudel võetakse arvesse ka tehnoloogilistel põhjustel pooluste ja ikke vahel paratamatult tekkiva väikese (suurusega 0,01 ... 0,03 cm) õhupilu magneetimisergutust.

2-3. HAMBATSOONI MAGNETVÄLI JA MAGNEETIMISERGUTUS

Magnetvälja jaotumise keerukuse ja magneetimisergutuse osatähtsuse suhtes kogu magnetahela magneetimisergutusele on õhupilu kõrval järgmiseks hambatsoon. Selle tsooni magneetimisergutust on võimalik praktilisteks eesmärkideks küllaldase täpsusega arvutada alljärgnevalt.



Joon. 2-7. Magnetvälja tugevuse muutumine piki hammast

Vaatleme hambatsooni ristlõiget kaugusel x hamba jalast (joon. 2-7).

Hambajaotusele vastav magnetvoog

$$\Phi_t = B_t t_1 l_\delta. \tag{2-15}$$

Osa sellest magnetvoost Φ_{zx} hargneb hambasse ja ülejäänud osa Φ_{ux} uurdesse. Geomeetriliste mõõtmete suhete ja magnetilise küllastuse muutuste tõttu muutub Φ_{zx} ja Φ_{ux} vaheline suhe piki hamba kõrgust.

Jagame võrrandi

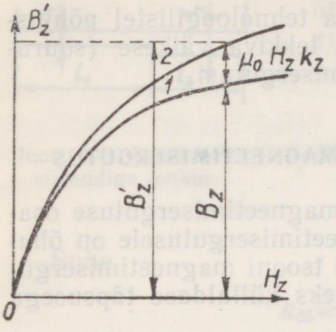
$$\Phi_t = \Phi_{zx} + \Phi_{ux}$$

mõlemad pooled hamba ristlõikepinnaga S_{zx}:

$$\frac{\Phi_t}{S_{zx}} = \frac{\Phi_{zx}}{S_{zx}} + \frac{\Phi_{ux}}{S_{ux}} \cdot \frac{S_{ux}}{S_{zx}} \tag{2-16}$$

kus S_{ux} on uurde ristlõikepind kaugusel x hamba jalast.

Võrrandi (2-16) vasak pool kujutab endast arvutuslikku magnetilist induktsiooni hambas B'_{zx}, s. o. induktsiooni $\Phi_{ux} = 0$ puhul.



Joon. 2-8. B_z ja H_z määramine

Võrrandi (2-16) parema poole esimene liidetav kujutab tegelikku induktsiooni hambas B_{xz}, kuna teise liikme asemel võib kujutada

$$B_{ux}\frac{S_{ux}}{S_{zx}}=\mu_0 H_{ux}k_{zx},$$

kus H_{ux} on magnetvälja tugevus uurdes ja

$$k_{zx}=\frac{S_{ux}}{S_{zx}}=\frac{S_{tx}-S_{zx}}{S_{zx}}=\frac{S_{tx}}{S_{zx}}-1$$

— hambategur, mis sõltub ainult hambatsooni antud ristlõike geomeetrilistest mõõtmetest.

Praktilistes arvutustes võib küllaldase täpsusega eeldada, et silindrilised pinnad $x=\text{const}$. joon. 2-7 on magnetilised samapotentsiaalipinnad, mis lõikuvad magnetilise induktsiooni joontega täisnurga all. Siis $H_{zx}=H_{ux}$ ja (2-16) asemel saame

$$B'_{zx}=B_{zx}+\mu_0 H_{zx}k_{zx}. \qquad (2\text{-}17)$$

Et B'_{zx} ja k_{zx} on etteantud Φ_δ ja geomeetriliste mõõtmete puhul kergesti arvutatavad, siis valemi (2-17) ja graafilisel kujul antud hammaste materjali magneetimiskõvera (joon. 2-8, kõver *1*) järgi võib määrata kaks tundmatut suurust B_{zx} ja H_{zx}. Selleks ehitame kõvera *2* (joon. 2-8), liites kõvera *1* ordinaatidele $\mu_0 H_{zx}k_{zx}$ väärtused.

Kui teostada selline arvutus reale hambatsooni ristlõigetele, võib ehitada kõvera $H_{zx}=f(x)$ (joon. 2-7) ja määrata hambatsooni magneetimisergutuse:

$$F_z=\int_0^{h_z} H_{zx}\,dx.$$

Praktiliste arvutuste puhul asendatakse see integraal Simpsoni ligikaudse valemiga. Siis

$$F_z=H_z h_z, \qquad (2\text{-}18)$$

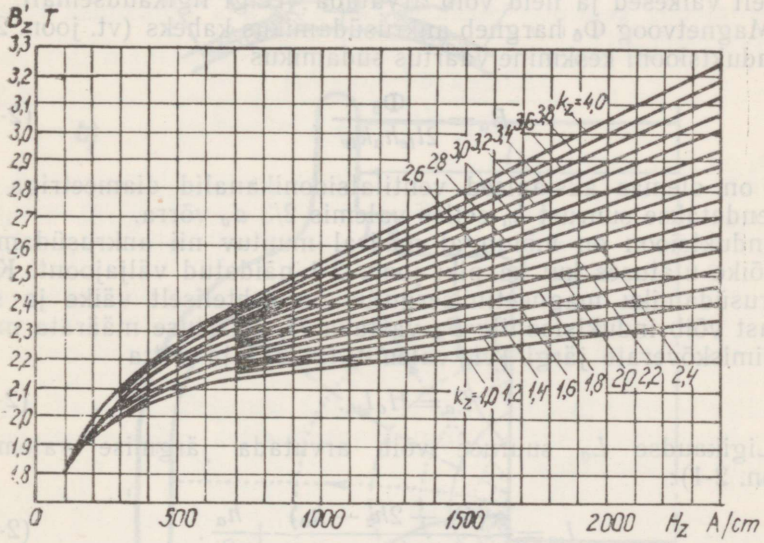
kus

$$H_z=\frac{H_{z1}+4H_{z2}+H_{z3}}{6} \qquad (2\text{-}19)$$

ning H_{z1}, H_{z2}, H_{z3} määratakse ülalnäidatud viisil hambatsooni kolme ristlõike (ülemise *1*, keskmise *2* ja alumise *3*) jaoks

(joon. 2-7). Seejuures kasutatakse erinevate k_z väärtuste jaoks ehitatud kõverate parve (joon. 2-9), valides kõverad vastavalt antud k_{z1}, k_{z2}, k_{z3} väärtustele, mis arvutatakse valemiga

$$k_{zi}=\frac{t_i l_\delta}{b_{zi} l_{te} k_{te}}. \qquad (2\text{-}20)$$



Joon. 2-9. Kõverad B'_z ja H_z määramiseks elektrotehnilisest lehtterasest Э11, Э12 ja Э21 hammastes

Samal ajal arvutatakse B'_{z1}, B'_{z2}, B'_{z3} väärtused valemiga

$$B'_{zi}=\frac{t_i l_\delta}{b_{zi} l_{te} k_{te}} B_\delta \qquad (i=1,\ 2,\ 3). \qquad (2\text{-}21)$$

Seostes (2-20) ja (2-21) suurus

$$l_{te}=l_a-n_k b_k$$

kujutab endast terasepakkide summaarset pikkust ja k_{te} — terasepaki täitetegurit (vt. § S-4).

Selleks et lihtsustada arvutamist äsja kirjeldatud meetodil, määratakse mõningatel juhtudel $H_{z1/3}$ väärtus hamba kõrguse ühel kolmandikul, arvestades hamba jalast. Seejuures

$$F_z=H_{z1/3} h_z. \qquad (2\text{-}22)$$

Kui $B'_z < 1{,}8$ T, hammas ei ole küllastunud ja uurdesse hargneb tähtsusetu osa magnetvoost. Seepärast võib antud juhul kasutada põhimagneetimiskõverat (kõver $k_z = 1{,}0$, joon. 2-9).

2-4. ANKRUSÜDAMIKU, POOLUSTE JA IKKE MAGNEETIMISERGUTUS

Ankrusüdamiku, pooluste ja ikke magneetimisergutused on suhteliselt väikesed ja neid võib arvutada veelgi ligikaudsemalt.

Magnetvoog Φ_δ hargneb ankrusüdamikus kaheks (vt. joon. 2-1) ja induktsiooni keskmine väärtus südamikus

$$B_a = \frac{\Phi_\delta}{2 l_{te} h_a k_{te}} . \qquad (2\text{-}23)$$

Kui on olemas aksiaalsed ventilatsioonikanalid diameetriga d_v, vähendatakse suurust h_a selles valemis 2/3 d_v võrra.

Induktsioon on mõningal määral muutuv nii ankrusüdamiku ristlõike ulatuses kui ka piki joon. 2-1 näidatud väljajoont. Kuid ankrusüdamiku magneetimisergutus on suhteliselt väike ja seepärast võib induktsioonile B_a vastava H_a väärtuse määrata magneetimiskõverate järgi [vt. valemit (2-23)] ja võtta

$$F_a = H_a L_a . \qquad (2\text{-}24)$$

Ligikaudse L_a suuruse võib arvutada järgmise valemiga (joon. 2-1):

$$L_a = \frac{\pi (D_a - 2h_z - h_a)}{4p} + \frac{h_a}{2} . \qquad (2\text{-}25)$$

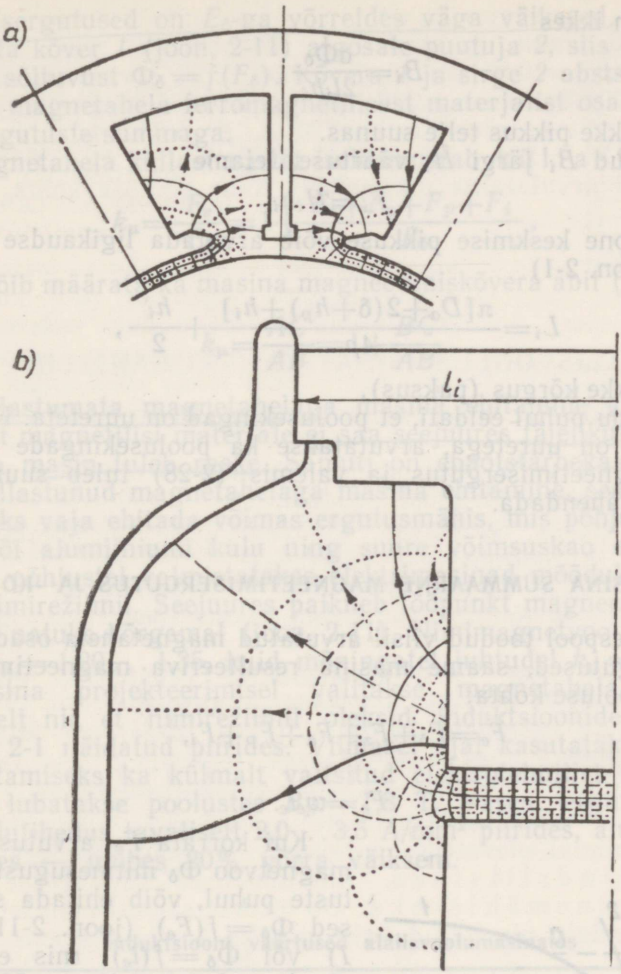
Pooluse ja ikke magneetimisergutuse arvutamisel on vaja arvesse võtta, et voo Φ_δ kõrval tekitab ergutusmähis veel puistevoo Φ_σ, mis aheldub ergutusmähisega ja, vältides poolusekingade ning ankru vahelist õhupilu, läbib pooluste südamikke ja iket (joon. 2-10).

Suurust

$$\sigma = \frac{\Phi_\delta + \Phi_\sigma}{\Phi_\delta} = 1 + \frac{\Phi_\sigma}{\Phi_\delta} \qquad (2\text{-}26)$$

nimetatakse pooluse puisteteguriks. Teda võib arvutada ligikaudsete valemite abil, mida siin ei näidata. Alalisvoolumasinates tavaliselt $\sigma = 1{,}10 \ldots 1{,}25$, kusjuures suuremad väärtused kehtivad lisapoolustega mitmepooluseliste masinate puhul, väiksemad — lisapoolusteta masinate puhul.

Kui σ väärtus on teada, määratakse induktsioon peapooluste südamikes (vt. joon. 2-1, 2-5):



Joon. 2-10. Ergutusmähise puistevoog pooluste vahel (*a*) ja masina otsas (*b*)

$$B_m = \frac{\sigma \Phi_\delta}{l_p b_p k_{te}}. \qquad (2\text{-}27)$$

Kui poolusesüdamiku plekid on isoleerimata, siis $k_{te} \approx 0{,}95$.

Magneetimiskõveratelt leitakse B_p järgi H_p ja pooluse magneetimisergutus

$$F_p = H_p h_p. \qquad (2\text{-}28)$$

Induktsioon ikkes

$$B_i = \frac{\sigma \Phi_\delta}{2 l_i h_i}, \qquad (2\text{-}29)$$

kus l_i — ikke pikkus telje suunas.

Määranud B_i järgi H_i väärtuse, leiame

$$F_i = H_i h_i. \qquad (2\text{-}30)$$

Väljajoone keskmise pikkuse võib arvutada ligikaudse valemi abil (vt. joon. 2-1)

$$L_i = \frac{\pi [D_a + 2(\delta + h_p) + h_i]}{4p} + \frac{h_i}{2}, \qquad (2\text{-}31)$$

kus h_i on ikke kõrgus (paksus).

Ülaltoodu puhul eeldati, et poolusekingad on uureteta. Kui poolusekingad on uuretega, arvutatakse ka poolusekingade hambatsooni magneetimisergutus ja valemis (2-28) tuleb suurust h_p vastavalt vähendada.

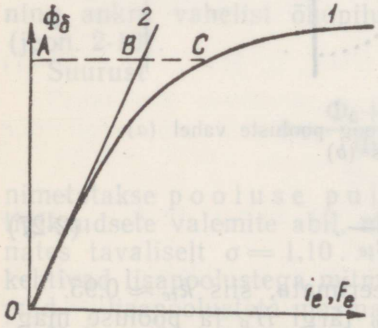
2-5. MASINA SUMMAARNE MAGNEETIMISERGUTUS JA -KÕVER

Liites eespool toodud viisil arvutatud magnetahela osade magneetimisergutused, saame masina resulteeriva magneetimisergutuse ühe pooluse kohta:

$$F_e = F_\delta + F_z + F_a + F_p + F_i, \qquad (2\text{-}32)$$

kusjuures

$$F_e = w_e i_e. \qquad (2\text{-}33)$$



Joon. 2-11. Masina magneetimiskõver

Kui korrata F_e arvutust põhimagnetvoo Φ_δ mitmesuguste väärtuste puhul, võib ehitada sõltuvused $\Phi_\delta = f(F_e)$ (joon. 2-11, kõver *1*) või $\Phi_\delta = f(i_e)$, mis erinevad ainult abstsisstelje mõõtkavalt. Neid graafilisi sõltuvusi nimetatakse masina magneetimiskõverateks ehk magnetilisteks karakteristikuteks.

Magneetimiskõvera esimene, sirgjooneline osa vastab magnetahela küllastumata olukorrale, mille puhul selle ahela ferromagnetilisest materjalist osade mag-

neetimisergutused on E_δ-ga võrreldes väga väikesed. Seega, kui tõmmata kõver *1* (joon. 2-11) algosale puutuja *2*, siis see kujutab endast sõltuvust $\Phi_\delta = f(F_\delta)$. Kõvera *1* ja sirge *2* abstsisside vahe võrdub magnetahela ferromagnetilisest materjalist osade magneetimisergutuste summaga.

Magnetahela küllastusastet iseloomustab küllastustegur

$$k_\mu = \frac{F_e}{F_\delta} = 1 + \frac{F_z + F_a + F_p + F_i}{F_\delta}, \qquad (2\text{-}34)$$

mida võib määrata ka masina magneetimiskõvera abil (joon. 2-11):

$$k_\mu = \frac{AC}{AB} = 1 + \frac{BC}{AB}.$$

Küllastumata magnetahelaga masina ehitamine ei ole kasulik, sest magnetilisi materjale ei saa seejuures täielikult ära kasutada ja masin tuleb raske. Samuti on ebaotstarbekas ülemääraselt küllastunud magnetahelaga masina ehitamine, sest sel juhtumil oleks vaja ehitada võimas ergutusmähis, mis põhjustab suure vase või alumiiniumi kulu ning suure võimsuskao ergutamisel. Nendel põhjustel valmistatakse elektrimasinad mõõduka küllastusega nimirežiimil. Seejuures paikneb tööpunkt magneetimiskõvera põlvest natuke kõrgemal (joon. 2-11). Nimimagnetvoo puhul tavaliselt $k_\mu = 1{,}20 \ldots 1{,}35$, kuid mõningatel juhtudel $k_\mu \approx 1{,}7 \ldots 2{,}0$.

Masina projekteerimisel valitakse magnetahela ristlõiked tavaliselt nii, et nimirežiimil oleksid induktsioonide väärtused tabelis 2-1 näidatud piirides. Viimasel ajal kasutatakse pooluste valmistamiseks ka külmalt valtsitud elektrotehnilist terast. Seejuures lubatakse poolustes $B_p = 1{,}8$ T. Väsest ergutusmähistes on voolutihedus tavaliselt 2,0 ... 3,5 A/mm² piirides, alumiiniumist mähistes — umbes 20% võrra väiksem.

Tabel 2-1

Induktsiooni väärtused alalisvoolumasinates

Magnetahela osad	Induktsiooni väärtused T
Ankrusüdamik	1,0 ... 1,5
Ankru hammaste kõige väiksem ristlõige	1,8 ... 2,5
Poolus	1,2 ... 1,6
Ike:	
a) terasvalu ja valtsitud teras	1,1 ... 1,2
b) malmvalu	0,5 ... 0,7
õhupilu	0,5 ... 1,0

Praktikas esinevates suhetes orienteerumiseks toome 14 kW, 220 V, 1000 p/min, geomeetriliste mõõtmetega: $D_a = 24{,}5$ cm, $l_a = 12{,}5$ cm, $\delta = 0{,}22$ cm alalisvoolumootori arvutamise koondandmed. Nimimagnetvoo puhul on selle mootori magneetimisergutused ühe pooluse kohta: $F_\delta = 1720$ A, $F_z = 350$ A, $F_a = 35$ A, $F_p = 110$ A, $F_i = 230$ A, $F_e = 2445$ A. Seejuures $k_\mu = 1{,}42$.

Mõnikord arvutatakse magnetahel kahe pooluse kohta.

Kolmas peatükk

ALALISVOOLUMASINATE ANKRUMÄHISED

3-1. ÜLDANDMEID ALALISVOOLUMASINATE ANKRUMÄHISTEST

Mähiste ehitusviis. Ankrumähis on masina tähtsaim element ja peab rahuldama järgmisi nõudeid:

1) peab olema arvutatud nimivõimsusele vastavale etteantud pinge ja koormusvoolu väärtusele;

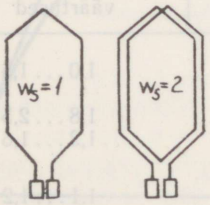
2) peab olema vajalik elektriline, mehaaniline ja termiline vastupidavus, mis kindlustaks masina piisava tööea (15...20 aastat);

3) konstruktsioon peab kindlustama rahuldava, kohaliku sädelemiseta voolu ärajuhtimise kommutaatorilt;

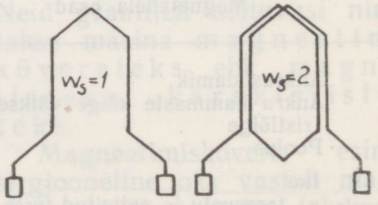
4) etteantud ekspluatatsiooninäitajatele (kasutegur jm.) vastav materjali kulu olgu minimaalne;

5) valmistamise tehnoloogia olgu võimalikult lihtne.

Tänapäeva alalisvoolumasinate ankrumähis paigaldatakse ankru välispinnal olevatesse uuretesse. Selliseid mähiseid nimetatakse *silindrilisteks*. Ankrumähised liigitatakse *silmus-* ja *lainemähisteks*. On olemas samuti mähiseid, mis kujutavad endast nimetatud kahe mähise kombinatsiooni.

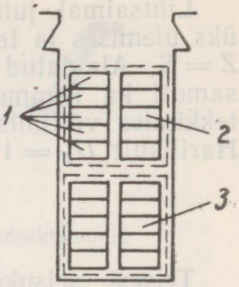


Joon. 3-1. Silmusmähise ühe- ja kahekeeruline sektsioon



Joon. 3-2. Lainemähise ühe- ja kahekeeruline sektsioon

Iga ankrumähise põhielemendiks on sektsioon, mis koosneb ühest või mitmest järjestikku ühendatud keerust. Sektsiooni otsad on ühendatud kommutaatorilestade külge (joon. 3-1, 3-2). Mähise kõigis sektsioonides on harilikult võrdne arv keerde. Lihtsustamise eesmärgil kujutatakse mähiste skeemidel sektsioone alati ühekeerulistena.



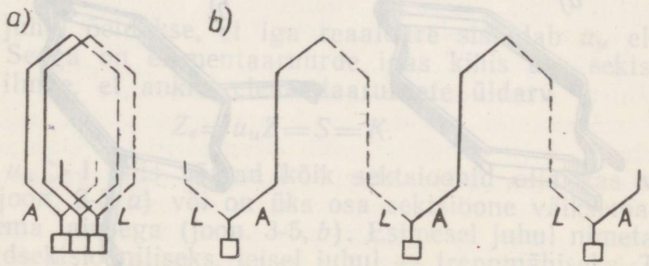
Joon. 3-3. Mähise paiknemine uurdes:
1 — sektsiooni juhtmed (keerud); *2* — ülemise kihi sektsiooni külg; *3* — alumise kihi sektsiooni külg

Uuretest väljuvate laupühenduste (vt. joon. 1-9) sobivaks paigaldamiseks valmistatakse ankrumähised kahekihilistena. Seejuures paiknevad sektsioonid igas uurdes kahes kihis (joon. 3-3) — iga sektsiooni üks aktiivkülg asetseb ühe uurde ülemises ning sama sektsiooni teine aktiivkülg teise uurde alumises kihis. Sektsiooni aktiivkülgi, mis paiknevad ülemises kihis, kujutame mähiste skeemidel pidevate joontega, alumises kihis paiknevaid aga kriipsjoontega (joon. 3-4). Ühekihilised ankrumähised ei erine ehituspõhimõttelt kahekihilistest ja neid kasutatakse ainult juhul, kui $P_N < 0{,}5$ kW.

Mähisesektsioonid on omavahel ühendatud jadaahelasse (joon. 3-4) selliselt, et järgneva sektsiooni algus (A) on koos eelneva sektsiooni lõpuga (L) ühendatud ühise kommutaatorilesta külge. Mähiseid nimetatakse järjestikku ühendatud sektsioonide väliskontuuride kuju järgi vastavalt silmus- ja lainemähisteks.

Kuna igal sektsioonil on kaks otsa ning kommutaatori iga lesta külge ühendatakse samuti kaks sektsioonide otsa, siis kommutaatorilestade üldarv K võrdub mähisesektsioonide arvuga S:

$$K = S. \qquad (3\text{-}1)$$



Joon. 3-4. Silmusmähise (*a*) ja lainemähise (*b*) sektsioonide ühendusviis

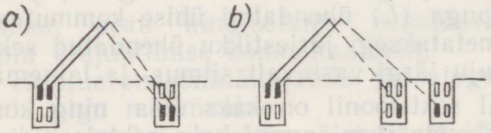
Lihtsaimal juhtumil paikneb uurdes kaks sektsiooni külge: üks ülemises ja teine alumises kihis. Seejuures ankru uurete arv $Z = S$. Alaldatud voolu ja pinge pulsatsiooni vähendamiseks, samuti ka kommutaatori lestadevahelise ülemäära kõrge pinge tekkimise vältimiseks peab uurete arv olema küllaldaselt suur. Harilikult $U_N = 110 \ldots 220$ V puhul

$$\frac{K}{2p} = 12 \ldots 35.$$

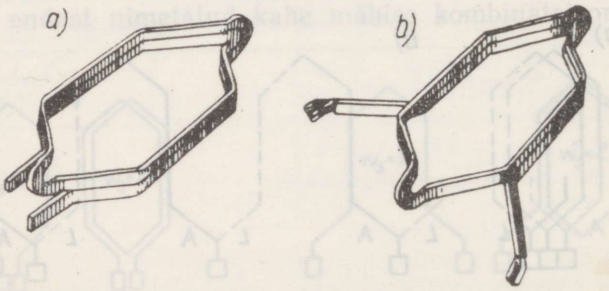
Teisest seisukohast lähtudes ei ole suure uurete arvuga ankrute valmistamine otstarbekohane, sest sel juhul oleksid uurded kitsad ja suure osa nende ristlõikepinnast hõivaks sektsioonide ja kere vaheline isolatsioon. Juhtmetele jääks vähe ruumi ja tulemuseks oleks masina võimsuse vähenemine. Lisaks öeldule tingivad isoleermaterjalide suur kulu ja stantsimistööde mahu kasv masina kallinemise ning kitsad hambad on väikese tugevusega.

Neil põhjustel paigutatakse uurde igasse kihti harilikult mitu ($u_u = 2, 3, 4, 5$) sektsiooni kõrvuti (joonisel 3-3 $u_u = 2$). Seejuures

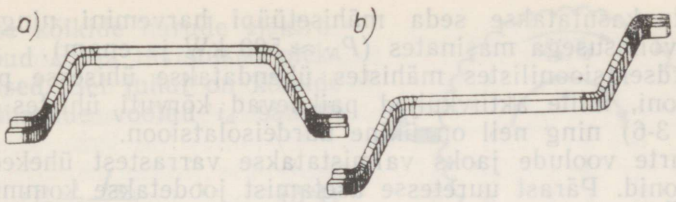
$$K = S = u_u Z. \qquad (3\text{-}2)$$



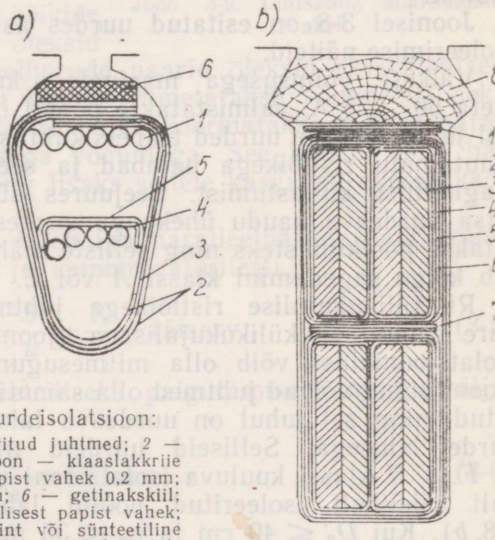
Joon. 3-5. Võrdsektsioonilise (*a*) ja treppmähise (*b*) sektsioonide paigutus, kui $u_u = 2$



Joon. 3-6. Silmusmähise (*a*) ja lainemähise (*b*) poolid



Joon. 3-7. Silmusmähise (*a*) ja lainemähise (*b*) poolsektsioonid



Joon. 3-8. *A* klassi kuuluv uurdeisolatsioon:

a — poolkinnine uure: *1* — isoleeritud juhtmed; *2* — elektrikartong 0,2 mm; *3* — eskapoon — klaaslakkriie 0,18 mm; *4* — elektrotehnilisest papist vahek 0,2 mm; *5* — klaaslakkriidest vahek 0,18 mm; *6* — getinakskiil; *b* — lahtine uure: *1* — elektrotehnilisest papist vahek; *2* — isoleeritud juhe; *3* — mikalint või sünteetiline lint 0,13 mm; *4* — mikafoolium või sünteetiline kile 0,15 mm; *5* — telefonipaber; *6* — elektrotehniline papp 0,2 mm; *7* — elektrotehnilisest papist vahek; *8* — puitkiil

Antud juhul öeldakse, et iga reaaluure sisaldab u_u elementaaruuret. Seega on elementaaruurde igas kihis üks sektsioonikülg. On ilmne, et ankru elementaaruurete üldarv

$$Z_e = u_u Z = S = K. \qquad (3\text{-}3)$$

Juhul kui $u_u > 1$, siis võivad kõik sektsioonid olla kas võrdse laiusega (joon. 3-5, *a*) või on üks osa sektsioone väiksema ning teine suurema laiusega (joon. 3-5, *b*). Esimesel juhul nimetatakse mähist võrdsektsiooniliseks, teisel juhul — treppmähiseks. Treppmähise korral paranevad tingimused voolu juhtimiseks kommutaatorilt (vt. § 6-6), kuid see mähis on keerulisem ja kallim.

Seetõttu kasutatakse seda mähisetüüpi harvemini ning ainult suure võimsusega masinates ($P_N \approx 500$ kW ja enam).

Võrdsektsioonilistes mähistes ühendatakse ühisesse pooli u_u sektsiooni, mille aktiivküljed paiknevad kõrvuti ühistes uuretes (joon. 3-6) ning neil on ühine uurdeisolatsioon.

Suurte voolude jaoks valmistatakse varrastest ühekeerulised sektsioonid. Pärast uuretesse asetamist joodetakse kommutaatori vastaspoolsed vardaotsad loogakujuliste liidete abil kokku. Mitu u_u sektsiooni kuuluvat varrast ühendatakse poolsektsiooniks (joon. 3-7). Treppmähise sektsioonid on alati moodustatud varrastest.

Joonisel 3-8 on esitatud uurdes asuva mähise osa aktiivosa isoleerimise näiteid.

Väikese võimsusega masinates, kus paralleelharu vool ei ületa 60...75 A, valmistatakse poolid isoleeritud ümarjuhtmetest. Sel juhul tehakse uurded trapetsikujulised (joon. 3-8, *a*), et saada muutumatu ristlõikega hambad ja seega vältida hamba allosa magnetilist küllastumist. Seejuures süvistatakse pooli juhtmed kitsa uurdeava kaudu ühekaupa uurdesse. Taolisi uurdeid nimetatakse poolkinnisteks ning selliste mähiste uurdeisolatsioon kuulub kõige sagedamini klassi *A* või *E*.

Ristkülikukujulise ristlõikega juhtmete puhul valmistatakse uure samuti ristkülikukujulisena (joon. 3-8, *b*). Selliste mähiste isolatsiooniklass võib olla mitmesugune. *A* ja *E* klassi isolatsiooni puhul võivad juhtmed olla samuti ühekaupa uurdesse süvistatud ning sel juhul on uurdeava laius ligikaudu võrdne poole uurde laiusega. Selliseid uurdeid nimetatakse poollahtisteks. *B*, *F* ja *H* klassi kuuluva isolatsiooni puhul paigaldatakse eelnevalt täielikult isoleeritud poolid lahtistesse uuretesse (joon. 3-8, *b*). Kui $D_a \leqslant 40$ cm ja $v_a \leqslant 35$ m/s, siis kinnitatakse mähised uuretesse traatbandaažide abil. Kõikidel muudel juhtudel kasutatakse kõvadest puiduliikidest (pöök jt.), getinaksist, tekstoliidist, klaastekstoliidist jm. valmistatud kiile.

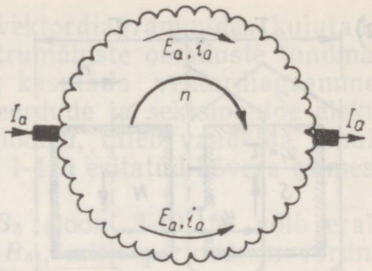
Ankrumähise juhtmete voolutihedus on nimikoormusel 4... ...10 A/mm^2. Väiksem arv kehtib suurtele masinatele, suurem arv — väikestele.

Mähiste sümmeetria tingimused. Omavahel järjestikku ühendatud sektsioonid moodustavad praegusaegsetes ankrumähistes lühisahela. Sellist mähist võib skemaatiliselt kujutada suletud spiraalina (joon. 3-9), mille välispinnal libisevad harjad. Joonisel 3-9 kujutatud lihtsaimal juhtumil on mähisel üks paar paralleelharusid ($a = 1$). Üldjuhtumil $a = 1, 2, 3...$, ning siis võib masinat vaadelda koosnevana a paralleelselt töötavast elementaarmasinast, kusjuures igaühel neist on kaks paralleelharu.

Masinale parimate töötingimuste kindlustamiseks on vajalik,

et mähise kõikide harude elektromotoorjõud E_a ja takistused oleksid võrdsed. Sel juhul on kõikide paralleelharude voolud i_a samuti võrdsed:

$$i_a = \frac{I_a}{2a}. \qquad (3\text{-}4)$$



Joon. 3-9. Lihtsaima ankrumähise ahel

Nende nõuete rahuldamiseks on vajalik, et magnetahel oleks sümmeetrilise ehitusega, kõikide pooluste magnetvood oleksid võrdsed ning kõik paralleelharude paarid oleksid ekvivalentsed. Neid tingimusi rahuldavat mähist nimetatakse sümmeetriliseks. Nimetatud nõuete mittetäitmise puhul koormatakse mähise paralleelharusid erineva suurusega vooludega. See kutsub esile häireid harikontaktide töös ning lisaks sellele kasvavad energiakaod mähises.

Sümmeetrilisel mähisel tuleb iga paralleelharude paari kohta võrdne täisarv sektsioone ja kommutaatorilesti

$$\frac{Z_s}{a} = \frac{S}{a} = \frac{K}{a} = \text{täisarv}. \qquad (3\text{-}5)$$

Paralleelharude sümmeetriliseks paigutamiseks magnetväljas on vajalik, et

$$\frac{Z}{a} = \text{täisarv} \qquad (3\text{-}6)$$

ja

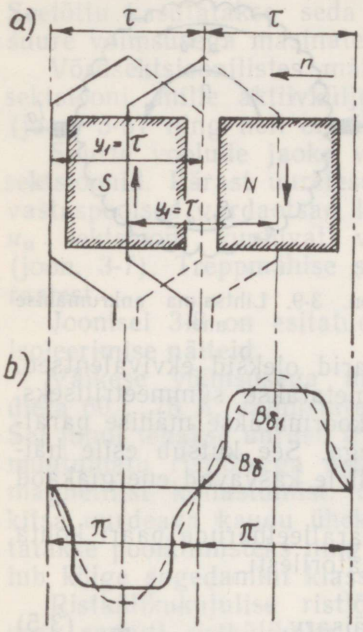
$$\frac{2p}{a} = \text{täisarv}. \qquad (3\text{-}7)$$

Seosed (3-5), (3-6) ja (3-7) ongi mähiste sümmeetria tingimused. Mähised projekteeritaksegi neid tingimusi arvestades. Üksikjuhtudel lubatakse neist tingimustest kindlaid, mitte väga suuri kõrvalekaldumisi, mis ei kutsu masina töös esile märgatavat halvenemist.

3-2. SEKTSIOONIDE ELEKTROMOTOORJÕUD

Sektsiooni samm. Kujutleme edaspidi, et ankur on piki telge lahti lõigatud ning laotatud nii, et uurded ja ankrumähis asetsevad ühes tasapinnas. Lisaks eeldame, et niisugune laotatud ankur liigub paigalseisvate pooluste suhtes paremalt vasa-

TRÜ Raamatukogu



Joon. 3-10. Täissammuga sektsioonid

kule (joon. 3-10, *a*) ning poolused paiknevad joonise tasapinnast eespool. Sel juhul on mähise juhtmete elektromotoorjõud suunatud põhjapooluse juures ülevalt alla ning lõunapooluse juures alt üles.

Sektsioonis indutseeritav elektromotoorjõud on maksimaalne, kui sektsiooni laius (ehk mähise põhisamm y_1) on võrdne poolusejaotusega τ, sest sektsiooni maksimaalne aheldusvoog on siis määratud pooluse koguvooga õhupilus (joon. 3-10). Antud juhul on pöörleva ankru mistahes asendi puhul sektsiooni küljed erinimeliste pooluste all ja neis indutseeruvad vastassuunalised elektromotoorjõud, mis seega piki sektsiooni kontuuri liituvad.

Sellele vaatamata valmistatakse mähis tavaliselt sammuga y_1, mis mõnevõrra erineb τ-st. Selletõttu elektromotoorjõu suurus oluliselt ei muutu, vooluärastuse tingimused aga paranevad (vt. § 6-6). Kui $y_1 = \tau$, siis nimetatakse sammu täis- ehk diametraalsammuks, $y > \tau$ puhul pikendatud, $y_1 < \tau$ puhul aga lühendatud sammuks. Harilikult hoidutakse pikendatud sammuga mähise valmistamisest, sest silmusmähiste laupühenduste pikenemine suurendab mõnevõrra vase kulu.

Sektsiooni sammu võib avaldada uurde- või hambajaotuse kaudu:

$$y_{1z} = \frac{Z}{2p} \pm \varepsilon_z, \tag{3-8}$$

kus $\varepsilon_z < 1$ kujutab endast niisugust murdarvu, mille puhul y_{1z} on täisarv. Kui $\varepsilon = 0$, siis on tegemist täissammuga.

Sektsiooni sammu saab määrata ka elementaaruurete kaudu:

$$y_1 = \frac{Z_e}{2p} \pm \varepsilon. \tag{3-9}$$

On ilmne, et võrdsektsioonilisel mähisel $y_1 = u_u y_{1z}$ ja $\varepsilon = u_u \varepsilon_z$.

Elektromotoorjõudude täht. Sektsioonides, samuti ka kogu mähises indutseeritakse vahelduvad elektromotoorjõud. Teatavasti

võib siinuselisi elektromotoorjõude vektordiagrammides kujutada vektoritena. Alalisvoolumasinate ankrumähiste omaduste tundmaõppimiseks on samuti otstarbekas kasutada vektordiagramme. Kuid arvestades mähise juhtmete, keerdude ja sektsioonide elektromotoorjõudude mittesiinuselist iseloomu, tuleb vaadelda ainult nende põhiharmoonilisi, s. o. joonisel 1-4, *a* esitatud kõvera esimest harmoonilist.

Pooluste magnetvälja kõverast B_δ (joon. 3-10, *b*) võib eraldada esimese ehk põhiharmoonilise $B_{\delta 1}$, mille periood on võrdne kahekordse poolusejaotusega 2τ. Seega on elektromagnetilises mõttes masina ümbermõõdu osa, mis vastab 2τ-le, võrdne 360 kraadiga, kusjuures viimaseid nimetatakse elektrilisteks kraadideks ($360°_{el}$). Ilmselt ankru kogu ümbermõõt ehk geomeetriline nurk 360° vastab elektrilisele nurgale $p \cdot 360°_{el}$.

Ankru iga uure paikneb pooluste välja põhiharmoonilise suhtes erisuguselt ning seepärast on erinevates uuretes olevate juhtmete elektromotoorjõudude põhiharmoonilised faasis nihutatud. Kõrvuti asetsevates uuretes olevate juhtmete elektromotoorjõudude faasinihe

$$\alpha = \frac{p \cdot 360°}{Z}. \qquad (3\text{-}10)$$

Kui joonestada kõikides uuretes olevate juhtmete elektromotoorjõudude vektorid, siis saame uurete elektromotoorjõudude tähe. Joonisel 3-11, *b* on kujutatud selline täht juhtumil, kui $2p = 4$ ja $Z = 18$, ning

$$\alpha = \frac{2 \cdot 360°}{18} = 40°.$$

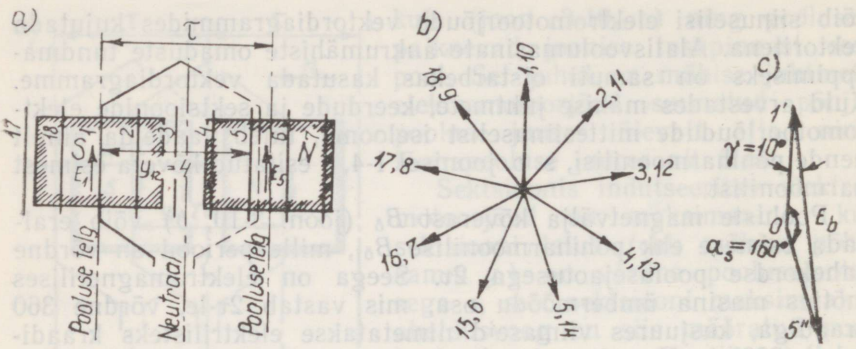
Joonisel 3-11 kujutatud vektorid pöörlevad kellaosuti liikumisele vastassuunaliselt nurkkiirusega

$$\omega = 2\pi f = 2\pi pn$$

ja nende projektsioonid liikumatule ajateljele võrduvad elektromotoorjõudude hetkväärtustega.

Harilikult on ajatelg vertikaalselt üles suunatud ning siis omavad joonisel 3-11, *a* kujutatud hetkel uurete *1* ja *10* juhtmete elektromotoorjõud maksimaalset positiivset väärtust.

Uurete elektromotoorjõudude tähel on Z vektorit, kuid mõned vektorid võivad ka faasis kattuda. Seetõttu võib kiirte arv olla väiksem kui Z, sest tähe joonestamisel ja kõikide uurete elektromotoorjõudude vektorite äramärkimisel sooritatakse p täispööret. Näiteks, kui $\frac{Z}{p}$ = täisarv, siis kiirte arv on samuti sellega võrdne ja diagramm koosneb p ühtivast või üksteisega kattuvast tähest.



Joon. 3-11. Mähiseskeem (*a*), uurete ja sektsioonide elektromotoorjõudude täht (*b*) ning vektordiagramm (*c*): $Z = Z_e = 18$, $2p = 4$

Keeru ja sektsiooni kahe külje juhtmete elektromotoorjõud on nihutatud nurga $\alpha_s = y_{1z} \cdot \alpha$ võrra. Avaldiste (3-8) ja (3-10) alusel

$$\alpha_s = 180° \pm \frac{\varepsilon_z \cdot 360° p}{Z}. \qquad (3\text{-}11)$$

Kui $\varepsilon_z = 0$, s. t. täissammu puhul on nende elektromotoorjõudude vektorid nihutatud 180°.

Kui $Z = 18$ ja $2p = 4$, mis vastab joonisele 3-11, *a*, siis sektsiooni samm valemi (3-8) kohaselt on

$$y_{1z} = \frac{18}{4} \pm \frac{1}{2} = 4\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2},$$

s. t. $y_{1z} = 5$ või $y_{1z} = 4$. Olgu $y_{1z} = 4$ (joon. 3-11, *a*), siis valemi (3-11) kohaselt

$$\alpha_s = 180° - \frac{1}{2} \cdot \frac{2 \cdot 360°}{18} = 180° - 20° = 160°.$$

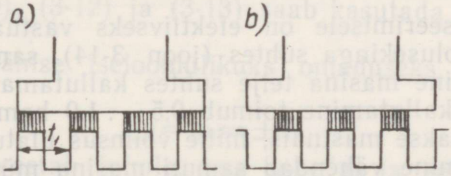
Uuretes *1* ja $1 + 4 = 5$ paikneva sektsiooni juhtmete elektromotoorjõudude vektorid paiknevad vastavalt joonisele 3-11, *c*.

Joonisel 3-11, *c*, aga samuti ka kõikidel järgnevatel joonistel on tähisega «prim» märgitud uurde ülakihis paiknevate sektsioonide külgede elektromotoorjõudude vektorid, tähisega «sekund» — alumise kihi sektsioonide külgede elektromotoorjõudude vektorid.

Joonisel 3-11, *b* esitatud tähe joonestamisel oli kõikide uurete juhtmete elektromotoorjõududele valitud ühesugune positiivne suund (näiteks joonisel 3-10, *a* alt üles). Seetõttu on temasse

kuuluva kahe juhtme elektromotoorjõud piki keeru kontuuri lahutuvad. Seega joon. 3-11 kujutatud juhtumil on keeru E_b määratud vektorite $1'$ ja $5''$ vahega. Vektor E_b joonisel 3-11, *c* kujutab endast teises mõõtkavas samuti sektsiooni elektromotoorjõudu E_s. Sektsiooni number määratakse selle uurde järgi, mille ülemises kihis vaadeldava sektsiooni külg paikneb.

On ilmne, et kõrvuti asetsevates uuretes paikneva kahe sektsiooni elektromotoorjõudude vektorid on nihutatud teineteise suhtes sama nurga α võrra, nagu on nihutatud kõrvuti asetsevate uurete juhtmete elektromotoorjõud. Seepärast on sektsioonide elektromotoorjõudude täht analoogiline uurete elektromotoorjõudude tähega — joon. 3-11, *a*.



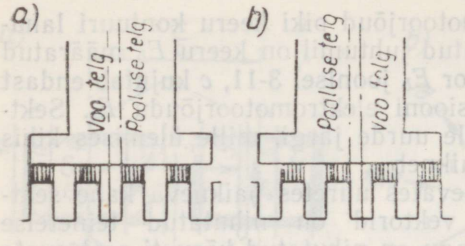
Joon. 3-12. Magnetvoo pikisuunaline pulseerimine

Vektordiagrammide kasutamist mähiste omaduste analüüsimise eesmärgil vaadeldakse allpool.

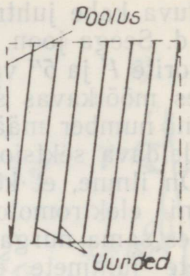
Elektromotoorjõudude pulseerimine. Ankru hambuline pind põhjustab sektsiooni ja kogu mähise elektromotoorjõu pulseerimist.

Kui poolusekinga laius ei ole hambajaotuse t_1 kordne (joon. 3-12, *a* ja *b*), siis ankru pöörlemisel pooluse ja ankru vahelise õhupilu magnetiline takistus muutub. Selle tulemusel tekivad pooluste magnetvoogude pulseerimised sagedusega $f_z = Zn$ ning järelikult ka sama sagedusega elektromotoorjõudude pulseerimised mähises. Selle vältimiseks valitakse Z/p võrdseks paaritu arvuga. Seejuures naaberpooluste all olevate õhupilude magnetiliste takistuste summa ankru pöörlemisel ei muutu ning magnetvoo pulseerimine lakkab.

Kirjeldatud magnetvoo pulseerimist nimetatakse pikisuunaliseks. Ankru liikumisel tekib sellele lisaks ka voo ristpulseerimine, mis ilmneb pooluste magnetvoo telje tuiklemises keskmise asendi suhtes sagedusega f_z (joon. 3-13, *a* ja *b*). Seetõttu pulseerivad mähise aheldusvoog ja elektromotoorjõud sama sagedusega.



Joon. 3-13. Magnetvoo ristsuunaline pulseerimine

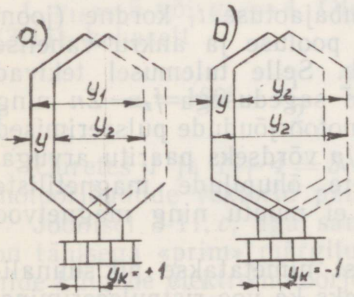


Joon. 3-14. Uurete kallutamine poolusekinga suhtes

Voo ristpulseerimisele on efektiivseks vastuabinõuks uurete kallutamine poolusekinga suhtes (joon. 3-14), samuti ka poolusekinga kallutamine masina telje suhtes kallutamata ankru uurete korral. Uurete kallutamine toimub 0,5 ... 1,0 hambajaotuse võrra ja seda kasutatakse masinais, mille võimsus ulatub 30 ... 40 kW. Uurete kallutamine vähendab samuti masina müra.

3-3. LIHTSILMUSMÄHIS

Mähisesammud. Joonisel 3-15 on esitatud lihtsilmusmähise sektsioonide jadaühenduse kaks võimalikku varianti. Seda nimetatakse ka paralleelmähiseks. Joonisel 3-15 on näidatud vaadeldava mähise sammud y_1, y_2 ja y. Neid samme määratakse elementaaruurete järgi. Esimene ehk p õ h i s a m m y_1 on arvutatav valemi (3-9) järgi ning ta määrab sektsiooni kahe aktiivkülje vahelise kauguse ankru ümbermõõdul. Mähise t e i n e s a m m y_2 määrab antud sektsiooni lõpp-aktiivkülje ja sellele mähise skeemi kohaselt järgneva sektsiooni alg-aktiivkülje vahelise kauguse. Loeme edaspidi ankru ja kommutaatori liikumissuuna vasakult paremale positiivseks.



Joon. 3-15. Lihtsilmusmähise ristita (*a*) ja ristiga (*b*) sektsioonid

Et silmusmähise puhul üleminek eelmise sektsiooni lõppaktiivküljelt sellele järgneva sektsiooni algaktiivkülje juurde toimub liikumissuunaga paremalt vasakule, siis loeme,

et silmusmähise samm y_2 on negatiivne arv. Mähise resulteeriv samm

$$y = y_1 + y_2 \qquad (3\text{-}12)$$

määrab ära kauguse antud ja sellele järgneva sektsiooni algaktiivkülgede vahel.

Kommutaatorijaotuseks nimetatakse kommutaatorilesta laiust koos lestadevahelise isoleervaheku paksusega. Samm kommutaatoril y_k määrab kommutaatorijaotuses antud kauguse nende kommutaatorilestade keskkohtade vahel, mille külge on ühendatud vaadeldava sektsiooni otsad, ehk antud sektsiooni ja sellele skeemis järgneva sektsiooni algused.

Ilmselt

$$y_k = y. \qquad (3\text{-}13)$$

Suhteid (3-9), (3-12) ja (3-13) saab kasutada kõikide mähisetüüpide jaoks.

Lihtsilmusmähise iseloomulikuks omaduseks on asjaolu, et sellel

$$y = y_k = \pm 1. \qquad (3\text{-}14)$$

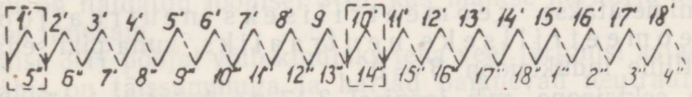
Plussmärk vastab juhule, kus $|y_2| < y_1$ ja selliseid mähiseid nimetatakse ristita mähisteks (joon. 3-15, *a*). Miinusmärk vastab juhule, kus $|y_2| > y_1$ ja selliseid mähiseid nimetatakse ristiga mähisteks (joon. 3-15, *b*). Teisel juhul on vase kulu mõnevõrra suurem ja seepärast hoidutakse tavaliselt selliste silmusmähiste valmistamisest. Elektromagnetilises suhtes on need mähised võrdväärsed ja erinevad ainult selle poolest, et pooluste samasuguse polaarsuse ja ühesuguse pöörlemissuuna puhul on harjade polaarsus vastupidine.

Mähise põhilised omadused ja skeem. Vaatleme sümmeetrilist lihtsilmusmähist, mille andmed on:

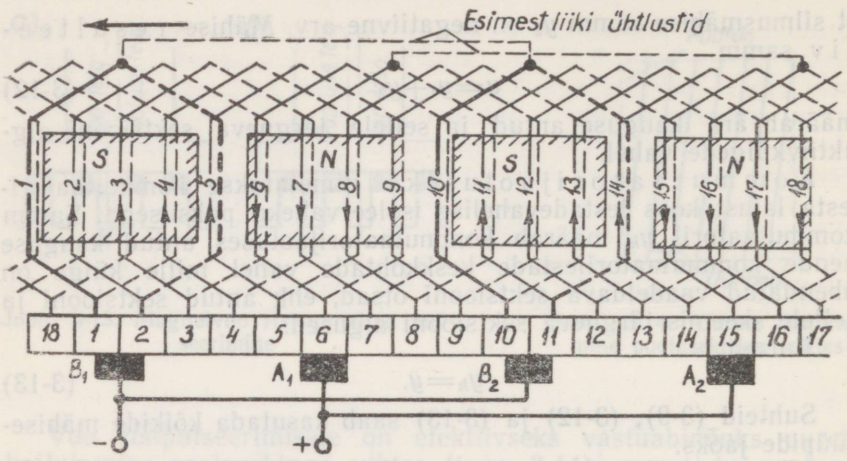
$$2p = 4; \quad Z = Z_e = S = K = 18; \quad y_1 = \frac{Z_e}{2p} - \varepsilon = \frac{18}{4} - \frac{1}{2} = 4;$$

$$y_2 = y - y_1 = 1 - 4 = -3; \quad y = y_k = +1.$$

Anname sektsiooni külgedele nende asukohale vastavad elementaaruurete numbrid. Siis on võimalik teadaolevate sammuväär-



Joon. 3-16. Joonisel 3-17 kujutatud lihtsilmusmähise sektsioonide külgede ühendamise tabel



Joon. 3-17. Lihtsilmusmähise skeem: $2p = 4$, $Z = Z_e = S = K = 18$, $y_1 = 4$, $y_2 = -3$, $y = y_k = +1$

tuste järgi koostada mähisesektsiooni külgede ühendamise tabel (joon. 3-16), lähtudes kindlast elementaaruurdest ning lisades selle uurde numbrile põhisammu arvväärtuse, edasi teise sammu väärtuse, seejärel jällegi põhisammu oma jne.

Pideva joonega kujutatud sektsioonide ülemiste külgede numbrid on märgitud tabeli — joon. 3-16 — ülemises reas; kriipsjoonega kujutatud sektsioonide alumiste külgede numbrid — alumises reas.

Sektsiooni alumise külje *4″* (joon. 3-16 paremal) juurest tuleme mähise kerimise suunas uuesti tagasi ülemise külje *1′* juurde, sest $4 + y_2 = 4 - 3 = 1$. Seega on mähis suletud.

Teadaolevate sammude järgi või siis sektsiooni külgede ühendamise tabeli kohaselt võime joonestada mähise skeemi (joon. 3-17).

Joonisel 3-17 on märgitud elementaaruurete numbrid. Sektsioon, mille algus on ühendatud mingi kommutaatorilesta külge, määrab kokkuleppeliselt selle lesta numbri.

Kahe kõrvuti asetseva pooluse keskel ankru tasapinnal olevat joont nimetatakse g e o m e e t r i l i s e k s n e u t r a a l j o o n e k s ehk g e o m e e t r i l i s e k s n e u t r a a l i k s, kuna piki seda joont magnetiline induktsioon $B = 0$.

Osa sektsioone, mis joonisel 3-17 on kujutatud jämedamate pidevate joontega, on ankru pöörlemisel paratamatult harjade kaudu lühistatud. Selleks, et neis sektsioonides indutseeritavad

elektromotoorjõud oleksid minimaalsed ning et sektsioonides ei oleks ülemääraseid voole, mis põhjustaksid harikontaktide ülekoormuse, peavad need lühistatud sektsioonid paiknema geomeetrilisel neutraalil või selle lähedal neutraaltsoonis.

Selleks paigutatakse harjad niisugusesse asendisse, et lühise poolperioodi kestel sektsiooni küljed paikneksid pooluse telje suhtes sümmeetriliselt. Siis öeldakse, et harjad asetsevad neutraalil. Sektsiooni laupühenduste sümmeetrilise kuju korral on harjad pooluste teljel (joon. 3-17).

Järgime mähise ahelat (joon. 3-17) vasakult paremale, alustades sektsioonist *2*. Läbides järjest, alates harjast B_1, sektsioone *2*, *3*, *4* ja *5*, liigume mõtteliselt indutseeritud elektromotoorjõu suunas, kuni jõuame harjani A_1. Järelikult moodustavad need sektsioonid ühe paralleelharu, mille elektromotoorjõud on võrdne nende sektsioonide elektromotoorjõudude summaga.

Liikudes edasi pidi sektsioonide *6*, *7*, *8*, *9* kontuuri harja A_1 juurest harjani B_2, läbime indutseeritud elektromotoorjõududele vastassuunas teise paralleelharu. Sektsioon *10* on lühistatud. Harjade B_2 ja A_2 vahel asetsevad sektsioonid *11*, *12*, *13* ja *14* moodustavad kolmanda haru ning harjade A_2 ja B_2 vahel paiknevad sektsioonid *15*, *16*, *17* ja *18* — neljanda haru. Viimane haru läbitakse samuti elektromotoorjõule vastassuunas, kusjuures jõutakse kommutaatorilestani *1*. Sektsioon *1* on samuti lühistatud. Lihtsilmusmähise iga harja läbib kahe paralleelharu vool.

Iga paralleelharu sektsioonide ülemised aktiivküljed asetsevad ühe pooluse all ning alumised — teise all. Joonisel 3-16 on lühistatud sektsioonid ümbritsetud punktiirjoonega kujutatud ristkülikuga.

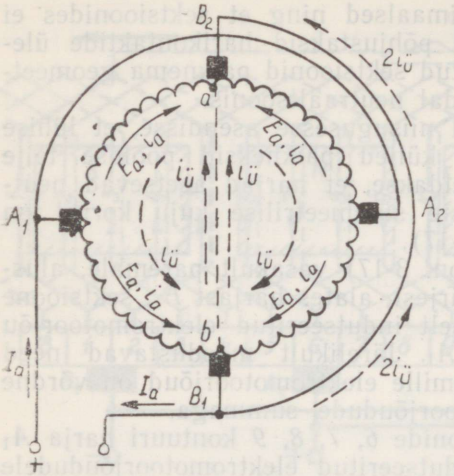
Seega on joonisel 3-17 toodud mähisel neli paralleelharu. Üldjuhul lihtsilmusmähis sisaldab

$$2a=2p \qquad (3\text{-}15)$$

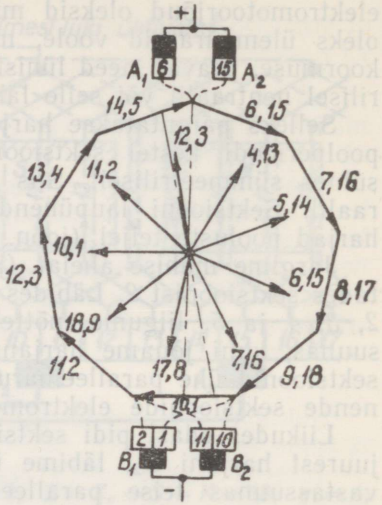
paralleelharu, mis ongi selle mähise iseloomulikuks tunnuseks. Ilmselt on joonisel 3-17 kujutatud mähisel sümmeetriatingimused (3-5), (3-6) ja (3-7) täidetud.

Juhul kui masin töötab generaatorina, näitavad joonisel 3-17 kujutatud nooled ka mähise voolude suundi. Seejuures jaotub ankru koguvool I_a samuti nelja haru vahel. Kooskõlas öelduga võib joonisel 3-17 esitatud mähise ahelat kujutada lihtsustatult, nii nagu on näidatud joonisel 3-18, kus mähise harud ja voolude jaotus on ilmekam.

Joonise 3-17 põhjal võib kindlaks teha veel järgmisi asjaolusid. Kui mähis on täissammuga ja harjad paiknevad neutraalil, siis tekib harus suurim elektromotoorjõud. Lisaks sellele osutuvad ühe pooluse all olevate juhtmete voolud samasuunalisteks ning



Joon. 3-18. Joonisel 3-17 toodud mähise ahela lihtsustatud kujutusviis



Joon. 3-19. Joonisel 3-17 näidatud mähise elektromotoorjõudude vektordiagramm

seetõttu on ka arendatav elektromagnetiline moment maksimaalne. Järelikult ongi mähise niisugune ehitusviis ja selline harjade paigutus kõige kasulikum. Sammu y_1 kõrvalekaldumine täissammust ei avalda elektromotoorjõudude väärtusele märgatavat mõju, sest elektromotoorjõudude ja voolude suuna muutus toimub seejuures ainult neis paralleelharu juhtmetes, mis asetsevad neutraali lähedal ja seega nõrga magnetvälja tsoonis.

Paralleelharude ruumiline asend paigalseisvate pooluste suhtes on kindlaks määratud harjade asendiga ning on samuti muutumatu. Ankru pöörlemisel liiguvad sektsioonid järk-järgult ühest harust teise, kusjuures sellise ülemineku ajal hari lühistab sektsiooni ja voolu suund selles muutub, näiteks väärtuselt $+i_a$ väärtuseni $-i_a$. Seda nähtust nimetatakse sektsiooni kommutatsiooniks. Nagu eespool märgiti, mõjutavad lühistatud sektsioonis esinevad nähtused harikontakti voolude väärtust ja harjade tööd. Nähtuste kompleksi, mis on seotud sektsioonide lühistamisega harjade poolt, nende sektsioonide üleminekuga mähise ühest paralleelharjast teise ja voolu ülekandumisega kommutaatori ning harja vahelise kontakti kaudu, nimetatakse masina kommutatsiooniks. Kommutatsiooni vaadeldakse üksikasjalikumalt kuuendas peatükis.

Mähise elektromotoorjõudude vektordiagramm. Kasutades § 3-2 vaadeldud sektsioonide elektromotoorjõudude tähte, on võimalik joonestada mähise elektromotoorjõudude vektordiagramm, liites sektsioonide elektromotoorjõudude vektoreid sektsioonide paiknemise järjestuses piki mähise kontuuri. Joonisel 3-17 näidatud mähise jaoks on niisugune diagramm koos sektsioonide elektromotoorjõudude tähega kujutatud joonisel 3-19.

Naabersektsioonide elektromotoorjõudude vektorid on $Z = 18$ ja $2p = 4$ puhul faasis nihutatud 40° võrra (vt. § 3-2). Seetõttu sooritatakse üheksa sektsiooni vektorite pealekandmise vältel pööre $9 \cdot 40° = 360°$ ning elektromotoorjõudude hulknurk sulgub. Kui ülejäänud üheksa sektsiooni on samuti läbi käidud, saadakse teine, esimesega kattuv hulknurk.

Iga elektromotoorjõudude hulknurk vastab ühele paralleelharude paarile. Üldjuhul tekib lihtsilmusmähise puhul p hulknurka, mis kõikide paralleelharu paaride identsuse puhul kattuvad.

Vektorite *1*, *2*, *3* ... algused joonisel 3-19 kujutavad sektsioonide *1*, *2*, *3* ... alguste ja samuti ka kommutaatorilestade *1*, *2*, *3* ... potentsiaale. Mõlema hulknurga vektorite lõppude ja alguste ühtimine joonisel 3-19 viitab samapotentsiaalipunktide olemasolule mähises. Näiteks võrdseid potentsiaale omavad kommutaatorilestad *1* ja *10*, *2* ja *11* jne., üldjuhul aga lestad, mis on üksteisest

$$y_p = \frac{K}{p} \tag{3-16}$$

kommutaatorijaotuse kaugusel. Sümmeetrilise mähise korral on niisugune järeldus täiesti loomulik, kuna y_p elementaaruurde võrra nihutatud sektsioonikülјed paiknevad sama polaarsusega pooluste all ja ühesuguses magnetväljas. Suurust y_p nimetatakse p o t e n t s i a a l i s a m m u k s.

Elektromotoorjõudude diagrammil on samuti võimalik näidata ka harju, nii nagu seda on tehtud joonisel 3-19, vastavalt joon. 3-17 kujutatud mähise asendile harjade suhtes. Elektromotoorjõudude hulknurka tuleb kujutleda pöörlevana. Sel juhul on ühe haru või hulknurga ühe poole vektorite projektsioonide summa harjade vertikaalteljel võrdne haru ja terve mähise elektromotoorjõuga. Selle suurus pulseerib väärtuste piires, mis vastavad joonisel 3-19 näidatud kahe kriips-punktjoone pikkusele. On võimalik näidata, et juba $\frac{K}{2p} = 10$ puhul pulsatsiooni amplituudiväärtus on alla 1%. Tegelikkuses on see pulsatsioon veel väiksem, sest geomeetrilise neutraali läheduses pooluste välja induktsioon on tunduvalt väiksem tema põhiharmoonilisest.

Ühtlustusühendused ehk ühtlustid. Ideaalsetel tingimustel

sümmeetrilise mähise ja pooluste magnetvoogude võrdsuse puhul on samuti võrdsed kõikide harude elektromotoorjõud ning harusid koormatakse vooludega ühtlaselt. Tegelikkuses aga ei ole tootmistehnoloogiast tingitult ja ka muude kõrvalekaldumiste tõttu (erinevate pooluste all erinev õhupilu laius, südamiku materjali mittehomogeensus jm.) kõigi pooluste vood omavahel täielikult võrdsed. Seetõttu ei ole ka lihtsilmusmähise harude elektromotoorjõud samuti võrdsed, kuna harud on nihutatud üksteise suhtes ühe poolusejaotuse võrra (joon. 3-17).

Oletame, et joonisel 3-18 on alumiste harude elektromotoorjõud ülemiste omast suurem. Siis tekivad isegi juba generaatori tühijooksul, kui $I_a = i_a = 0$, mähise sees ühtlustusvoolud $i_ü$. Need voolud kulgevad sama potentsiaaliga harjade vahel neid ühendavate juhtmete või lattide kaudu. Mähise väikese sisetakistuse tõttu võivad need voolud kujuneda märkimisväärselt suureks isegi pooluste voogude väikese erinevuse puhul. Masina tööolukorras harjade koormusvoolud $2i_a$ liituvad algebraliselt vooludega $2i_ü$, mistõttu mõned harjad osutuvad üle-, teised aga alakoormatuks. Sellega on harjade normaalne töö häiritud.

Harjade vabastamiseks ühtlustusvooludest ja nende voolude teekonna sulgemiseks mähise enda sees varustatakse mähis ühtlustitega. Ühtlustid ühendavad mähise teoreetiliselt sama potentsiaaliga punkte. Eespool oli kindlaks tehtud, et kui $2p = 4$, siis need punktid on üksteise suhtes nihutatud poolusepaari ehk ankru või kommutaatori ümbermõõdu poole pikkuse võrra. Üks ühtlusti on näidatud joonisel 3-18 kriipsjoonega piki vertikaalläbimõõtu. Kuna harikontaktide takistus on ühtlustusjuhtme takistusest tunduvalt suurem, siis voolud $i_ü$ kulgevad selles juhtmes harju läbimata, nagu näidatud joonisel 3-18. Lihtsilmusmähistes kasutatavaid ühtlusteid nimetatakse esimest liiki ühtlusteiks.

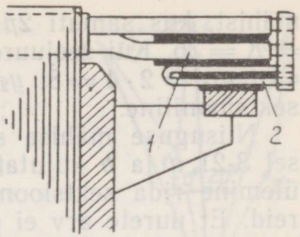
Samapotentsiaalipunktide olemasolu korral kattuvad vektordiagrammides vastavate sektsioonide vektorite lõpud või algused. Ühtlusteid võidakse paigutada kas ankru kommutaatoripoolele (sel juhul nad ühendavad sama potentsiaaliga kommutaatorilesti) või selle vastaspoolele (sel juhul nad ühendavad sektsioonide laupühenduste samapotentsiaalipunkte).

Ühtlustite samm $y_ü$ on võrdne mähise potentsiaalisammuga y_p:

$$y_ü = \frac{K}{p}. \qquad (3\text{-}17)$$

Pooluste voogude võrdsuse puhul ühtlustites voole ei teki. Joonisel 3-17 on kriipsjoontega näidatud kaks esimest liiki ühtlustit.

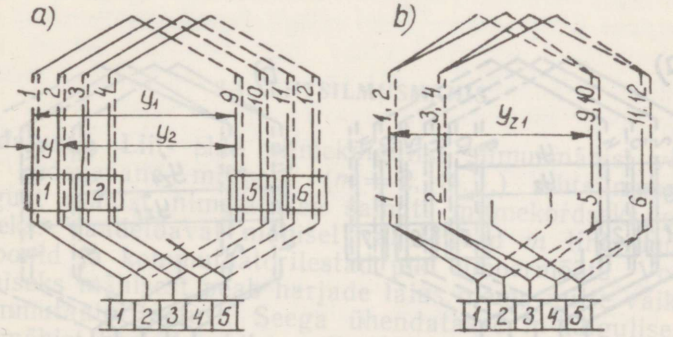
Pöörleva ankru kõikidel asenditel vajaliku efekti saavutamiseks peab mähis olema varustatud piisava hulga ühtlustitega. Elektromotoorjõudude hulknurga (joon. 3-19) vaatlusest nähtub, et ankru ühel poolel saab maksimaalselt olla K/p esimest liiki ühtlustit, kusjuures igaüks neist ühendab p punkti võrdse potentsiaaliga. Maksimaalse arvu ühtlustitega varustatakse ainult rasketes kommutatsioonitingimustes töötavad suured masinad. Muudel juhtudel kasutatakse $\frac{1}{3}$ ... $\frac{1}{6}$ võimalikest ühtlusteist, ehk üks ühtlusti masina ühe-kahe uurde kohta. Seejuures paigutatakse nad ühtlaselt piki ankru ümbermõõtu. Ühtlustite ristlõige valitakse 20 ... 50% ankrumähise keeru ristlõikest. Joonisel 3-20 on näidatud üks ühtlustite paigutusviisidest.



Joon. 3-20. Kommutaatori suhtes ankru vastaspoolele — laupühenduste (*1*) alla paigutatud ühtlustid (*2*)

Mähises voolavad ühtlustusvoolud on oma iseloomult vahelduvvoolud. Lenzi seaduse järgi nad tekitavad magnetvälja, mis püüab kõrvaldada pooluste voogude ebavõrdsust. Seetõttu põhjustab ühtlustite olemasolu ühtlustusvoolude olulist vähenemist.

Lihtsilmusmähised, millel $u_u > 1$. Joonisel 3-17 esitatud mähisel oli $2p = 4$, $Z = Z_e = S = K = 18$ ja $u_u = 1$. Vaatleme nüüd



Joon. 3-21. Võrdsektsioonilise mähise skeemi variandid: $2p = 4$; $Z = 18$; $u_u = 2$; $Z_e = S = K = 36$; $y_1 = 8$; $y_2 = -7$; $y = y_k = +1$

mähist, kus samuti $2p = 4$ ja $Z = 18$, kuid $u_u = 2$ ja $Z_e = S = K = 36$. Kui seejuures säilitada uurde samm $y_{1z} = 4$, siis $y_1 = u_u y_{1z} = 2 \cdot 4 = 8$; $y_2 = -7$; $y = y_k = +1$. See mähis on võrdsektsiooniline.

Niisuguse mähise skeemi võib kujutada kahesuguselt, joonisel 3-21, *a* ja *b* kujutatud viisil. Sellel joonisel kujutab numbrite ülemine rida sektsioonide numbreid, alumine rida uurete numbreid. Et uurete arv ei ole muutunud, ei muutu ka uurete elektromotoorjõudude täht (joon. 3-11, *b*).

Iga sektsioonipaari elektromotoorjõudude vektorid (*1-2*, *3-4* jne.) ühtivad faasis, aga naaberuuretes paiknevate sektsioonide (*2-3*, *4-5* jne.) elektromotoorjõudude vektorid on nihutatud, samuti kui eelmisel juhul, 40° võrra. Seetõttu mähise elektromotoorjõudude hulknurk näeb välja samuti kui joonisel 3-19. Erinevus on ainult selles, et hulknurga iga külg kujutab endast kahe ühises uurdes paikneva sektsiooni elektromotoorjõudude summat.

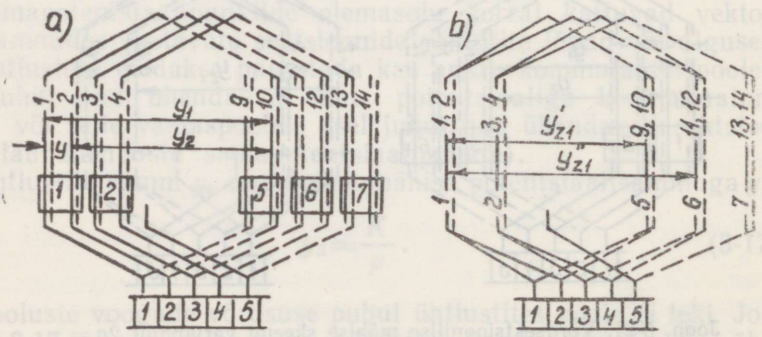
Kui $2p$, Z ja Z_e samadel väärtustel valida elementaaruurete sammud

$$y_1 = \frac{36}{4} = 9; \quad y_2 = 1 - 9 = -8,$$

siis saadakse treppmähis. Selle mähise skeemi võib samuti kujutada kahesuguselt, nagu on näidatud joonisel 3-22, *a* ja *b*. Seejuures on mähise uurete põhisammul y_{1z} kaks väärtust:

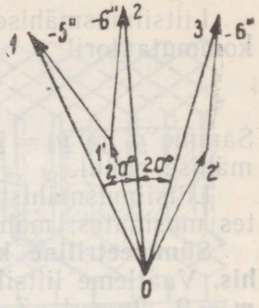
$$y'_{1z} = 4 \text{ ja } y''_{1z} = 5.$$

Joonestame selle mähise sektsioonide *1*, *2*, *3* elektromotoorjõudude vektorid (joon. 3-23). Sektsioon *1* asub uuretes *1* ja *5*



Joon. 3-22. Treppmähise skeemi variandid: $2p = 4$; $Z = 18$; $u_u = 2$; $Z_e = S = K = 36$; $y_1 = 3$; $y_2 = -8$; $y = y_k = +1$

ning ta elektromotoorjõud on joonisel 3-11, *b* esitatud tähe vektorite *1* ja *5* vahe. Sel viisil leitud sektsiooni *1* vektor *1* on joonisel 3-23 märgitud numbriga *1*; tema komponendid — uurete või sektsioonikülgede vektorid on tähistatud 1′ ja —5″.



Joon. 3-23. Joonisel 3-22 näidatud mähise sektsioonide elektromotoorjõudude vektorid

Sektsioon *2* asub uuretes *1* ja *6* ning sektsioon *3* — uuretes *2* ja *6*. Nende sektsioonide elektromotoorjõudude vektorid on joonisel 3-23 joonestatud ja tähistatud samal põhimõttel kui sektsiooni *1* vektor. Sellest joonisest järeldub, et vektorid on nihutatud teineteise suhtes 20°, s. o. uurdejaotusele vastava nurga poole väärtuse võrra. Seega treppmähis andmetega $Z = 18$ ja $Z_e = 36$ on selles suhtes samaväärne kahekordse uurete arvuga mähisega. Sellele vastavalt on astmelise mähise elektromotoorjõudude hulknurgal kaks korda rohkem külgi ja ta läheneb, võrreldes võrdsektsioonilise mähise hulknurgaga, suuremal määral ringjoonele. See on treppmähise teatav eelis, peamiseks eeliseks on aga paremad kommutatsioonitingimused (vt. § 6-6).

Vaadeldud võrdsektsioonilise ja treppmähise esimest liiki ühtlustid paigutatakse samal viisil, nagu eespool vaadeldud juhtumil. Erinevus on vaid selles, et $S = K$ kahekordistumise tõttu kahekordistub samuti ka ühtlustite samm $y_ü$.

Analoogiliselt joon. 3-21 ja 3-22 toodud skeemidega on võimalik kujutada ka teiste mähisetüüpide skeeme juhul, kui $u_u > 1$.

3-4. LIITSILMUSMÄHIS

Üldalused. Liit- ehk mitmekäigulist silmusmähist võib vaadelda koosnevana mitmest ($m = 2, 3 \ldots$) lihtsilmusmähisest. Niisugust mähist nimetatakse samuti mitmekordseks paralleelmähiseks. Vaadeldaval mähisel vahelduvad m lihtsilmusmähise sektsioonid ja kommutaatorilestad piki ümbermõõtu. Voolu ärajuhtimiseks mähisest peab harjade laius olema mitte väiksem kui m kommutaatorijaotust. Seega ühendatakse m-käigulise mähise m lihtmähist harjade abil paralleellülitusse ning liitsilmusmähise paralleelharude arv

$$2a = 2pm. \qquad (3\text{-}18)$$

Liitsilmusmähise resulteeriv samm elementaaruuretes ja samm kommutaatoril

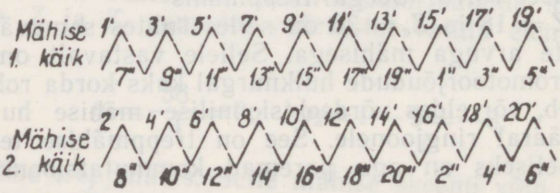
$$y = y_k = \pm m. \qquad (3\text{-}19)$$

Samme y_1 ja $y_2 = y - y_1$ määratakse samal viisil kui lihtsilmusmähise puhul.

Liitsilmusmähist kasutatakse suurte ankruvooludega võimsates masinates; mähisesektsioonid on sel juhul ühekeerulised.

Sümmeetriline kahekäiguline kahekordselt suletud silmusmähis. Vaatleme liitsilmusmähise iseärasusi konkreetse näite varal: $m = 2$, $2p = 4$, $Z = Z_e = S = K = 20$, $u_u = 1$. Seejuures $2a = 4 \cdot 2 = 8$ ning sümmeetriatingimused (3-5) ... (3-7) on täidetud.

Märgime, et liitsilmusmähisel $m = 2$ puhul on need tingimused sel juhul alati täidetud, kui K/p on paarisarv.



Joon. 3-24. Joonisel 3-25 näidatud mitmekordse silmusmähise sektsioonide külgede ühendamise tabel

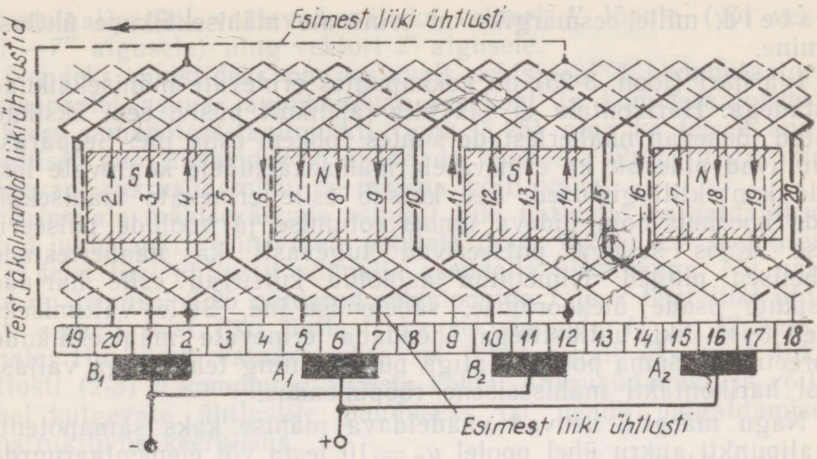
Valime mähisesammud:

$$y = y_k = +2; \qquad y_1 = \frac{20}{4} + 1 = 6; \qquad y_2 = 2 - 6 = -4.$$

Sammude teadaolevatele väärtustele vastavalt koostame mähisesektsiooni külgede ühendamise tabeli (joon. 3-24). Alustades lestalt ja sektsioonilt *1*, läbime kõik paarituarvulised sektsioonid ning jõuame tagasi lestani *1*, sulgedes sellega mähise esimese käigu. Alustades teist käiku lestalt *2*, läbime kõik paarisarvulised sektsioonid ja jõuame taas lesta *2* juurde, sulgedes ka mähise teise käigu.

Seega tekib vaadeldaval juhul kaks harjade abil paralleellülitusse ühendatud iseseisvat mähist. See on tingitud asjaolust, et $S = K$ on antud juhul paarisarv. Sellist mähist nimetatakse kahekordseks. Üldjuhul on silmusmähise kordsus t võrdne arvude m ja K suurima ühisteguriga.

Vaadeldava mähise skeem on esitatud joonisel 3-25.



Joon. 3-25. Mitmekordse silmusmähise skeem: $m = 2$, $2p = 4$, $Z = Z_e = S = K = 20$, $y_1 = 6$, $y_2 = -4$, $y = y_k = +2$

Joonisel 3-26 on kujutatud uurete või sektsiooni külgede elektromotoorjõudude täht, mille vektorid on nihutatud nurga võrra:

$$\alpha = \frac{2 \cdot 360°}{20} = 36°.$$

Joonestame antud juhul mitte sektsioonide, vaid sektsiooni külgede elektromotoorjõudude diagrammi. Sel eesmärgil liidame vastavalt joonisele 3-24 mähise mähkimise suunas järk-järgult sektsioonikülgede elektromotoorjõud. Et mähise mähkimise suunas alumiste sektsioonikülgede elektromotoorjõud lahutuvad, siis teisiti öeldes liituvad nad vastasmärgiga. Tulemuseks saame elektromotoorjõudude hulknurga (joon. 3-26), mis koosneb neljast üksteisega kattuvast hulknurgast. See viitab samuti kaheksa paralleelharu olemasolule mähises.

Ühtlustusühendused ehk ühtlustid. Joonisel 3-25 kujutatud mähise haruvoolude ühtlase jaotuse kindlustamiseks tuleb kasutada § 3-3 vaadeldud esimest liiki ühtlusteid. Nende samm

$$y_{1ü} = \frac{K}{p} = \frac{20}{2} = 10$$

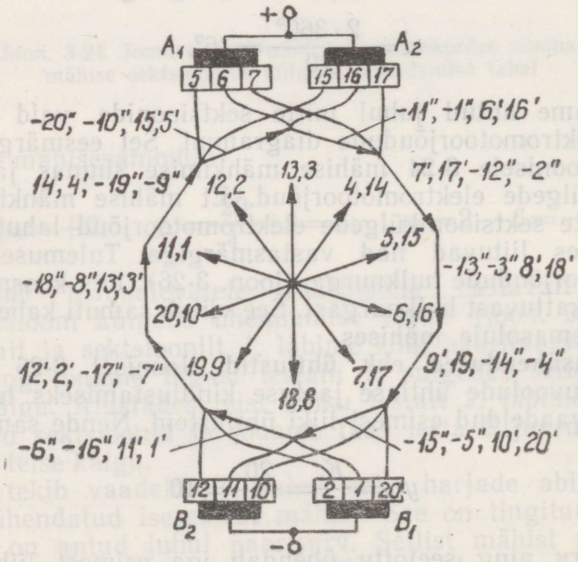
on paarisarv ning seetõttu ühendab iga esimest liiki ühtlusti tõepoolest omavahel ainult ühe mähisekäigu lesti (joon. 3-25). Samaaegselt vajab liitsilmusmähis ka nn. t e i s t l i i k i ü h t-

lusteid, mille eesmärgiks on erinevate mähisekäikude ühtlustamine.

Iga hari (joon. 3-25) on kokkupuutes erinevate mähisekäikude lestadega. Harikontakt ei saa olla täielikult püsiv, sest üksikud lestad tõusevad naaberlestade suhtes rohkem esile jne. Seepärast muutuvad pidevalt ka erinevatele mähisekäikudele kuuluvate lestade kontaktitingimused. See kutsub esile erinevate mähisekäikude koormusvoolu pideva ümberjaotumise ja voolude pulseerimise. Koos sellega pulseerivad tugevasti ka naaberlestade vahelised pinged. Nimetatud asjaolud kutsuvad esile harjade üksikute osade ülekoormuse, sädelemise jne. Selle vältimiseks tuleb teist liiki ühtlustitega ühendada erinevate mähisekäikude teoreetiliselt sama potentsiaaliga punktid ning teha seega väljaspool harikontakti mähisesisene rööpühendus.

Nagu märgiti, asuvad vaadeldava mähise kaks samapotentsiaalipunkti ankru ühel poolel $y_p = 10$ lesta või elementaaruurde kaugusel üksteisest, kuuludes ühele mähisekäigule. Seetõttu ei ole antud juhul teist liiki ühtlusti paigaldamine ankru ühele poolele võimalik.

Jooniselt 3-26 on näha, et erinevate mähisekäikude kaks sama-



Joon. 3-26. Joonisel 3-25 kujutatud mähise elektromotoorjõudude diagramm

potentsiaalipunkti vastavad näiteks vektori *1'* lõpule (või vektori *—7''* algusele) ning vektori *2'* algusele.

Nendeks punktideks on vastavalt sektsiooni *1* kommutaatori vastaspoolel asuva laupühenduse keskkoht ja kommutaatorilest *2*. Kaks samapotentsiaalipunkti (joon. 3-25) ning ka teised analoogilised punktipaarid võib ühendada teist liiki ühtlustitega, mis kulgevad ankrusüdamiku ja masina võlli vahel.

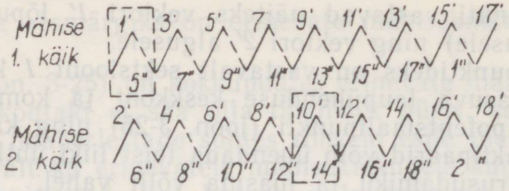
Erinevate mähisekäikude esimest liiki ühtlustid paigaldatakse antud juhul ankru erinevatele pooltele (joon. 3-25), sest seejuures on p teist liiki ühtlustit võimalik asendada üheainsaga. Nii näiteks on joonisel 3-25 näidatud sektsioonide *1* ja *2* teist liiki ühtlusti samuti teist liiki ühtlusti ka sektsioonide *11* ja *12* keskkohale. Harilikult valmistatakse sel juhul ainult üks teist liiki ühtlusti (2-3) p kommutaatorilesta kohta. Ankrusüdamiku ja võlli vahel kulgevate ühtlustite puuduseks on nende paigaldamise konstruktiivne keerulisus.

Raskete kommutatsioonitingimustega masinate kahekäigulistes silmusmähistes kasutatakse mõnikord samuti kolmandat liiki ühtlusteid. Nende ülesanne seisneb selles, et kommutaatori pöörlemisel hari ei lühistaks korraga mitte kogu sektsiooni, vaid alguses tema ühe ja seejärel teise poole. Selleks on vaja ühendada kommutaatori vastaspoolsel ankruosal asuva sektsiooni keskkoht kommutaatorilestaga, mis paikneb antud sektsiooni alguse ja lõpu vahel. Joonisel 3-25 näidatud mähisel täidavad seda ülesannet teist liiki ühtlustid, s. t. nad on samaaegselt ka kolmandat liiki ühtlustiteks. Nagu jooniselt 3-25 nähtub, lühistab hari B_1 kommutaatori paremasuunalisel liikumisel alguses lestad *1-2* ning seega ka sektsiooni *1* vasaku poole, seejärel aga lestad *2-3* ja seega ka sektsiooni *1* parema poole. Kolmandat liiki ühtlusteid paigutatakse arvuliselt sellisel hulgal, et kogu mähise kommutatsioon toimuks sektsioonipoolte kaupa. Loomulikult võib kolmandat liiki ühtlusteid kasutada ainult sel juhul, kui nende abil ühendatavate mähisepunktide potentsiaalid on võrdsed.

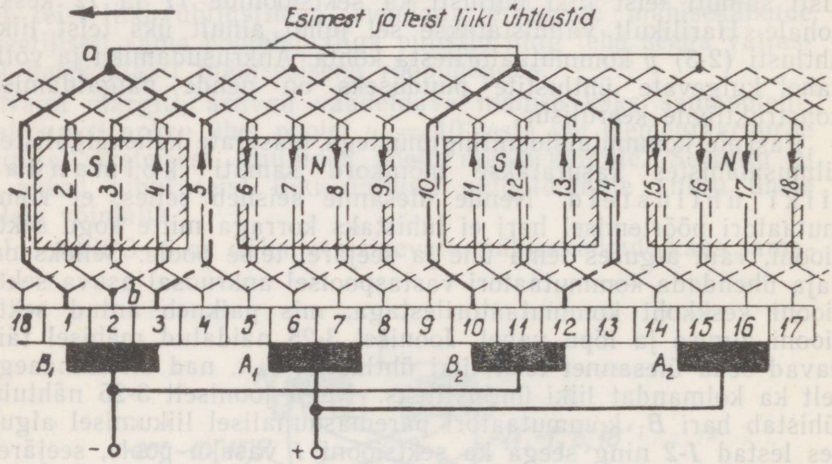
Mittesümmeetrilised liitsilmusmähised. Vaatleme kahekäigulist silmusmähist, mille andmed on: $m = 2$, $2p = 4$, $2a = 8$, $Z = Z_e = S = K = 18$, $y = y_k = 2$, $y_1 = 4$, $y_2 = -2$. Et K on paarisarv, siis saadakse kahekordselt suletud mittesümmeetriline mähis, sest tingimused (3-5) ja (3-6) ei ole täidetud. Märgime, et $m = 2$ puhul neid tingimusi ei täideta, kui k/p on paaritu arv.

Joonisel 3-27 on esitatud selle mähise sektsioonide ühendamise järjekord ning joonisel 3-28 mähiseskeem.

Joonisel 3-29 on kujutatud jooniste 3-27 ja 3-28 alusel ehitatud mähise elektromotoorjõudude diagramm ja sektsioonide elektromotoorjõudude täht. Seejuures elektromotoorjõudude tähe mõõt-



Joon. 3-27. Joonisel 3-28 kujutatud liitsilmusmähise sektsioonide külgede ühendamise tabel



Joon. 3-28. Liitsilmusmähise skeem: $m = 2$, $2p = 4$, $Z = Z_e = S = K = 18$, $y_1 = 4$, $y_2 = -2$, $y = y_k = +2$

kava on kaks korda väiksem elektromotoorjõudude hulknurga mõõtkavast. Asjaolu, et elektromotoorjõudude hulknurgad joonisel 3-29 ei kattu, on samuti mähise mittesümmeetrilisuse tunnuseks.

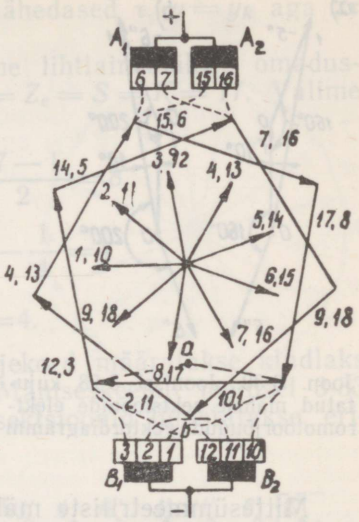
Selle mähise samapotentsiaalipunktide samm

$$y_p = \frac{K}{p} = \frac{18}{2} = 9,$$

mis järeldub ka jooniselt 3-29. Need punktid kuuluvad erinevatele mähisekäikudele. Nende ühendamisel saame teist liiki ühtlustid, mis antud juhul paiknevad ankru ühel poolel (joon. 3-28). Et need ühtlustid ühendavad ka erinevate poolusepaaride all asetsevaid

paralleelharusid, on nad samaaegselt ka esimest liiki ühtlustiteks. See asjaolu, et need harud kuuluvad mähise erinevatele käikudele, ei oma tähtsust, sest ühtlustite piisava arvu korral on kõik erinevate pooluste all asetsevad harud üksteisega ühendatud ja harja koormatakse ühtlaselt.

Vaadeldava mähise suureks eeliseks on esimest ja teist liiki ühtlustite teostamise lihtsus. Seepärast eelistataksegi praktikas sageli paarituarvulist suhet $\frac{K}{p}$ omavaid mittesümmeetrilisi kahekäigulisi mähiseid sümmeetrilistele, mille suhe $\frac{K}{p}$ on paarisarv.

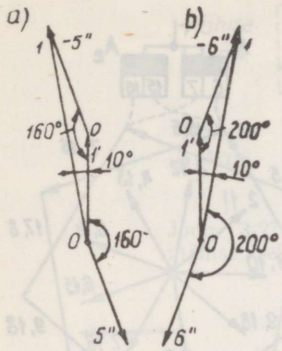


Joon. 3-29. Joonisel 3-28 kujutatud mähise elektromotoorjõudude vektordiagramm

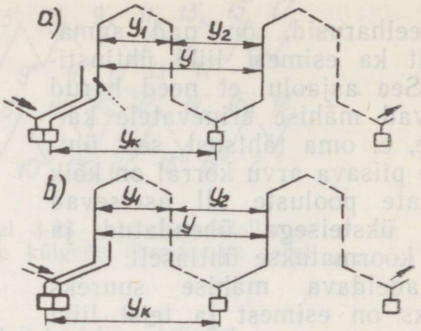
Oletame, et joonisel 3-28 näidatud mähisele on soovitav paigutada ka kolmandat liiki ühtlusteid, kusjuures üks neist ühendaks punkte *a* ja *b* (joon. 3-28). Joonisel 3-30, *a* on ehitatud selle mähise sektsiooni *1* elektromotoorjõu vektor, aga joonisel 3-29 on kriipsjoonega kujutatud sektsiooni *1* elektromotoorjõud keeru aktiivkülgede elektromotoorjõudude vahena.

Jooniselt 3-29 nähtub seejuures, et joonisel 3-28 kujutatud punktid *a* ja *b* ei ole võrdse potentsiaaliga ja seetõttu on kolmandat liiki ühtlustite paigutamine võimatu. Kui joonisel 3-28 oleks võetud pikendatud samm $y_1 = 5$, siis punkti *a* potentsiaal oleks nihkunud vastupidisesse suunda (joon. 3-30, *b*). Ka sel juhul ei ole punktid *a* ja *b* võrdse potentsiaaliga. Seepärast, kui on vaja paigutada kolmandat liiki ühtlusteid, kasutatakse joonisel 3-25 näidatud sümmeetrilisi kahekäigulisi mähiseid, millel $\frac{K}{p}$ on paarisarv.

Paarituarvulise K puhul tekib ühekordselt suletud kahekäiguline silmusmähis. See mähis on igal juhul mittesümmeetriline, sest $2a = 2p$ on paarisarv ja tingimus (3-5) ei ole täidetud. Kolmekäigulised silmusmähised ($m = 3$, $a = 3p$) on samuti alati mittesümmeetrilised, sest siin ei täideta tingimust (3-7). Sellele vaatamata kasutatakse viimasel ajal võimsates masinates mähiseid, kus $m = 3$.



Joon. 3-30. Joonisel 3-28 kujutatud mähise sektsioonide elektromotoorjõudude vektordiagramm



Joon. 3-31. Lihtlainemähise ristita (*a*) ja ristiga (*b*) sektsioonid

Mittesümmeetriliste mähiste puhul tuleb alati eelnevalt nende kasutamisvõimalusi analüüsida. Neid küsimusi, samuti ka mitmekäiguliste mähiste, millel $u_u > 1$, iseärasusi ja treppmähiseid vaadeldakse erijuhendites.

3-5. LIHTLAINEMÄHIS

Üldalused. Käies mõtteliselt läbi lihtlainemähise järjestikku ühendatud sektsioonid, sooritame lainekujulise teekonna ümber ankru. Iga ringkäik hõlmab p sektsiooni ja lõpeb lähtelestast vasakul või paremal asetseval naaberlestal (joon. 3-31). Esimesel juhul (joon. 3-31, *a*) tekib ristita mähis, teisel juhul (joon. 3-31, *b*) ristiga. Mähisematerjali kulu teisel juhul on mõnevõrra suurem. Vaadeldavat mähist nimetatakse ka lihtjadamähiseks.

Vastavalt määratlusele kehtib lihtlainemähise kommutaatorisammu y_k (joon. 3-31) ja kommutaatorilestade arvu K vahel seos

$$py_k \pm 1 = K,$$

millest

$$y_k = y = \frac{K \mp 1}{p}. \tag{3-20}$$

Miinusmärk kehtib ristita, plussmärk ristiga mähise kohta. Et samm $y_k = y$ peab olema täisarv, siis K ei saa olla meelevaldse väärtusega. Samm y_1 määratakse valemiga (3-9) ning

$$y_2 = y - y_1. \tag{3-21}$$

Sammude y_1 ja y_2 väärtused on lähedased τ, $y = y_k$ aga 2τ suurusele.

Sümmeetriline lainemähis. Tutvume lihtlainemähise omadustega näite varal, kus $2p = 4$ ja $Z = Z_e = S = K = 17$. Valime seejuures

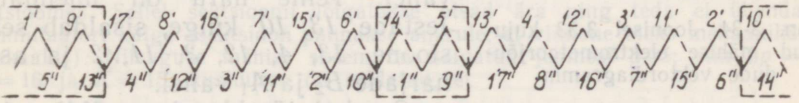
$$y_k = y = \frac{K-1}{p} = \frac{17-1}{2} = 8,$$

$$y_1 = \frac{Z_e}{2p} - \varepsilon = \frac{17}{4} - \frac{1}{4} = 4$$

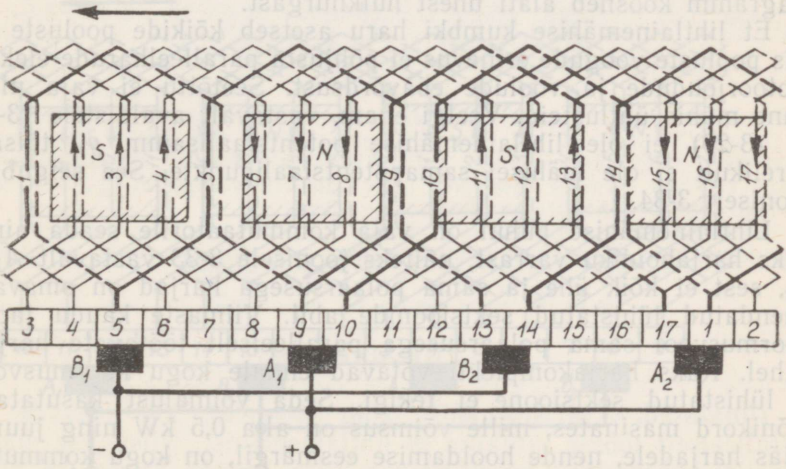
ja

$$y_2 = y - y_1 = 8 - 4 = 4.$$

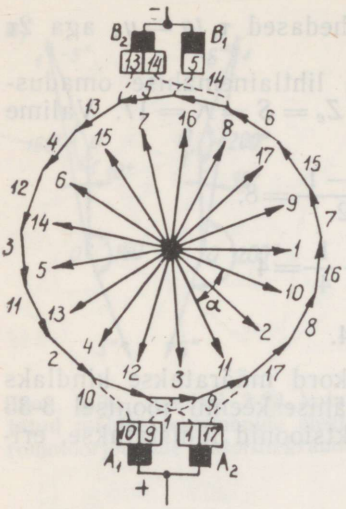
Sektsioonikülgede ühendamise järjekord määratakse kindlaks joonisel 3-32 esitatud tabeli alusel. Mähiseskeemil joonisel 3-33 näidatud pidevate joontega esitatud sektsioonid lühistatakse, eri-



Joon. 3-32. Joonisel 3-33 näidatud lihtlainemähise sektsioonide külgede ühendamise tabel



Joon. 3-33. Lihtlainemähise skeem: $2p = 4$, $Z = Z_e = S = K = 17$, $y_1 = 4$, $y_2 = 4$, $y_k = 8$



Joon. 3-34. Joonisel 3-33 kujutatud mähise elektromotoorjõudude vektordiagramm

nevalt silmusmähiste sektsioonidest, kahe sama polaarsusega harja ja ühendusjuhtmete kaudu. Lühistatud sektsioonid on märgitud ka joonisel 3-32.

Joonisel 3-34 on toodud vaadeldava mähise elektromotoorjõudude diagramm ja sektsioonide elektromotoorjõudude täht, mille mõõtkava on hulknurga mõõtkavast kaks korda suurem.

Joonistelt 3-32, 3-33 ja 3-34 järeldub, et mähisel on kaks paralleelharu. Esimene haru on ühendatud oma otstega lestade *17*, *14* külge, sisaldab sektsioone *17*, *8*, *16*, *7*, *15*, *6* ja asub harjade A_2 ja B_2 vahel. Teine haru on ühendatud lestade *13*, *10* külge, sisaldab sektsioone *13*, *4*, *12*, *3*, *11*, *2* ja asub harjade B_2 ja A_1 vahel.

Saadud järeldusel on üldine iseloom: igal lihtlainemähisel on

$$2a=2 \qquad (3\text{-}22)$$

paralleelharu ja niisuguse mähise elektromotoorjõudude vektordiagramm koosneb alati ühest hulknurgast.

Et lihtlainemähise kumbki haru asetseb kõikide pooluste all, siis pooluste voogude erinevus ei põhjusta paralleelharude elektromotoorjõudude ja voolude ebavõrdsust. Seetõttu ei vaja niisugune mähis ühtlusteid. Veelgi enam, vastavalt avaldistele (3-16) ja (3-20) ei ole lihtlainemähise potentsiaalisamm y_p täisarv. Järelikult ei ole mähisel samapotentsiaalipunkte. See selgub ka jooniselt 3-34.

Lihtlainemähise puhul on vaja kommutaatorile seada ainult kaks harjahoidiku varrast, näiteks joonisele 3-33 vastavalt A_1 ja B_2, sest et kõik ühe ja sama polaarsusega harjad on omavahel ühendatud lühistatud sektsioonide abil. Viimaste kaudu jaotub koormusvool sama polaarsusega paralleelselt töötavate harjade vahel. Kaks harjakomplekti võtavad endale kogu koormusvoolu ja lühistatud sektsioone ei tekigi. Seda võimalust kasutatakse mõnikord masinates, mille võimsus on alla 0,5 kW ning juurdepääs harjadele, nende hooldamise eesmärgil, on kogu kommutaatori ümbermõõdul raskendatud. Seejuures halvenevad kommutatsioonitingimused ning suurema võimsusega masinates tekib vaja-

dus kommutaatorit pikendada. Seetõttu paigutatakse masinale harilikult harjahoidiku vardaid siiski täielik komplekt ($2p$).

Kui $a = 1$, siis sümmeetriatingimused (3-5), (3-6) ja (3-7) on täidetud iga p_1, Z, u_u ja K väärtuste puhul. Kuid nende suuruste valiku võimalused on piiratud seosega (3-20). Viimane võtab pärast asendust $K = u_u Z$ järgmise kuju:

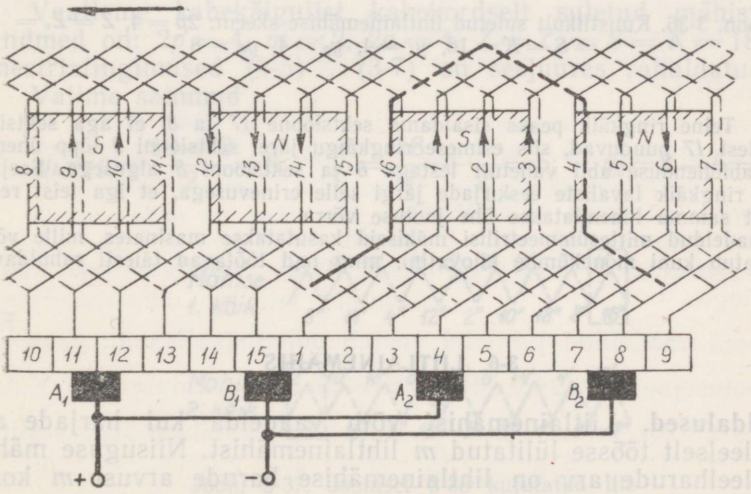
$$y_k = y = \frac{u_u Z \mp 1}{p}. \qquad (3\text{-}23)$$

Siit nähtub, et kuna samm y_k peab olema täisarvuline, siis paarisarvuliste p väärtuste puhul nii Z kui ka u_u peavad olema paarituarvulised ($u_u = 1, 3, 5 \ldots$).

Surnud sektsiooniga lihtlainemähis. Real juhtumitel ületatakse avaldiste (3-20) ja (3-23) täitmisel tekkivaid raskusi mittesümmeetriliste mähiste kasutamise teel. Näiteks kui p ja $Z_e = u_u Z$ on paarisarvulised, võib kasutada mähist, millel $K = Z_e - 1$ ning jätta üks sektsioon kasutamata, nn. surnud sektsiooniks. Sellel sektsioonil lõigatakse otsad ära ning teda ei ühendata kommutaatori külge (sektsioon pannakse ankrule, et viimane oleks mehaaniliselt tasakaalus). Niisuguse mähise skeem on näidatud joonisel 3-35; siin $2p = 4$, $Z_e = 16$ ja $K = 15$, kusjuures on eeldatud, et

$$y_k = y = \frac{K+1}{2} = \frac{15+1}{2} = 8; \qquad y_1 = 4; \qquad y_2 = 4.$$

Surnud sektsiooni külgi mähisesammude lugemisel ei arvestata.

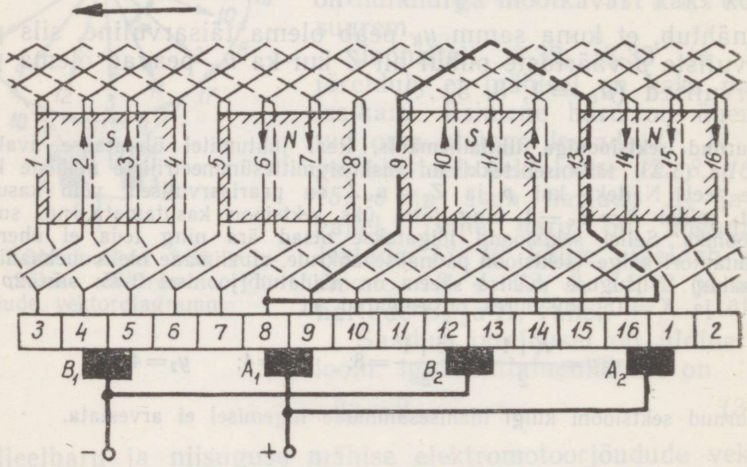


Joon. 3-35. Surnud sektsiooniga lihtlainemähise skeem: $2p = 4$, $Z = Z_e = 16$, $y_1 = 4$, $y_2 = 4$, $y_k = 8$

Kunstlikult suletud lihtlainemähis. Oletame, et $Z_e = S = K = 16$ ja $2p = 4$. Valime mähisesammud eeldusel, et Z_e, S ja K väärtused on ühe võrra suuremad, s. o. $Z_e = S = K = 17$. Vastavalt avaldisele (3-20) võib seejuures võtta

$$y_k = y = \frac{17-1}{2} = 8; \quad y_1 = 4; \quad y_2 = 4.$$

Lähtudes sammude niisugustest väärtustest, koostame mähiseskeemi (joon. 3-36), alustades näiteks lestalt *1*. Esimesel ringkäigul ümber ankru läbime sektsioone *1* ja $1 + 8 = 9$ ning peaksime saabuma lesta $9 + 8 = 17$



Joon. 3-36. Kunstlikult suletud lihtlainemähise skeem: $2p = 4$, $Z = Z_e = S = K = 16$, $y_1 = 4$, $y_2 = 4$, $y_k = 8$

juurde. Teine ringkäik peaks sisaldama sektsioone *17* ja *8*, et aga sektsioon *17* ja lest *17* puuduvad, siis esimese ringkäigu järel sektsiooni *9* lõpp ühendatakse abiühenduse abil vahetult lestaga *8* ja sektsiooni *8* algusega. Seejärel jätkub ringkäik tavaliste eeskirjade järgi selle erinevusega, et iga teist resulteerivat sammu lühendatakse ühe jaotuse võrra.

Vaadeldud mittesümmeetrilisi mähiseid kasutatakse masinates, mille võimsus ulatub kuni mõnekümne kilovatini, ning nad töötavad täiesti rahuldavalt.

3-6. LIITLAINEMÄHIS

Üldalused. Liitlainemähist võib vaadelda kui harjade abil paralleelselt töösse lülitatud m lihtlainemähist. Niisuguse mähise paralleelharude arv on lihtlainemähise harude arvust m korda suurem:

$$2a = 2m. \qquad (3\text{-}24)$$

Vaadeldavat mähist nimetatakse samuti ka mitmekordseks jadamähiseks.

Sümmeetriliste m-käiguliste lainemähiste valmistamine on seoste (3-7) ja (3-24) alusel võimalik tingimusel

$$\frac{2p}{m} = \text{täisarv.} \qquad (3\text{-}25)$$

Võimalik maksimaalne käikude arv seejuures

$$m = 2p$$

ja harude maksimaalne arv $2a = 4p$, seega samasugune kui kahekäigulisel silmusmähisel. Mähise m-käigu sektsioonid ja kommutaatorilestad vahelduvad piki ümbermõõtu. Seetõttu, olles läbinud p järjestikku ühendatud sektsiooni ankru ümbermõõdul, peame saabuma mitte lähtelesta kõrval asetseva kommutaatorilesta juurde, nagu see oli lihtlainemähise puhul, vaid lähtelestast m jaotuse võrra vasakule või paremale. Sellele vastavalt

$$py_k \pm m = K$$

ja

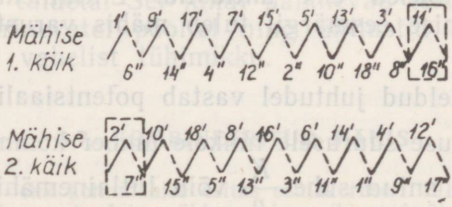
$$y_k = y = \frac{K \mp m}{p} = \frac{K \mp a}{p}. \qquad (3\text{-}26)$$

Samme y_1 ja $y_2 = y - y_1$ määratakse tavalisel viisil. Mähise sulgumiskordsus on võrdne arvude m ja K suurima ühisteguriga.

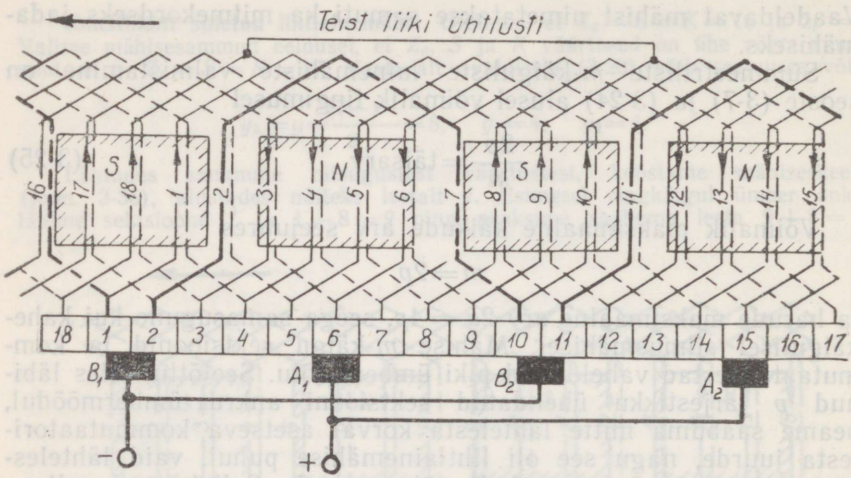
Vaatleme kahekäigulist kahekordselt suletud mähist, mille andmed on: $2p = 4$, $m = 2$, $2a = 4$, $Z = Z_e = S = K = 18$. Sümmeetriatingimused (3-5) ... (3-7) on seejuures rahuldatud.

Valime sammud

$$y_k = y = \frac{18-2}{2} = 8; \quad y_1 = \frac{18}{4} + \frac{1}{2} = 5; \quad y_2 = 8 - 5 = 3.$$



Joon. 3-37. Joonisel 3-38 kujutatud liitlainemähise sektsioonide külgede ühendamise tabel



Joon. 3-38. Kahekäigulise kahekordselt suletud lainemähise skeem: $m = 2$, $2p = 4$, $Z = Z_e = S = K = 18$, $y_1 = 5$, $y_2 = 3$, $y = y_k = 8$

Nende andmete alusel on koostatud mähisesektsiooni külgede ühendamise tabel (joon. 3-37) ja mähiseskeem (joon. 3-38). Mähis koosneb kahest omavahel ühendamata lihtlainemähisest. Neist üks sisaldab paarituarvulisi sektsioone ja lesti, teine — paarisarvulisi.

Joonisel 3-39 on kujutatud joonise 3-37 ja joon. 3-38 toodud skeemi alusel mähise elektromotoorjõudude vektordiagramm ja uurete elektromotoorjõudude täht. Diagramm koosneb kahest teineteisega kattuvast hulknurgast.

Ühtlustusühendused ehk ühtlustid. Liitlainemähise käikude ühtlase koormamise eesmärgil tuleb mähis varustada teist liiki ühtlustitega.

Eespool vaadeldud juhtudel vastab potentsiaalisamm $y_p = \frac{K}{p}$ kahe poolusejaotuse suurusele nihkele ümber kommutaatori. Kuid avaldises (3-26) antud suhe $\frac{K}{p}$ võib liitlainemähise korral võrduda ka murdarvuga. Seepärast võivad üldjuhul liitlainemähisel lähimad sama potentsiaaliga kommutaatorilestad olla üksteisest $n = 1, 2, 3 \ldots$ paari jaotuse kaugusel.

Siin

$$y_p = \frac{nK}{p}, \qquad (3\text{-}27)$$

kus n on niisugune täisarv, mille puhul y_p on samuti täisarv.

Korrutades avaldist (3-26) arvuga n, märkame, et y_p [vt. valem (3-27)] võib omada täisarvulist väärtust sellise minimaalse n puhul, kui

$$\frac{an}{p} = 1.$$

Siit

$$n = \frac{p}{a} \qquad (n = 1, 2, 3 \ldots). \qquad (3\text{-}28)$$

Tingimuse (3-28) täitmisel on liitlainemähise potentsiaalisamm vastavalt valemile (3-27)

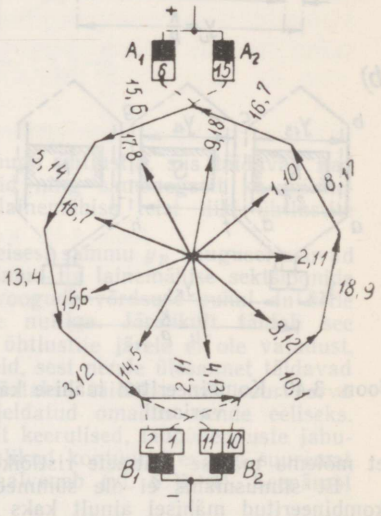
$$y_p = \frac{K}{a}. \qquad (3\text{-}29)$$

Teist liiki ühtlustite paigutamine masina ühele poolele on võimalik ainult tingimuse (3-28) täitmisel. Juhul, kui $u_u > 1$, tuleb samuti täita ka tingimust

$$\frac{K}{u_u a} = \text{täisarv}.$$

Joonisel 3-38 esitatud juhul

$$y_p = \frac{K}{a} = \frac{18}{2} = 9,$$



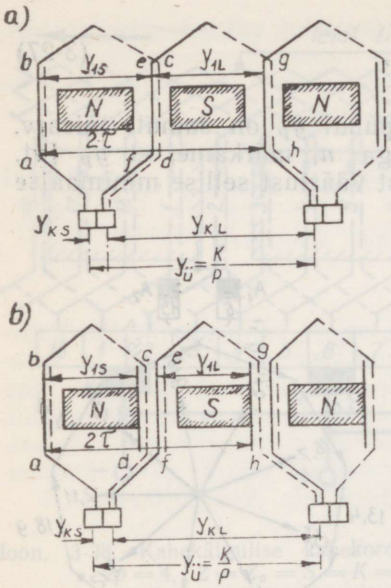
Joon. 3-39. Joonisel 3-38 kujutatud mähise elektromotoorjõudude vektordiagramm

mis järeldub ka joonisel 3-39 kujutatud elektromotoorjõudude diagrammist. Joonisel 3-38 on näidatud üks teist liiki ühtlusti.

Kasutatakse ka mähiseid, millel $p = 3$ ja $a = 2$ ning tingimust (3-28) ei täideta. Sel juhul paiknevad teist liiki ühtlustite otsad ankru erinevatel pooltel ning ühtlustid läbivad võlli ja ankrusüdamiku vahelist tühimikku.

3-7. KOMBINEERITUD MÄHIS

Kombineeritud ehk konnmähise esitas esmakordselt 1910. a. Latour. Mähis kujutab endast silmus- ja lainemähise, mis paiknevad ühistes uuretes, ühendatakse ühise kommutaatori külge ja töötavad paralleelselt, kombinatsiooni. Et kumbki mähis on kahekihiline, siis uurdes paikneb mähise neli kihti. Kumbki mähistest on arvutatud poolele koguvoolu väärtusele. Mähiste elektromotoorjõud



Joon. 3-40. Kombineeritud mähise kaks varianti

peavad olema võrdsed. Seega arvutatakse kumbki mähis masina võimsuse poolele väärtusele.

Vaatleme minimaalselt võimaliku harude arvuga sümmeetrilise kombineeritud mähise teostamise tingimusi. Silmus- ja lainemähisele kuuluvaid suurusi tähistame vastavalt indeksitega «*S*» ja «*L*».

Minimaalne on lihtsilmusmähise harude arv. Siis $m_s = 1$, $a_s = p$ ning tingimuse (3-5) kohaselt

$$\frac{K}{p} = \text{täisarv}.$$

Valemi (3-26) alusel

$$\frac{a_s}{p} = \frac{m_s}{p} = \text{täisarv}.$$

Järelikult lainemähise harude minimaalne arv

$$a_L = m_L = p = a_S.$$

Seega peab nii silmus- kui ka lainemähisel olema võrdne arv paralleelharusid. Selleks et harude elektromotoorjõud oleksid võrdsed, peavad samuti olema võrdsed mõlema mähise harude keerdude arvud. Järelikult peab juhtmete üldarv kummaski mähises olema võrdne. Voolude võrdsuse tingimusest järeldub, et mõlema mähise juhtmete ristlõiked peavad samuti olema ühesugused.

Et silmusmähis ei ole sümmeetriline, kui $m_S > 2$, siis on sümmeetrilisel kombineeritud mähisel ainult kaks võimalikku varianti:

1) $m_S = 1$, $m_L = p$; 2) $m_S = 2$, $m_L = 2p$.

Et silmus- ja ka lainemähis ühendatakse ühiste kommutaatorilestade külge, siis ühtlustusvoolude tekkimise vältimiseks peavad mähisesammud olema kindlates omavahelistes suhetes. On võimalikud nende suhete kaks varianti (joon. 3-40).

Joonisel 3-40, *a* kujutatud Latouri skeemil

$$\left.\begin{aligned} y_{1S} + y_{1L} &= \frac{K}{p} \\ y_{kS} + y_{kL} &= \frac{K}{p} \end{aligned}\right\} \qquad (3\text{-}30)$$

Ühtlustusvoolude tekkimise vältimiseks peab joonisel 3-40, *a* kujutatud narjade ja nendevahelise ühenduslati kaudu lühistatud kontuuri *abcdefgh* elektromotoorjõud võrduma nulliga. Et juhtmed *ef* ja *dc* paiknevad samas uurdes ja nende elektromotoorjõud on suuruselt ning suunalt samad, siis esitatud tingimus on täidetud. Juhtmete *ab* ja *hg* elektromotoorjõud on samuti suuruselt ja suunalt samad, sest juhtmed asetsevad magnetväljas üksteisest kahe poolusejaotuse kaugusel.

Latouri skeemist (joon. 3-40, *a*) on võimalik saada Latouri-Pierre'i skeemi (joon. 3-40, *b*). Kui Latouri skeemis y_{1S} ja y_{1L} on täissammud

$$y_{1S} = y_{1L} = \frac{Z_e}{2p} = \frac{K}{2p},$$

siis tuleb juhtmed *dc* ja *hg* nihutada ühe hambajaotuse võrra vasakule, seega lühendada samme y_{1S} ja y_{1L} ühe hambajaotuse võrra. On ilmne, et kontuuri *abcdefgh* elektromotoorjõudude summa on ka sel juhul võrdne nulliga.

Skeemi 3-30, *b* jaoks kehtivad järgmised sammuseosed:

$$\left.\begin{aligned} y_{1L} &= y_{1S} \\ y_{kS} + y_{kL} &= \frac{K}{p} \end{aligned}\right\} \qquad (3\text{-}31)$$

Potentsiaalisamm kommutaatoril

$$y_p = \frac{K}{p}.$$

Kui valmistada kommutaatoril niisuguse sammuga ühtlustid, siis täidavad nad silmusmähise esimest liiki ühtlustite ülesandeid ning samaaegselt ka mitmekordse silmus- (kui selline on olemas) ja lainemähise teist liiki ühtlustite ülesandeid.

Kuid jooniselt 3-40, *a* ja *b* järeldub, et üksteisest sammu y_p kaugusel asuvad kommutaatorilestad on omavahel ühendatud silmus- ja lainemähise sektsioonide kontuuri *abcdefgh* kaudu. Seejuures pooluste voogude võrdsuse puhul on selle kontuuri elektromotoorjõudude summa võrdne nulliga. Järelikult täidab see kontuur ühtlusti ülesandeid ning spetsiaalsete ühtlustite järele ei ole vajadust.

Seega ei vaja kombineeritud mähis ühtlusteid, sest nende ülesannet täidavad mähise enda elemendid. Juhul kui mähiselt nõutakse täielikku või suurt arvu ühtlusteid, siis on kombineeritud mähiste kirjeldatud omadus nende eeliseks. Kombineeritud mähised on aga konstruktsioonilt keerulised, laupühenduste jahutamine on halvem ning ühtlustusvoolude loomulikud kontuurid evivad suuremat induktiivsust, mille tagajärjel kommutatsioon halveneb (vt. § 6—4). Seepärast on nende mähiste kasutamine piiratud.

Kombineeritud mähise sektsioone ühendatakse sageli poolidesse. Pooli kuju on näidatud joonisel 3-41. Poolide iseloomuliku kuju järgi nimetatakse kombineeritud mähist sageli konnmähiseks.

Vaatleme kombineeritud mähise näidet, kui $2p = 4$, $a_S = a_L = 2$, $Z = Z_e = S = K = 18$.

Silmusmähis on lihtmähis, lainemähis aga kahekäiguline kahekordselt suletud mähis.

Silmusmähise sammud:

$$y_{kS} = +1,$$

$$y_{1S} = \frac{Z_e}{2p} - \varepsilon = \frac{18}{4} - \frac{1}{2} = 4,$$

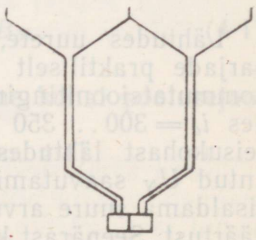
$$y_{2S} = y_{kS} - y_{1S} = 1 - 4 = -3.$$

Lainemähise sammud:

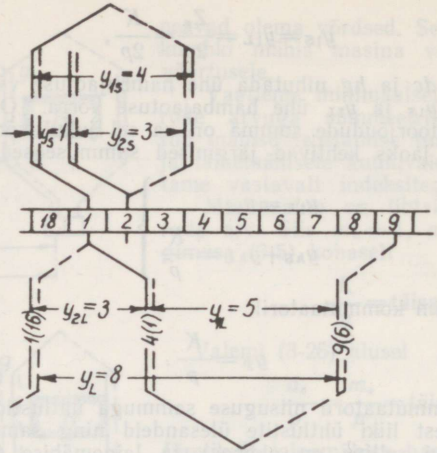
$$y_{kL} = \frac{K - a_L}{p} = \frac{18 - 2}{2} = 8,$$

$$y_{1L} = \frac{Z_e}{2p} + \varepsilon = \frac{18}{4} + \frac{1}{2} = 5,$$

$$y_{2L} = y_{kL} - y_{1L} = 8 - 5 = 3.$$



Joon. 3-41. Kombineeritud mähise sektsioonide kuju



Joon. 3-42. Kombineeritud mähise skeemi elemendid: $2p = 4$, $a_S = a_L = 2$, $Z = Z_e = S = K = 18$

Tingimused (3-30) on täidetud.

Mähiseskeemi elemendid on kujutatud joonisel 3-42. Silmus- ja lainemähise paigutus on tavakohaselt näidatud kommutaatori suhtes erinevatel pooltel.

Kombineeritud mähises sisalduvad mähised (lihtsilmus- ja liitlainemähis) on samasuguste andmetega nagu mähis, mida vaadeldi § 3-3 ja 3-6 (vt. joon. 3-16, 3-17 ja 3-19; joon. 3-37, 3-38 ja 3-39). Seepärast kujutab tema täielik skeem endast joonistel 3-17 ja 3-38 esitatud skeemide kombinatsiooni. Joonistel 3-19 ja 3-39 kujutatud vektordiagrammid on ühesugused, mis viitab kombineeritud mähise andmete õigele valikule ja mähise headele tööomadustele. Joonistel 3-38 ja 3-42 kujutatud skeemide võrdlusel tuleb silmas pidada, et joonisel 3-38 on uurded nummerdatud nii, nagu on sulgudes näidatud joonise 3-42 allosas.

3-8. MÄHISE TÜÜBI VALIK

Lähtudes uurete, mähise juhtmete, kommutaatorilestade ja harjade praktiliselt ratsionaalsetest mõõtmetest, aga samuti ka kommutatsioonitingimustest, valitakse paralleelharu vool piirides $i_a = 300 \ldots 350$ A, erandjuhtudel $i_a = 400 \ldots 450$ A. Teisest seisukohast lähtudes peab väikese võimsusega masinates ettenantud U_N saavutamiseks väikeste Φ väärtuste tõttu mähiseharu sisaldama suure arvu keerde, mis piirab juhtmete ristlõiget ja i_a väärtust. Seepärast kasutatakse niisugustes masinates minimaalse harude arvuga mähist, s. o. lihtlainemähist. Suurema võimsusega masinates kasutatakse mähiste teisi tüüpe.

Sellele vastavalt, kui $U_N = 220$ V, kasutatakse lihtlainemähist võimsustel $P_N \leqslant 80 \ldots 100$ kW, mitmekordset lainemähist võimsustel $P_N = 150 \ldots 300$ kW, lihtsilmusmähist, kui $P_N = 100 \ldots 500$ kW ja enam. Mitmekordseid silmusmähiseid kasutatakse madalpingemasinates ($U_N < 50$ V) suurte voolude puhul ja normaal- ning kõrgema pingega suurtes masinates ($U_N > 110$ V). Teistsuguste pingete puhul nimetatud võimsused muutuvad proportsionaalselt U_N väärtustele.

Kombineeritud mähised leiavad mõningat kasutamist ülisuure võimsusega masinates ja raskete tööreŽiimide puhul (kiirelt muutuvad koormused jne.). Mähise tüübi valikut mõjutavad ka pooluste arv, pöörlemiskiirus jne.

Väärtust $u_u = 1$ kasutatakse ainult madalpingemasinates suurte voolude puhul. Kui $U_N = 220$ V ja $P_N > 30 \ldots 50$ kW, siis keerdude arv sektsioonis võrdub alati ühega.

Neljas peatükk

ELEKTROMAGNETILISED PÕHISEOSED

4-1. ANKRU ELEKTROMOTOORJÕUD JA ELEKTROMAGNETILINE MOMENT

Ankru elektromotoorjõud. Tähistame mähise aktiivjuhtmete arvu tähega N ja arvutame ankru E_a eeldusel, et $y_1 = \tau$ ja et harjad asuvad geomeetrilisel neutraaljoonel. Paralleelharu kõikide $N/2a$ juhtmete elektromotoorjõud liituvad siis aritmeetiliselt. Järelikult võib E_a arvutamiseks summeerida ühe pooluse all olevate juhtmete elektromotoorjõud ja korrutada tulemust $\frac{2p}{2a}$-ga. Seega

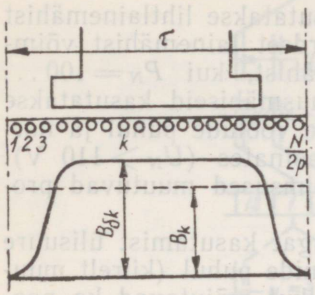
$$E_a = \frac{2p}{2a} \sum_{k=1}^{N/2p} B_{\delta k} l_\delta v = \frac{p l_\delta v}{a} \sum_{k=1}^{N/2p} B_{\delta k}, \qquad (4\text{-}1)$$

kus $B_{\delta k}$ on induktsiooni väärtus k-nda juhtme kohal poolusejaotuse ulatuses (joon. 4-1).

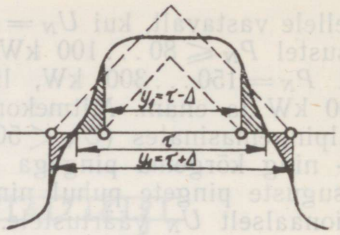
Küllalt suure $N/2p$ puhul võib võtta (joon. 4-1)

$$\sum_{k=1}^{N/2p} B_{\delta k} = \frac{N}{2p} B_k,$$

kus B_k on magnetilise induktsiooni keskmine väärtus poolusejaotuse ulatuses



Joon. 4-1. Ankru elektromotoorjõu ja elektromagnetilise momendi määramine



Joon. 4-2. Mähisega ahelduva voo määramine lühendatud või pikendatud sammu puhul

$$B_k=\frac{\Phi_\delta}{\tau l_\delta}.$$

Peale selle

$$v=2p\tau n.$$

Pärast nende suuruste asetamist avaldisse (4-1) saame

$$E_a=\frac{pN}{a}\Phi_\delta n \qquad (4\text{-}2)$$

või

$$E_a=C_E\Phi_\delta n, \qquad (4\text{-}3)$$

kus tegur

$$C_E=\frac{pN}{a}$$

on igale masinale omane konstantne suurus.

Kui suuruse n asemel paigutada valemisse (4-2) pöörlemise nurkkiirus

$$\Omega=2\pi n, \qquad (4\text{-}5)$$

siis saame

$$E_a=C_M\Phi_\delta\Omega, \qquad (4\text{-}6)$$

kus

$$C_M=\frac{C_E}{2\pi}=\frac{pN}{2\pi a}. \qquad (4\text{-}7)$$

Nagu avaldistest (4-3) ja (4-6) nähtub, on E_a võrdeline põhimagnetvooga ja pöörlemiskiirusega ning ei sõltu õhupilu induktsiooni jaotuskõvera kujust.

Mähise lühendatud või pikendatud sammu korral tuleb avaldistesse (4-2), (4-3) ja (4-6) panna Φ_δ asemele voog, millega sektsioon siis aheldub, kui ta asub pooluse suhtes sümmeetriliselt

(joon. 4-2). Seejuures sammu pikendamine mingi suuruse Δ võrra on samaväärne sammu lühendamisega sama suuruse võrra. Kalduurete puhul tuleb lähtuda samast põhimõttest. Harilikes tingimustes, kui sammu pikendamine või lühendamine, samuti ka uurete kalde suurus on väikesed, on nende mõju väike ja seda ei arvestata.

Kui harjad on geomeetrilisest neutraaljoonest nihutatud, siis elektromotoorjõud on väiksem. Sel juhul tuleb avaldistesse (4-2), (4-3) ja (4-6) panna voog, millega sektsioon aheldub momendil, kui harjad teda lühistavad. Kui harjad on neutraaljoonest nihutatud poole poolusejaotuse võrra, siis $E_a = 0$.

Elektromagnetiline moment ja võimsus. Samadel eeldustel, mis kehtisid E_a määramisel, on masina elektromagnetiline moment

$$M_{em} = 2p \sum_{k=1}^{N/2p} \frac{D_a}{2} B_{\delta k} l_\delta i_a.$$

Asendame siin

$$D_a = \frac{2p\tau}{\pi}, \qquad i_a = \frac{I_a}{2a}.$$

Siis

$$M_{em} = \frac{p}{2\pi a} \tau l_\delta I_a 2p \sum_{k=1}^{N/2p} B_{\delta k}.$$

Kui selles avaldises asendada summa nagu eespoolgi B_k ja Φ_δ kaudu, siis saame lõplikult

$$M_{em} = C_M \Phi_\delta I_a, \tag{4-8}$$

kusjuures igale antud masinale omane konstantne tegur C_M määratakse võrdusest (4-7).

Eespool tehtud märkused väljakõvera kuju, mähisesammu, uurete kalde ja harjade neutraaljoonelt nihkumise mõju kohta on kehtivad ka antud juhtumil. SI süsteemis saadakse moment njuutonmeetrites (Nm). Kui momenti on tarvis avaldada kilogramm-meetrites (kGm), siis tuleb tulemus jagada 9,81-ga.

Märgime, et võrduse (4-7) arvestamisel võib avaldist (4-8) esitada ka kujul

$$M_{em} = \frac{1}{2\pi} \left(N \frac{I_a}{2a} \right) (2p\Phi_\delta). \tag{4-9}$$

Sellest järeldub, et moment on võrdeline kõikide pooluste vooga $(2p\Phi_\delta)$ ja kõikide ankrujuhtmete vooluga $\left(N \frac{I_a}{2a} \right)$.

Seostest (4-6) ja (4-8) tulenevad ka kaks võrdväärset elektromagnetilise võimsuse avaldist:

$$P_{em} = E_a I_a = M_{em} \Omega. \tag{4-10}$$

4-2. PÕHILISED ELEKTROMAGNETILISED KOORMUSED JA MASINA KONSTANT

Elektromagnetilised koormused. Edaspidi eeldatakse selles peatükis, et kõik vaadeldavad suurused vastavad nimirežiimile, kuid lühiduse mõttes seda lisaindeksitega ei näidata.

Elektrimasinate tähtsaimateks elektromagnetilisteks koormusteks, mis määravad materjalide kasutamisastme ja masina mõõtmed etteantud nimivõimsusel, on magnetiline induktsioon õhupilus B_δ ja ankru voolukate A_a. Viimane kujutab endast ankrumähise summaarse voolu väärtust ankru ümbermõõdu pikkusühiku kohta. Alalisvoolumasinal

$$A_a = \frac{Ni_a}{\pi D_a} = \frac{NI_a}{2a\pi D_a} = \frac{NI_a}{4ap\tau}. \qquad (4\text{-}11)$$

Ankru väikese läbimõõdu D_a tõttu on väikese võimsusega masinates hambatsooni mõõtmete geomeetrilised vahekorrad vähem soodsad, sest hamba samm on hamba jala kohal tunduvalt väiksem kui ankru välispinnal. Sellepärast tuleb niisugustes masinates hamba jala suure küllastuse vältimiseks valida B_δ-le väiksemad väärtused (vt. § 2-5). Lisaks sellele on väikestes masinates uurde sügavus väiksem ja uurete ning juhtmete ristlõigete väiksemate väärtuste tõttu võtab isolatsioon suhteliselt suurema osa uurde ristlõikepinnast kui suurtes masinates. Nende põhjuste tõttu on A_a väikestes masinates ka väiksem kui suurtes masinates. Alalisvoolumasinates $D_a = 10$ cm ja $D_a = 30$ cm puhul on voolukate vastavalt piirides

$$A_a = (1{,}0 \ldots 1{,}5) \cdot 10^4 \text{ A/m} = 100 \ldots 150 \text{ A/cm};$$
$$A_a = (4{,}5 \ldots 6{,}0) \cdot 10^4 \text{ A/m} = 450 \ldots 600 \text{ A/cm}.$$

A_a, aga samuti ka ankru voolutiheduse j_a väärtust piiravad esmajoones jahutustingimused.

Tõepoolest, võimsuskadu ankrumähise juhtmete mahuühikus võrdub ϱj_a^2, kus ϱ on juhtme elektrieritakistus. Teisest küljest on mähisejuhtmete ristlõige ankru ümbermõõdu pikkusühiku kohta

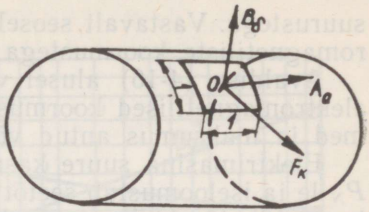
$$S_{a1} = \frac{A_a}{j_a}.$$

Sellepärast on võimsuskaod ankrumähises ankru pinnaühiku kohta avaldatavad:

$$p_{a1} = S_{a1}\varrho j_a^2 = \varrho A_a j_a. \qquad (4\text{-}12)$$

Mida suurem p_{a1}, seda raskemad on ankrumähise jahutustingimused. Väikestes masinates, kus A_a on väike, võetakse j_a suurem,

suurtes aga vastupidi. Suurust j_a võib samuti lugeda üheks põhiliseks elektromagnetiliseks koormuseks. $D_a = 10$ cm puhul keskmine $j_a = 10$ MA/m², $D_a = 300$ cm puhul aga harilikult $j_a = 4{,}0 \ldots 5{,}5$ MA/m².



Joon. 4-3. Keskmise tangentsiaaljõu määramine

Keskmine tangentsiaaljõud. Suurused B_δ ja A_a määravad keskmise tangentsiaaljõu F_k kogu ankrupinna iga ühiku kohta (joon. 4-3):

$$F_k = \alpha_\delta B_\delta A_a. \tag{4-13}$$

Pooluse kattetegur α_δ arvestab siin seda asjaolu, et induktsioon B_δ mõjub poolusejaotuse piires ainult kaare $\alpha_\delta\tau$ ulatuses (vt. § 2-2). Selle tulemusena keskmine elektromagnetiline jõud kogu ankrupinna iga ühiku kohta vastavalt väheneb.

Toome praktikast näitena mõningad ümardatud arvsuurused: $\alpha_\delta = 0{,}75$, $B_\delta = 0{,}8$ T, $A_a = 5 \cdot 10^4$ A/m, $F_k = 0{,}75 \cdot 0{,}8 \cdot 5 \cdot 10^4 = 3 \cdot 10^4$ N/m² $\approx 3 \cdot 10^3$ kG/m² $= 0{,}3$ kG/cm². Saadud F_k suurus iseloomustab elektrimasinates reaalselt saavutatavaid elektromagnetilisi jõude.

Arnoldi masinakonstant. Kui korrutame F_k [vt. valemit (4-13)] ankru pindalaga $\pi D_a l_\delta$ ja seejärel õla pikkusega $D_a/2$, saame elektromagnetilise momendi avaldise:

$$M_{em} = \frac{1}{2} \pi \alpha_\delta D_a^2 l_\delta B_\delta A_a. \tag{4-14}$$

Korrutades M_{em} suurusega $\Omega = 2\pi n$, saame P_{em} sõltuvuse geomeetrilistest põhimõõtmetest, elektromagnetilistest koormustest ja masina pöörlemiskiirusest:

$$P_{em} = \pi^2 \alpha_\delta D_a^2 l_\delta B_\delta A_a n. \tag{4-15}$$

Sama sõltuvuse võime saada, kui avaldisse (4-10) panna E_a valemist (4-2) ja avaldada voog Φ_δ induktsiooni B_δ ning vool I_a voolukatte A_a kaudu [vt. seost (4-11)].

Avaldisest (4-15) määratakse niinimetatud Arnoldi masinakonstant:

$$C_A = \frac{D_a^2 l_\delta n}{P_{em}} = \frac{1}{\pi^2 \alpha_\delta B_\delta A_a}. \tag{4-16}$$

Suurus C_A on võrdeline ankru mahuga elektromagnetilise momendi ühiku kohta, kuna $D_a^2 l_\delta$ ja P_{em}/n on võrdelised nende

suurustega. Vastavalt seosele (4-16) määratakse C_A suurus elektromagnetiliste koormustega B_δ, A_a ja teguriga α_δ.

Avaldise (4-16) alusel võib järeldada, et mida suuremad on elektromagnetilised koormused, seda väiksemad on masina mõõtmed ja maksumus antud võimsuse ja pöörlemiskiiruse puhul.

Elektrimasina suure kasuteguri tõttu on suurus P_{em} lähedane P_N-le ja iseloomustab seetõttu ka nimivõimsust. Avaldistest (4-14) ja (4-16) järeldub, et masina geomeetrilised mõõtmed ei määra vahetult mitte masina võimsust, vaid elektromagnetilise momendi ja antud mõõtmete puhul on võimsus võrdeline pöörlemiskiirusega. Seega etteantud võimsuse puhul on suure pöörlemiskiirusega masinad väiksemad, kergemad ja odavamad.

Kui kasutada mõõtühikuid cm, p/min ja kW, nagu seda tehakse praktilistes arvutusjuhistes, siis tuleb valemis (4-15) vastavate suuruste asemele panna $10^{-2}D_a$ cm, $10^{-2}l_\delta$ cm, $10^{-4}B_\delta$ gauss, 10^2A_a A/cm, $60^{-1}n$ p/min ja korrutada tulemust 10^{-3}-ga. Siis

$$P_{em}=\frac{\pi^2}{60\cdot 10^{11}}\,\alpha_\delta D_a^2\, l_\delta B_\delta A_a n \text{ [kW]},$$

millest

$$C_A=\frac{D_a^2\, l_\delta n}{P_{em}}=\frac{6{,}1\cdot 10^{11}}{\alpha_\delta B_\delta A_a}\,. \tag{4-17}$$

Joon. 4-4 on toodud sõltuvus $C_A=f(P_{em})$. Seda sõltuvust kujutab langev kõver, kuna masina geomeetriliste mõõtmete suurenemisel B_δ ja A_a väärtused vastavalt ülaltoodule suurenevad.

Vahelduvvoolumasinate jaoks saadavad sõltuvused on vaadeldutega sarnased ja erinevad neist ainult numbriliste kordajate poolest.

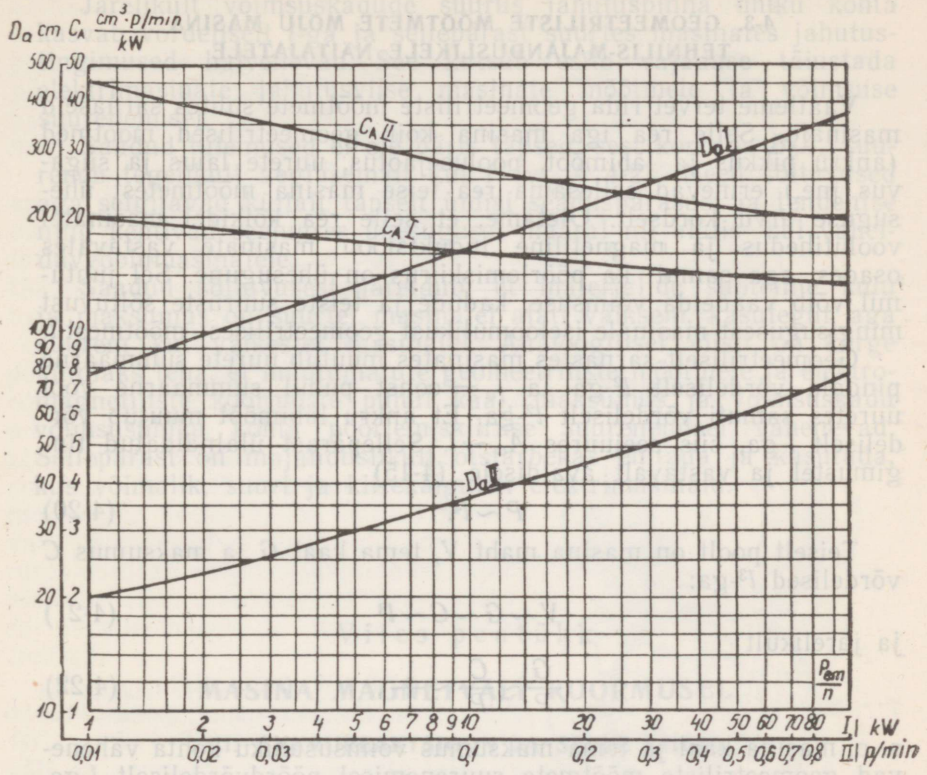
Masina projekteerimisel võib antud P_{em}/n väärtuse järgi kõveralt joon. 4-4 leida C_A ja seejärel

$$D_a^2\, l_\delta=\frac{C_A n}{P_{em}}\,. \tag{4-18}$$

Seos

$$\lambda=\frac{l_\delta}{D_a} \tag{4-19}$$

iseloomustab masina tehnilis-majanduslikke näitajaid. λ suurenemisel masina mähise mitteaktiivsete lauposade suhteline suurus väheneb, kuid jahutustingimused halvenevad ja seetõttu on hädavajalik vähendada B_δ, A_a jt. väärtusi. Seoses sellega on olemas



Joon. 4-4. Arnoldi masinakonstandi C_A ja ankru läbimõõdu D_a sõltuvus suurusest P_{em}/n_N alalisvoolumasina puhul

niisugused λ optimaalsed väärtused, mille puhul saadakse kaalu, maksumuse ja tehnilis-majanduslike näitajate poolest parim masina variant. λ optimaalsed väärtused leitakse tehnilis-majanduslike arvutuste ja katseandmete läbitöötamise tulemusena.

Kui λ optimaalne väärtus on teada, siis võib seoste (4-18) ja (4-19) järgi määrata eraldi l_δ ja D_a. Joon. 4-4 on toodud λ optimaalsetele väärtustele vastav D_a kõver. Vastavalt avaldisele (4-18) võib teadaolevate C_A ja D_a järgi leida ka l_δ.

Analoogiliselt eeltooduga määratakse põhimõõtmed ka vahelduvvoolumasinate projekteerimisel.

4-3. GEOMEETRILISTE MÕÕTMETE MÕJU MASINA TEHNILIS-MAJANDUSLIKELE NÄITAJATELE

Vaatleme tervet rida geomeetriliste mõõtmete suhtes sarnaseid masinaid. Selle rea iga masina kõik geomeetrilised mõõtmed (ankru pikkus ja läbimõõt, poolusejaotus, uurete laius ja sügavus jne.) erinevad sellesama rea teise masina mõõtmetest ühesuguse arvu kordselt. Oletame, et selle rea kõikidel masinatel voolutihedus ja magnetiline induktsioon masinate vastavates osades, aga samuti ka pöörlemiskiirus on ühesugune. Sel juhtumil võib vaadelda võimsuse, kadude ja teiste suuruste sõltuvust mingisugusest masinale iseloomulikust geomeetrilisest mõõtmest l.

Geomeetriliselt sarnastes masinates muutub uurete summaarne pindala võrdeliselt l^2-ga ja $j_a = \text{const}$ puhul summaarne vool uuretes samuti võrdeliselt l^2-ga. Et ankru läbimõõt muutub võrdeliselt l-ga, siis seejuures $A_a \sim l$. Sellepärast ülalnäidatud tingimustel ja vastavalt avaldisele (4-15)

$$P \sim l^4. \tag{4-20}$$

Teiselt poolt on masina maht V, tema kaal G ja maksumus C võrdelised l^3-ga:

$$V \sim G \sim C \sim l^3 \tag{4-21}$$

ja järelikult

$$\frac{G}{P} \sim \frac{C}{P} \sim \frac{1}{l}, \tag{4-22}$$

s. o. masina kaal ja tema maksumus võimsusühiku kohta vähenevad geomeetriliste mõõtmete suurenemisel pöördvõrdeliselt l-ga.

Suuruste $B = \text{const}$, $j = \text{const}$ ja $f = \text{const}$ korral on elektriline ja magnetiline kadu masina üksikosades mahuühiku kohta samuti konstantne. Järelikult need kaod suurenevad võrdeliselt l^3-ga. See on ligikaudu õige ka mehaanilise võimsuskao kohta. Sellepärast summaarne võimsuskadu

$$p_\Sigma \sim l^3 \tag{4-23}$$

ja

$$\frac{p_\Sigma}{P} \sim \frac{1}{l}. \tag{4-24}$$

Seega võimsuskaod võimsusühiku kohta vähenevad l suurenemisel, masina kasutegur aga suureneb.

Jahutuspindade suurus S_{jp}, mille kaudu eemaldatakse soojuse näol eralduv võimsuskadu p_Σ, kasvab võrdeliselt l^2-ga ja sellepärast

$$\frac{p_\Sigma}{S_{jp}} \sim l. \tag{4-25}$$

Järelikult võimsuskadude suurus jahutuspinna ühiku kohta kasvab võrdeliselt l-ga ja sellepärast suurtes masinates jahutustingimused halvenevad. See kutsub esile vajaduse täiustada elektrimasinate jahutusviise masinate mõõtmete ja võimsuse suurenemisel.

Saadud tulemused ei ole päris täpsed, sest korrutis $B_\delta A_a$ suureneb tegelikult aeglasemalt kui l (vt. § 4-2). Need sõltuvused aga selgitavad küllalt täpselt üldisi seaduspärasusi ja tendentse ning kehtivad seejuures ühesugusel määral nii alalis- kui vahelduvvoolumasinatele.

Saadud sõltuvusest järeldub, et materjalide suhteline kulu ja maksumus on suurtel masinatel alati väiksem, kasutegur aga suurem kui väikestel masinatel. Analoogilisel viisil on kerge kindlaks teha, et muutumatute geomeetriliste mõõtmete ja elektromagnetiliste koormuste puhul kaal, maksumus ja võimsuskadu võimsusühiku kohta pöörlemiskiiruse suurenemisel vähenevad. Sellepärast on majanduslikult otstarbekas ehitada ja kasutada, kus võimalik, suuri ja kiirekäigulisi elektrimasinaid.

Viies peatükk

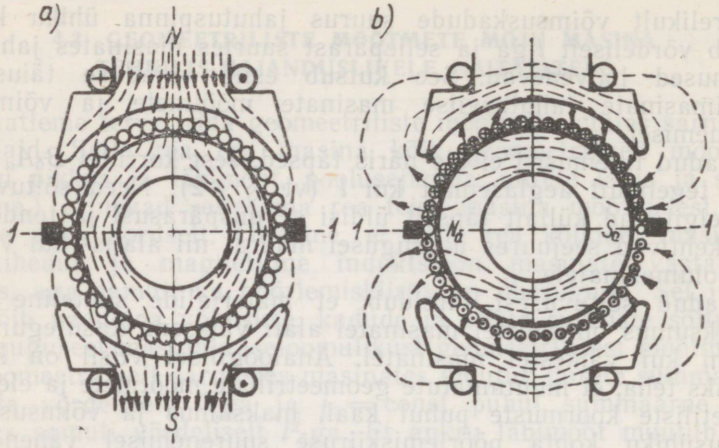
MASINA MAGNETVÄLI KOORMUSEL

5-1. ANKRUREAKTSIOON JA SELLE LIIGID

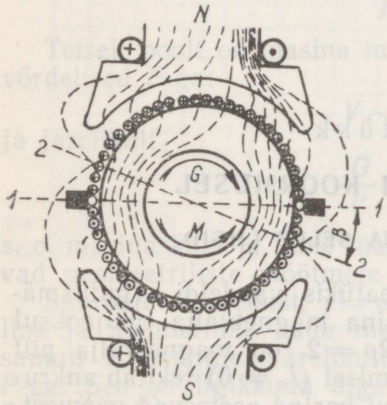
Ankrureaktsiooni nähe. Teises peatükis vaadeldi ergutusmähise poolt tekitatavat alalisvoolumasina magnetvälja tühijooksul ($I_a = 0$). Selle juhtumi jaoks, kui $2p = 2$, on magnetvälja pilt kujutatud joon. 5-1, *a*. Masina koormamisel ($I_a \neq 0$) tekitab ankrumähis oma magnetvälja, mille pilt, kui harjad asetsevad geomeetrilisel neutraalil ja ergutus puudub ($i_e = 0$), on kujutatud joon. 5-1, *b*. Nagu jooniselt 5-1, *b* nähtub, on ankruvälja telgjoon suunatud harjade *1-1* telgjoone sihis. Masinas tekkivat elektromagnetilist momenti võib vaadelda kui ankru-, poolustega $N_a - S_a$ (joon. 5-1, *b*), ja ergutusvälja, poolustega $N - S$ (joon. 5-1, *a*), koosmõju tulemust.

Ankru- ja ergutusvälja üheaegsel esinemisel moodustub resulteeriv väli, mille pilt on jooniste 5-1, *a* ja *b* alusel näidatud joon. 5-2. Pooluste polaarsus ja ankruvoolu suund sellel joonisel vastavad juhtumile, kui ankur pöörleb generaatorirežiimis (G) päripäeva ja mootorirežiimis (M) vastupäeva.

Jooniselt 5-2 on näha, et ankruvälja mõjul muutub masina



Joon. 5-1. Ergutusväli (*a*) ja ankruväli (*b*)



Joon. 5-2. Resulteeriv magnetväli harjade paiknemisel geomeetrilisel neutraalil

resulteeriv väli. Seda nähtust nimetataksegi ankrureaktsiooniks.

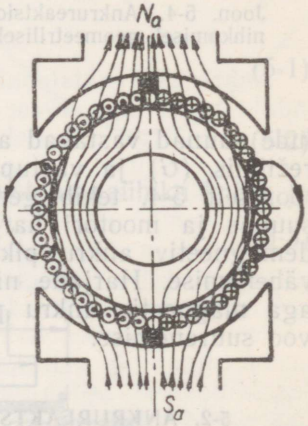
Ankru ristreaktsioon. Kui harjad asetsevad geomeetrilisel neutraaljoonel *1-1* (joon. 5-1, *b*), siis ankruvälja suund on risti pooluste teljega ja seda nimetatakse ankrureaktsiooni ristväljaks.

Nagu selgub joon. 5-2, kutsub ankru ristreaktsioon esile välja nõrgenemise pooluse ühe ja tugevnemise teise serva all. Selle tagajärjel pöördub resulteeriva välja telg generaatoris ankru pöörlemise ja mootoris vastupidises suunas. Kui tinglikult vaa-

delda magnetilise induktsiooni jooni elastsete niitidena, nagu seda vahel tehakse, siis võib elektromagnetilise momendi teket pidada nende niitide elastsusjõudude mõju tulemuseks. Niidid püüavad kokku tõmbuda ja ankrut pöörata. Jooniselt 5-2 on näha, et vaadeldava nähtuse sellisel selgitamisel ühtib momendi mõju suund tegelikuga nii generaatori- kui ka mootorirežiimis.

Ankru ristreaktsiooni mõjul pöördub magnetiline neutraal ankru pinnal geomeetriliselt neutraalilt *1-1* (millel $B = 0$) mingi nurga β võrra kõrvale asendisse *2-2* (joon. 5-2). Viimast nimetatakse füüsikaliseks neutraaliks. Generaatoris on füüsikaline neutraal pööratud ankru pöörlemise suunas ja mootoris vastupidises suunas.

Jooniselt 5-1, *b* selgub, et ankru pöörlemisel indutseerib ankrureaktsiooni ristväli juhtmetes, mis asetsevad pooluste teljest vasakul, ühesuunalise ja pooluste teljest paremal pool asetsevates juhtmetes teisesuunalise elektromotoorjõu. Seetõttu, kui harjad asetsevad geomeetrilisel neutraalil, on ankrureaktsiooni väljast põhjustatud summaarne elektromotoorjõud igas mähise paralleelharus ja harjadel võrdne nulliga.

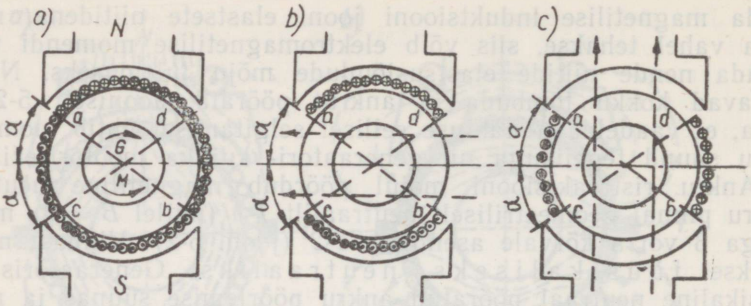


Joon. 5-3. Ankrureaktsiooni pikiväli

Ankru pikireaktsioon. Kui harjad on nihutatud geomeetriliselt neutraalilt $90°_{el.}$ võrra (joon. 5-3), siis ankruväli on suunatud piki pooluste telge ja seda nimetatakse sel juhul ankrureaktsiooni pikiväljaks. See väli, sõltuvalt voolu suunast ankrumähises, mõjub pooluste väljale magneetivalt või demagneetivalt. Pikivälja ja ergutusvälja koosmõjul elektromagnetilist momenti ei teki. Ankru pöörlemisel harjadel indutseeritav elektromotoorjõud võrdub ka sel juhtumil nulliga.

Ankrureaktsiooni üldjuhtum. Tavaliselt asetatakse harjad geomeetrilisele neutraalile. Kuid harjade ebatäpse paigaldamise tõttu või nende teadliku nihutamise tagajärjel võivad nad üldjuhul olla mingi nurga α võrra geomeetriliselt neutraalilt nihutatud (joon. 5-4, *a*). Sealjuures $0 < \alpha < 90°$ el. Sellisel üldjuhul võib ankru pinna kahekordse poolusejaotuse ulatuses jagada kaheks sümmeetriliste sektorite paariks: 1) *ad* ja *cb*, 2) *ac* ja *db*. Voolud esimeses sektorite paaris (joon. 5-4, *b*) tekitavad ankrureaktsiooni ristvälja, teises paaris (joon. 5-4, *c*) aga pikivälja.

Joonisel 5-4, *a* näidatud pooluste polaarsused ja ankruvoo-



Joon. 5-4. Ankrureaktsiooni magneetimisergutuse jaotamine harjade nihkumisel geomeetriliselt neutraalilt (*a*) rist- (*b*) ja pikikomponendiks (*c*)

lude suunad vastavad ankru päripäeva pöörlemisele generaatorirežiimis (*G*) ja vastupäeva mootorirežiimis (*M*). Nagu selgub jooniselt 5-4, tekib generaatori harjade nihutamisel pöörlemissuunas ja mootori harjade nihutamisel vastu pöörlemissuunda demagneetiv ankru pikireaktsioon, mis põhjustab pooluste voo vähenemise. Harjade nihutamisel vastupidistes suundades tekib aga magneetiv ankru pikireaktsioon, mis kutsub esile pooluste voo suurenemise.

5-2. ANKRUREAKTSIOONI MÕJU MASINA MAGNETVOOLE

Ankru ristreaktsiooni magneetimisergutus. Käsitleme küsimust, kuidas kvantitatiivselt arvestada ankrureaktsiooni mõju masina magnetvoole. Seejuures teeme järgmised lihtsustused: 1) ankur on uureteta, kuid uurete mõju õhupilu magnetilisele takistusele võetakse arvesse ekvivalentse õhupilu suurusega $\delta' = k_\delta \delta$ (vt. § 2-2); 2) eeldame, et ankru juhtmed on selle ümbermõõdul ühtlaselt jaotatud. Seejuures saadavad tulemused on praktiliste arvutuste jaoks siiski küllaldase täpsusega.

Joonisel 5-5, *a* on kujutatud masina laotatud skeem kahe poolusejaotuse ulatuses, kusjuures harjad asetsevad geomeetrilisel neutraalil. Samuti on joonisel näidatud tekkiva ankrureaktsiooni ristvälja iseloom. Suurusi, mis kuuluvad ankru ristreaktsiooni juurde, tähistame edaspidi indeksitega *aq*, pikireaktsiooni — *ad*.

Rakendame koguvooluseadust

$$\oint \mathbf{H}\, d\mathbf{l} = \Sigma i$$

magnetilise induktsiooni joone kohta, mis läbib õhupilu poolusekinga all kaugusel x pooluse telgjoonest. Eeldame, et magnetahela terasosades $\mu_t = \infty$, seetõttu on seal ka $H = 0$. Samuti võib eeldada, et piki induktsioonijoont õhupilus $H_{aqx} = \text{const}$. Siis võime eespool toodud integraalseose asemel kirjutada

$$2H_{aqx}\delta' = 2A_a x,$$

kus A_a — ankru voolukate.

Järelikult

$$B_{aqx} = \mu_0 H_{aqx} = \frac{\mu_0}{\delta'} A_a x.$$

Seda seost võib esitada ka kujul

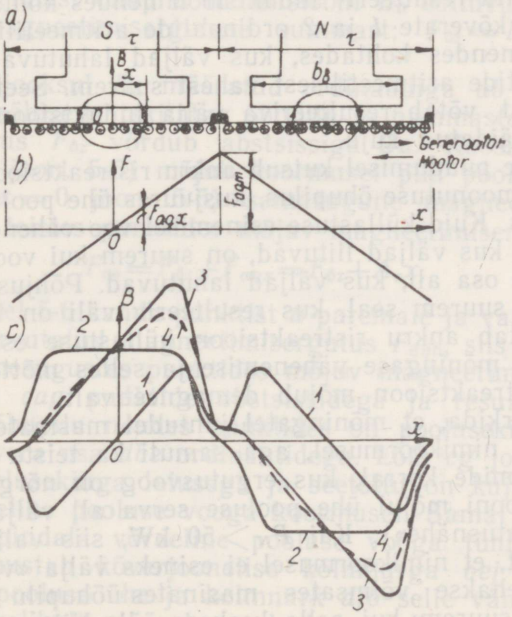
$$B_{aqx} = \lambda_x F_{aqx}, \tag{5-1}$$

kus

$$\lambda_x = \frac{\mu_0}{\delta'} \tag{5-2}$$

kujutab endast õhupilu magnetilist juhtivust pinnaühiku kohta ja

$$F_{aqx} = A_a x \tag{5-3}$$



Joon. 5-5. Masina õhupilu magnetvälja ankru ristreaktsiooni esinemisel

on ankru ristreaktsiooni magneetimisergutus punktis koordinaadiga x.

Seose (5-3) alusel võib sõltuvuse $F_{aqx} = f(x)$ esitada graafiliselt, kusjuures tuleb arvestada, et voolu suuna muutumisel ankru juhtmetes A_a muudab märki (joon. 5-5, *b*). Maksimaalse väärtuse saavutab F_{aqx} geomeetrilisel neutraalil:

$$F_{aqm} = \frac{A_a \tau}{2}. \qquad (5\text{-}4)$$

Poolusekinga serva kohal

$$F_{aqb} = \frac{A_a b_\delta}{2}. \qquad (5\text{-}5)$$

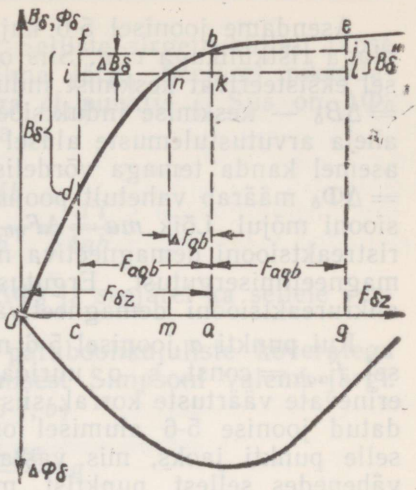
Ankru ristreaktsiooni demagneetiv mõju. Kui $\lambda_x = \text{const}$, siis induktsiooni B_{aqx} kõver kordab F_{aqx} kõverat. Poolustevahelises ruumis λ_x aga väheneb ja $B_{aqx} = f(x)$ on sellise kujuga nagu kõver *1* joonisel 5-5, *c*. Samal joonisel olev kõver *2* kujutab ergutusvälja induktsiooni jaotust õhupilus. Resulteeriva välja induktsioonikõver *3* küllastumata magnetahela korral saadakse kõverate *1* ja *2* ordinaatide liitmisel. Tegelikult on magnetahela küllastuse tõttu resulteeriv induktsioon nendes kohtades, kus väljad liituvad, kõverate *1* ja *2* ordinaatide aritmeetilisest summast väiksem ja nendes kohtades, kus väljad lahutuvad, kõverate *1* ja *2* ordinaatide aritmeetilisest vahest suurem. Seetõttu, arvestades küllastust, võtab resulteeriva välja induktsioonikõver kriipsjoonega *4* näidatud kuju.

Küllastuse puudumisel kutsub ankru ristreaktsioon esile ainult väljakõvera moonutuse õhupilus, kusjuures ühe pooluse voog jääb muutumatuks. Kuid küllastuse esinemisel voo vähenemine pooluse selle osa all, kus väljad liituvad, on suurem kui voo suurenemine pooluse selle osa all, kus väljad lahutuvad. Põhjus on selles, et küllastus on suurem seal, kus resulteeriv väli on tugevam. Seetõttu põhjustab ankru ristreaktsioon küllastuse esinemisel alati pooluste voo mõningase vähenemise ja selles mõttes räägitakse, et ankru ristreaktsioon mõjub demagneetivalt.

Tuleb märkida, et mõningatel juhtudel masinates võimsusega 30 ... 40 kW nimikoormusel, aga samuti ka teiste masinate selliste tööreţiimide korral, kus ergutusvoog on nõrgendatud, võib ankrureaktsiooni mõjul ühe pooluse serva all välja suund muutuda («vääratusnähe»). Kui $P_N > 50$ kW, siis valitakse õhupilu laius selliselt, et nimikoormusel ei esineks välja «vääratust». Sel eesmärgil tehakse võimsates masinates õhupilu poolusekinga servade all suurem kui selle keskosa all. Niisuguse konstruktsiooni puhul paranevad ka liitmähise kommutatsioonitingimused, sest ergutusvälja induktsiooni jaotus läheneb siinuselisele ja

vähenevad välja kõrgematest harmoonilistest põhjustatud elektromotoorjõud, mis võivad liitsilmusmähiste korral kommutaatori naaberlestade vahel põhjustada pingete suuri erinevusi.

Ankru ristreaktsiooni mõju kvantitatiivne analüüs. Ankrusüdamiku ja poolusekingade küllastus ei ole suur ja seetõttu on ankru ristreaktsiooni mõju arvessevõtmiseks küllaldane arvestada ainult hammaste küllastust. Hammaste küllastuse arvessevõtmiseks konstrueeritakse tühijooksul oleva magnetahela arvutuse tulemuste alusel (vt. ptk. 2) masina nn. magnetiline üleminekukarakteristik (joon. 5-6), mis kujutab endast õhupilu induktsiooni B_δ sõltuvust õhupilu ja hammaste magneetimisergutuse summast: $F_{\delta z} = F_\delta + F_z$ tühijooksul.



Joon. 5-6. Ankru ristreaktsiooni demagneetiva mõju määramine

Olgu tühijooksul B_δ määratud ordinaadiga *ab* joonisel 5-6. Siis ergutusmähisega tekitatav õhupilu ja hammaste tsooni magneetimisergutus $F_{\delta z}$ võrdub abstsissiga *Oa*. Kooskõlas eespool tooduga (vt. joon. 5-5) mõjub koormusel piki pooluse telgjoont (koordinaat $x = 0$ joon. 5-5) samasugune magneetimisergutus, kuid õhupilu teistes punktides mõjuv magneetimisergutus

$$F_{ea} = F_{\delta z} + F_{aqx} = F_{\delta z} + A_a x. \qquad (5\text{-}6)$$

Kui joonisel 5-6 kanda punktist *a* paremale ja vasakule valemi (5-5) järgi arvutatud magneetimisergutus F_{aqb}, siis poolusekinga ulatuses mitmesugustes punktides mõjuv magneetimisergutus F_{ea} võrdub lõigu *cag* punktide abstsissidega ja resulteeriva välja induktsioon õhupilu nendes punktides on poolusekinga ulatuses määratud kõvera osa *dbe* ordinaatidega. Lõik *cg* joonisel 5-6 on võrdeline poolusekinga laiusega ja seetõttu on kujundi *cdbegac* pindala võrdeline pooluse vooga koormusel. Samal ajal on ristküliku *cfjg* pindala võrdeline pooluse vooga tühijooksul. Seetõttu iseloomustab kõverjoonelise kolmnurga *bej* pindala voo suurenemist pooluse ühe ja kolmnurk *dfb* selle vähenemist teise poole all. Järelikult määrab nende kolmnurkade pindalade vahe ergutusvoo vähenemise ankru ristreaktsiooni toimel.

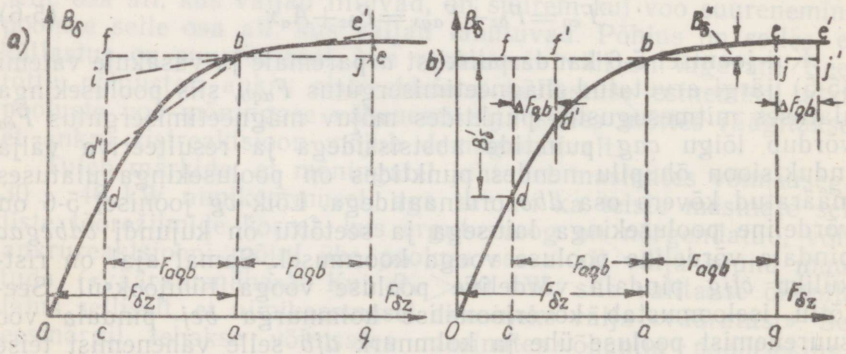
Asendame joonisel 5-6 kujundi *cdbegac* temaga võrdse pindalaga ristkülikuga *cilg*. Siis ordinaat *ak* kujutab endast koormusel eksisteerivat keskmist induktsiooni õhupilus $B_{\delta N}$ ja lõik $bk = \Delta B_\delta$ — keskmise induktsiooni vähenemist koormusel. Magnetahela arvutustulemuste alusel tühijooksul võib ordinaatteljele B_δ asemel kanda temaga võrdelise õhupilu voo Φ_δ. Siis lõik $bk = \Delta\Phi_\delta$ määrab vahetult pooluse voo vähenemise ankru ristreaktsiooni mõjul. Lõik $ma = \Delta F_{qb}$ joonisel 5-6 kujutab endast ankru ristreaktsiooni demagneetiva mõjuga ekvivalentset ergutusmähise magneetimisergutust. Ergutuse vastava suurendamisega saab ankrureaktsiooni demagneetivat mõju kompenseerida.

Kui punkti *a* joonisel 5-6 nihutada piki abstsisstelge tingimusel $F_{aqb} = \text{const}$, s. o. uurida ankrureaktsiooni mõju küllastuse erinevate väärtuste korral, siis suurus $\Delta\Phi_\delta$ muutub nii, nagu näidatud joonise 5-6 alumisel osal. Maksimaalne on $\Delta\Phi_\delta$ suurus selle punkti jaoks, mis vastab üleminekukarakteristiku põlvele, vähenedes sellest punktist mõlemale poole minnes. Järelikult ankru ristreaktsiooni mõju, kui $I_a = \text{const}$, sõltub tööpunkti asukohast masina magnetilisel karakteristikul.

Muutumatu ergutuse korral on ΔF_{gb} ja $\Delta\Phi_\delta$ sõltuvus I_a-st keeruline funktsioon. Kuid I_a väikestel muutustel nimikoormuse piirkonnas võib ilma erilise veata lugeda, et $\Delta F_{gb} \sim I_a$.

Kõverjooneliste kolmnurkade *dfb* ja *bej* (joonisel 5-6) pindalade arvutamine on vaevarikas. Seetõttu on mitmete autorite poolt esitatud $\Delta\Phi_\delta$ ja ΔF_{qb} määramiseks mugavamad meetodid.

V. T. Kasjanovi meetod näeb ette sirgete *d'b* ja *be'* tõmbamise (joon. 5-7) sel viisil, et kolmnurkade *dfb* ja *d'fb* ning *bej* ja *be'j*



Joon. 5-7. Ankru ristreaktsiooni demagneetiva mõju määramine: *a* — V. Kasjanovi meetodil; *b* — G. Petrovi meetodil

pindalad oleksid vastavalt võrdsed. Selliste sirgete küllalt täpse asendi määramine on võimalik silma järgi. Seejärel pikendatakse sirget *be'* lõikumiseni sirgega *cf* punktis *i*. Siis on $\Delta\Phi_\delta$ määratud kolmnurga *d'ib* pindalaga ja

$$\frac{\Delta\Phi_\delta}{\Phi_\delta}=\frac{\frac{1}{2}d'i\times fb}{2ab\times fb}=\frac{d'i}{4ab}.$$

Viimasest valemist on kerge leida $\Delta\Phi_\delta$ ja seejärel ka sellele vastav suurus ΔF_{qb}.

G. N. Petrovi meetod lähtub paraboolikujuliste kõveratega piiratud kujundite pindala määramisest Simpsoni valemi järgi. Seejuures voog koormusel (joon. 5-7, *b*)

$$\Phi_\delta=\frac{cd+4ab+ge}{6}cg$$

ja voo vähenemine

$$\Delta\Phi_\delta=\left(ab-\frac{cd+4ab+ge}{6}\right)cg=\frac{(ab-cd)-(ge-ab)}{6}cg=$$

$$=\frac{B'_\delta-B''_\delta}{6}A_a b_\delta.$$

Teisest küljest, kui ergutust suurendada suuruse ΔF_{qb} võrra (joon. 5-7, *b*), et sel viisil kompenseerida ankrureaktsiooni mõju, siis see vastab voo suurenemisele kõverjooneliste nelinurkade pindalade *dff'd'* ja *jee'j'* summa võrra, mis ligikaudu võrdub

$$\Delta\Phi_\delta=fd\,\Delta F_{qb}+ej\,\Delta F_{qb}=(B'_\delta+B''_\delta)\Delta F_{qb}.$$

Võrrutades kaks avaldist $\Delta\Phi_\delta$ jaoks, saame

$$\Delta F_{qb}=\frac{1}{6}\cdot\frac{B'_\delta-B''_\delta}{B'_\delta+B''_\delta}A_a b_\delta. \qquad (5\text{-}7)$$

Täpsemaid tulemusi võib saada, kui alguses valemist (5-7) arvutada ΔF_{qb}, asetada see väärtus joonisel 5-7, *b* punktidest *c* ja *g* paremale ja seejärel arvutada uuesti ΔF_{qb} väärtus, asendades avaldises (5-7) B'_δ ja B''_δ poolsummadega $(df+d'f'):2$ ja $(je+j'e'):2$.

Ankrureaktsiooni arvessevõtmine harjade nihutamisel. Harjade nihutamine geomeetriliselt neutraalilt, mõõdetuna kaare

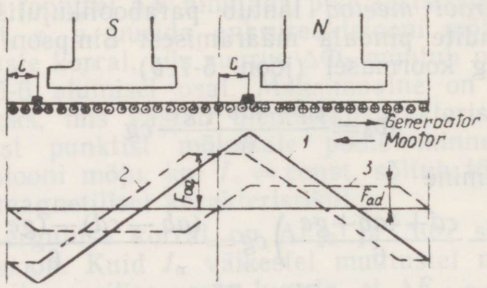
$$c=\frac{\alpha D_a}{2}$$

pikkusega piki ankru ümbermõõtu (vt. joon. 5-4), on tavaliselt väike, nii et $\tau - 2c > b_\delta$. Seejuures ankru pikireaktsiooni magneetimisergutus ühe pooluse kohta

$$F_{ad} = cA_a. \tag{5-8}$$

Sõltuvalt F_{ad} suunast see kas liitub vahetult ergutusmähise magneetimisergutusega või lahutub sellest. Tulemusena saadav pikiteljeline magneetimisergutus:

$$F_d = F_e \pm F_{ad}. \tag{5-9}$$



Joon. 5-8. Ankrureaktsiooni magneetimisergutus harjade nihutamisel geomeetriliselt neutraalilt

Sel juhtumil on küllaldane ankru pikireaktsiooni kompenseerimiseks suurendada või vähendada F_e suuruse F_{ad} võrra sõltuvalt sellest, kas F_{ad} mõju on demagneetiv või magneetiv. Sellise meetodi juures ei arvestata viga, mis tekib sellest, et pooluste puistevoog luuakse mitte magneetimisergutusega F_d, vaid magneetimisergutusega F_e. Kuid see viga on väike.

Ankru ristreaktsiooni demagneetiva mõju arvessevõtmine vaadeldaval juhtumil toimub samuti kui juhtumil $c = 0$. Ankru magneetimisergutuse diagramm selle juhtumi kohta on näidatud joonisel 5-8, kus kõverad *1*, *2* ja *3* kujutavad endast vastavalt ankrureaktsiooni summaarset magneetimisergutust ning selle rist- ja pikikomponenti. Kui $\tau - 2c < b_\delta$, siis on ankrureaktsiooni mõju arvessevõtmine keerulisem. Selline juhtum normaalsetes masinates praktikas ei esine ja seetõttu seda siin ei käsitleta.

5-3. PINGED KOMMUTAATORILESTADE VAHEL JA KOMPENSATSIOONIMÄHIS

Pinged kommutaatorilestade vahel. Teatud tingimustel võib ankrureaktsioon põhjustada mittesoovitavate tagajärgedega nähtusi. Selliste nähtuste hulka kuulub ennekõike pinge suurenemine kommutaatorilestade vahel välja moonutuse tõttu ankru ristreaktsiooni mõjul.

Tühijooksul on naaberlestadevaheline maksimaalne pinge näiteks lihtsilmusmähise juhtumil avaldatav

$$u_k = 2B_\delta w_s l_\delta v_a,$$

kus w_s on sektsiooni keerdude arv.

Koormusel saavutab maksimaalne induktsioon ühe pooluse serva all mingi väärtuse B_{max} (vt. joon. 5-5, *c*) ja

$$u_{k\,max} = 2B_{\delta\,max} w_s l_\delta v_a.$$

Järelikult

$$\frac{u_{k\,max}}{u_k} = \frac{B_{\delta\,max}}{B_\delta}. \tag{5.10}$$

Keskmine pinge kommutaatori naaberlestade vahel

$$u_{kk} = 2B_{\delta k} w_s l_\delta v_a = 2\alpha_\delta B_\delta w_s l_\delta v_a,$$

ning seetõttu

$$\frac{u_{k\,max}}{u_{kk}} = \frac{B_{\delta\,max}}{\alpha_\delta B_\delta}. \tag{5-11}$$

Alalisvoolumasinate arvutamisel valitakse kommutaatorilestade arv K tingimusest, et kommutaatori naaberlestade vaheline keskmine pinge

$$u_{kk} = \frac{2pU_N}{K} \tag{5-12}$$

ei ületaks 18 ... 22 V.

Kooskõlas avaldistega (5-11) ja (5-12)

$$u_{k\,max} = \frac{2pU_N}{K} \cdot \frac{B_{\delta\,max}}{\alpha_\delta B_\delta}. \tag{5-13}$$

Lubatav suurim $u_{k\,max}$ väärtus on piiratud elektrikaare tekkimise võimalusega naaberlestade vahel. Seepärast nõutakse tavaliselt, et $u_{k\,max} \leqslant 30 \ldots 50$ V.

Liigne $u_{k\,max}$ suurenemine võib tekkida $B_{\delta\,max}$ suurenemisel ankrureaktsiooni mõjul (näiteks masina märgataval ülekoormu-

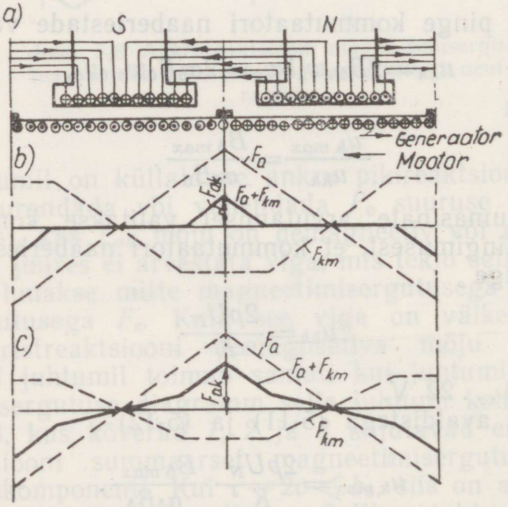
sel) või B_δ vähenemise tagajärjel (kiiruse suure reguleerimise ulatusega mootorites, vt. ptk. 10).

Väljakõvera moonutus on seda suurem, mida väiksem on õhupilu. Selle suurus valitakse tavaliselt niisugune, et induktsioon nimirežiimil pooluse serva all $\left(x=\frac{b_\delta}{2}\right)$ ei muudaks oma suunda (välja «vääratus»). Vastavalt avaldisele (5-6) on selleks vaja, et

$$F_{\delta z} \geqslant \frac{1}{2} A_a b_\delta.$$

Kui $D_a = 10 \ldots 50$ cm, siis tavaliselt $\delta \approx 0{,}009 D_a$.

Kompensatsioonimähis. Efektiivseks abinõuks väljakõvera moonutuse ja kommutaatorilestadevahelise pinge suurenemise vastu on kompensatsioonimähise kasutamine. Kompensatsioonimähis on paigutatud poolusekingadesse stantsitud uuretesse (joon. 5-9, *a*) nii, et voolu suund selles mähises ja ankrumähises iga poolusekinga ulatuses oleks vastupidine. Kui mõlema mähise voolukatted on võrdsed ($A_a = A_k$), siis likvideeritakse ankru rist-



Joon. 5-9. Kompensatsioonimähise paigutus (*a*); ankru (F_a), kompensatsioonimähise (F_{km}) ja nende resulteeriva magneetimisergutuse ($F_a + F_{km}$) diagrammid ankru ning kompensatsioonimähise voolukatte võrdsuse (*b*) ja mittevõrdsuse (*c*) korral

reaktsiooni mõju poolusekinga ulatuses täielikult (joon. 5-9, *b*). Nende mähiste jadaühendus tagab sellise kompensatsiooni igasugustel koormustel. Kuid tingimuse $A_a = A_k$ täpne täitmine ei ole alati võimalik. Sellistel juhtudel säilib poolusekinga ulatusel ankru ristreaktsiooni mõningane mõju ja ankrureaktsiooni magneetimisergutuse maksimaalväärtus neutraaltsoonis

$$F_{ak} = \frac{A_a \tau}{2} - \frac{A_k b_\delta}{2} \qquad (5\text{-}14)$$

suureneb samuti (joon. 5-9, *b*).

Kompensatsioonimähise olemasolul võib õhupilu suuruse võtta minimaalselt lubatava, lähtudes mehaanilistest tingimustest.

Kompensatsioonimähist kasutatakse tavaliselt võimsates ja kiirekäigulistes masinates, kui $U_N > 400 \ldots 450$ V, $P_N/2p > 80 \ldots 100$ kW, masin allub ülekoormusele üle 20% ja kommutatsioon on raskendatud (reaktiiv-elektromotoorjõud $e_r > 5 \ldots 7$ V — vt. § 6-4 ja 6-5).

Kuues peatükk

KOMMUTATSIOON

6-1. HARIKONTAKTI OLEMUS

Harikontakti juhtivus. Nagu juba selgus (vt. § 3-3), nimetatakse kommutatsiooniks ankrumähise sektsioonide ühest rööpharust teise ümberlülitamise protsessi koos voolu suuna muutmisega neis. Kommuteerimise ajal on sektsioonid lühistatud harjadega, mille kaudu antakse vool ankrumähisest välisahelasse või vastupidi. Nähtused harikontaktis, s. t. harjade ja kommutaatorilestade vahel avaldavad suurt mõju kommutatsioonile ja seega ka kogu masina tööle.

Voolu kulgemine harjalt kommutaatorile ja vastupidi võib toimuda järgmiselt: 1) vahetu mehaanilise puute kaudu harja ja kommutaatori vahel, 2) vase- ja grafiiditolmu peenimate osade kaudu ja 3) ioniseeritud õhuvahemike kaudu harja ja kommutaatori vahel. Sellele vastavalt räägitakse: 1) vahetu puute, 2) tolmu kaudu puute ja 3) ioonjuhtivustsoonist.

Mikroreljeefi ebatasasuse tõttu toimub vahetu mehaaniline puude (harja kokkupuutumine kommutaatorilestadega) ainult üksikuis punktides. Voolutihedus neis punktides on mitmeid tuhandeid ampreid ruutmillimeetri kohta. Punktkontaktid ei ole püsivad ebatasasuste kulumise ja purunemise tõttu kommutaatori pöörle-

mise tagajärjel, kusjuures iga üksiku punktkontakti eksisteerimisaeg on küllalt väike.

Harjade ja kommutaatori kulumise tõttu on kontaktkihis alati külluses peenikesi tolmukübemeid. Seepärast toimub voolu ülekanne osaliselt nende tolmukübemete kaudu. Voolutihedused on seejuures samuti suured, kuid iga kontakti kestus kommutaatori liikumise ja tolmukübemete põlemise tõttu ei ole suur.

Vahetu ja tolmu kaudu puute punktid hakkavad suurte voolutiheduste tõttu punaselt ja koguni valgelt hõõguma. Punasel hõõgusel kiirgavad vask ja anoodselt polariseeritud harjad ioone. Valgel hõõgusel toimub elektronide termiline emissioon katoodselt polariseeritud harjadest ja kommutaatorilestadest. Emiteeruvad elektronid ioniseerivad omakorda õhu kontaktkihis. Selle tulemusena tekitatakse voolu ioonjuhtivus. Ioonjuhtivustsoonis tekivad harja all samuti nõrgad säde- ja kaarlahendused, mis esinevad ka harjade servades sektsioonide lühistamisel ja lahutamisel.

Vaadeldud ebaühtlased juhtivustsoonid ei ole mõõtmetelt suured, vahelduvad üksteisega ja nihkuvad harja puutepinda mööda. Ioonjuhtivus domineerib harja all suurtel voolutihedustel ($j_A > > 5 \cdot 10^4$ A/m^2).

Säde- ja kaarlahendus avaldavad harja ja kommutaatori materjalile intensiivset termilist toimet. Katood purustatakse termiliselt ja elektroodi aine kandub katoodilt anoodile. Sellise elektroerosiooni tulemusena toimub materjali ülekandumine ja elektroodide kulumine. Et kõrged temperatuurid tekivad ainult üksikutes punktides, siis harjad ning kommutaatorilestad tervikuna kõrgema temperatuurini ei kuumene.

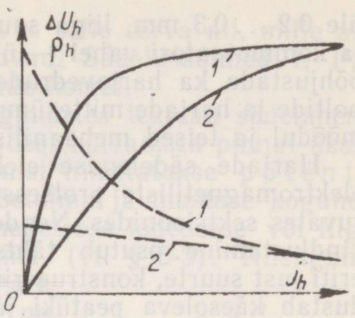
Elektrolüüs. Õhus on alati niiskust ning kõik esemed on kaetud väga õhukese niiskuskihiga, millel on kindel happelisuse aste, tingituna õhus sisalduvaist mitmesuguseist oksiididest. Seepärast tekib voolu kulgemisel läbi harikontaktkihi elektrolüüsi nähtus. Elektrolüüsi tulemusena moodustub kommutaatoril mitmesuguse värviga vaskoksiidide läikiv kiht (roosa, pruun, violetne, terassinine), nn. p o l i t u u r, mis suurendab harikontakti üleminekutakistust, piirab sellega sektsiooni lühisevoolu suurust ja parandab kommutatsiooni. Polituuri esinemine kommutaatoril on hea kommutatsiooni tunnuseks. Harja peegelpind on hea kommutatsiooni korral samuti läikiv.

Tugev sädelemine ja kaarlahendused hävitavad polituuri ja harjade peegelpinna, puutepinnad muutuvad tuhmiks ja ilmuvad söestumise jäljed. Harikontakti üleminekutakistus seejuures väheneb ja kommutatsioonitingimused halvenevad.

Atmosfääri ülemistes kihtides on niiskust hoopis vähe ning alalisvoolumasinate kommutatsioon stratosfäärilennukeil halveneb

tugevasti. Polituuri tekitamiseks kasutatakse sel juhul spetsiaalseid harju.

Harjade pinge-voolu karakteristikud. Keeruka olemuse tõttu ei ole harikontakti üleminekutakistus konstantne, vaid sõltub voolu suurusest. Joon. 6-1 on pideva joonega näidatud harjade kaks pinge-voolu karakteristikut, mis kujutavad endast harja kontaktkihis tekkiva pingelangu ΔU_h sõltuvust harja all olevast keskmisest voolutihedusest j_h. Sealsamas on kujutatud kriipsjoontega üleminekuu eritakistuse



Joon. 6-1. Harjade pinge-voolu karakteristikud

$$\varrho_h = \frac{\Delta U_h}{j_h}$$

kõverad funktsioonina j_h-st.

Kõverate $\Delta U_h = f(j_h)$ järsult tõusvas algusosas domineerib kontaktjuhtivus, lamedas osas aga ioonjuhtivus.

Kõverad *1* joon. 6-1 vastavad olukorrale, kui väikestel j_h väärtustel eritakistus ϱ_h on suur ja pinge-voolu karakteristiku algusosa järsult tõusev. Sellised harjad kindlustavad paremaid kommutatsioonitingimusi kui kõveratele *2* joon. 6-1 vastavad harjad (vt. § 6-3 ja 6-6).

6-2. KOMMUTAATORI SÄDELEMINE

Sädelemise põhjused. Praktilisest seisukohast lähtudes on tähtis, et kommutatsioon toimuks tunduva sädelemiseta harjade puutepindadel, sest tugev sädelemine rikub kommutaatori ja harjade pinda ning muudab masina kestva töö võimatuks. Harjade sädelemise põhjused võib jagada mehaanilisteks ja elektromagnetilisteks.

Sädelemise mehaanilised põhjused on suuremalt jaolt seotud puute rikkumisega harjade ja kommutaatori vahel. Seda põhjustavad: 1) kommutaatori pinna ebatasasused, 2) halvasti lihvitud harjad; 3) kommutaatori viskumine, kui see ületab 0,2 ... 0,3 mm, 4) üksikute kommutaatorilestade väljaulatumine, 5) vilkisolatsiooni väljaulatumine kommutaatorilestade vahelt, 6) harjade kinnijäämine harjahoidikutes (liiga tihe sobitus), 7) harjade vibratsioon (harjaseadme mitteküllaldane jäikus, masina halb tasakaalustatus, liiga suur harjade lõtk harjahoidikutes, s. t. piludega

üle 0,2 ... 0,3 mm, liiga suur vahemaa harjahoidiku alumise ääre ja kommutaatori vahel — üle 2 ... 3 mm jne.). Sädelemist võivad põhjustada ka harjavedrude ebaühtlane pingutatus, harjahoidiku poltide ja harjade mittesümmeetriline jaotus kommutaatori ümbermõõdul ja teised mehaanilise iseloomuga põhjused.

Harjade sädelemise elektromagnetilised põhjused on seotud elektromagnetiliste protsesside kulgemise iseloomuga kommuteeruvates sektsioonides. Nende protsesside küllalt soodsa kulgemise kindlustamine osutub tähtsaks ülesandeks alalisvoolumasinate, eriti just suurte, konstrueerimisel. Nende küsimuste uurimine moodustab käesoleva peatüki järgnevate paragrahvide põhilise sisu.

Sädelusaste. Kommutatsiooni kvaliteeti hinnatakse vastavalt ГОСТ 183-55 (tabel 6-1), sädelusastmega (kommutatsiooniklas-

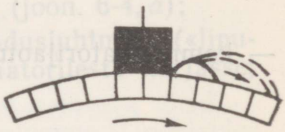
Tabel 6-1

Elektrimasinate sädelusastmed (kommutatsiooniklassid)

Sädelusaste (kommutatsiooniklass)	Sädelusastme iseloomustus	Kommutaatori ja harjade seisukord
1	Sädelemise puudumine (pimekommutatsioon)	
$1^1/_4$	Nõrk punktitaoline sädelemine harja pinna väikese osa all	Tahma jäljed kommutaatoril ja põlenud pind harjadel puuduvad
$1^1/_2$	Nõrk sädelemine harja pinna suurema osa all	Mustumisjälgede ilmumine kommutaatoril, mida saab kergesti kõrvaldada kommutaatori pinna bensiiniga hõõrumisega, samuti põlemisjälgede ilmumine harjadel
2	Sädelemine harja kogu pinna all on lubatud lühiajalistel koormuse tõugetel ja ülekoormusel	Kommutaatoril ilmuvad mustumisjäljed, mis ei ole kõrvaldatavad pinna hõõrumisel bensiiniga, samuti ilmuvad põlemisjäljed harjadel
3	Tunduv sädelemine harja kogu pinna all koos suurte lenduvate sädemete ilmumisega. Lubatakse ainult masina vahetul (reostaadita) käivitamise või reverseerimise hetkel, kui seejuures kommutaator ja harjad jäävad edasiseks töötamiseks kõlblikuks	Kommutaatori tunduv mustumine, mis ei ole kõrvaldatav kommutaatori pinna hõõrumisel bensiiniga, samuti harjade sissepõlemine ja riknemine

siga) harja mahajooksva serva all, s. o. selle serva all, mille alt kommutaatorilestad pöörlemisel väljuvad. Sädelusastmed 1, $1^1/_4$ ja $1^1/_2$ on lubatud mistahes tööreŽiimide korral.

Potentsiaalsädelemine. Teatud tingimustes tekivad sädelahendused kommutaatori vahel, s. o. harjadest hõivamata pinnal üksikute lestade vahel. Niisugust sädelemist nimetatakse potentsiaalseks. Seda põhjustab kas söetolmu ja mustuse kogunemine kommutaatori naaberlestade vahelistesse lõhedesse või liigpingete tekkimine naaberlestade vahel (vt. § 5-3). Niisugune sädelemine on ohtlik, sest see võib areneda lestadevaheliseks lühiseks ja nn. ringtuleks.



Joon. 6-2. Ringtule levimine kommutaatoril

Ringtuleks nimetatakse masina ankrumähise lühist elektrikaare tõttu kommutaatori pinnal. Ringtuli tekib erakordselt tugeva kommutatsioonihäire tõttu, siis kui harja mahajooksva ääre alla ilmuvad suured heledad sädemed ja elektrikaared (joon. 6-2). Tule levik toimub kaare korduvate süttimistega. Elektrodünaamilised jõud venitavad harja all tekkiva kaare pikaks, kaar kustub ning jätab järele ioniseeritud ruumi. Seetõttu tekib järgnev kaar palju soodsamates tingimustes, on palju võimsam ja venitatakse kommutaatoril suuremale vahemikule. Lõpuks võib kaar välja venida kuni vastaspolaarsusega harjadeni.

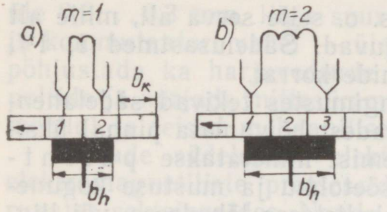
Ringtuli tekib harilikult suurtel ankruvoolu tõugetel (tunduvad ülekoormused, lühised masina klemmidel või võrgus jne.). Seejuures tekib ühest küljest tugev sädelemine («sähvatus») harja all, teisest küljest aga ka väljapildi tunduv moonutumine õhupilus ja pinge suurenemine üksikute kommutaatorilestade vahel (vt. § 5-3), mis soodustab ringtule tekkimist. Ringtuli põhjustab kommutaatori ja harjade pinna riknemise.

Mõjuvaks abinõuks ringtule tekke vastu on kompensatsioonimähiste (vt. § 5-3), aga samuti ka kiiretoimeliste lülitite kasutamine, mis lahutavad lühised 0,05 ... 0,10 sekundiga. Mõnikord, $U_N > 1000$ V korral, paigutatakse erinevate polaarsustega harjade vahele kaare levikut takistavad isoleertõkked.

6-3. KOMMUTATSIOONIPROTSESS

Kommutatsiooniperiood T_k on aeg, mille kestel mähisesektsioon on lühistatud ja kommuteerub.

Joon. 6-3, *a* kujutatud lihtsilmusmähise juhtumil ühendatakse silmusekujuline sektsioon kommutaatori naaberlestade vahele.



Joon. 6-3. Kommutatsiooniprotsessi perioodi määramine

Seejuures on suurus T_k võrdne ringkiirusega v_k pöörleva kommutaatori nihkumiseks harja laiuse b_h võrra kuluva ajaga

$$T_k = \frac{b_h}{v_k}. \qquad (6\text{-}1)$$

Tähistame: D_k — kommutaatori diameeter,

$$b_k = \frac{\pi D_k}{K} \qquad (6\text{-}2)$$

— kommutaatorijaotus ja

$$\beta_k = \frac{b_h}{b_k} \qquad (6\text{-}3)$$

— harja kattetegur (harilikult $\beta_k = 2{,}0 \ldots 4{,}0$, kuid liitsilmusmähiste korral β_k võib saavutada väärtuse kuni 7,0). Siis

$$v_k = \pi D_k n = b_k K n \qquad (6\text{-}4)$$

ja lihtsilmusmähise jaoks, vastavalt avaldisele (6-1):

$$T_k = \frac{b_h}{b_k K n} = \frac{\beta_k}{K n}. \qquad (6\text{-}5)$$

Mitmekordse m-käigulise liitsilmusmähise (joon. 6-3, *b*) korral sektsiooni alguse ja lõpu vahel paikneb $m-1$ kommutaatorilesta. Seejuures on sektsioon lühistatud kommutaatori nihkumise vältel kaare suuruse $b_h - (m-1)b_k$ võrra ning järelikult

$$T_k = \frac{b_h - (m-1)b_k}{v_k}.$$

Asetades siia $b_h = \beta_k b_k$, $m = a/p$ ja suuruse v_k valemist (6-4), saame

$$T_k = \frac{\beta_k - \left(\frac{a}{p} - 1\right)}{Kn}. \qquad (6\text{-}6)$$

Avaldis (6-6) on kehtiv samuti lihtsilmusmähise ($a/p = 1$) ning peale selle, nagu võib näidata, ka liht- ning liitlainemähise korral.

Olgu meil näiteks lihtlainemähisega masin, millel $n = 1500$ p/min $= 25$ p/s, $K = 100$, $\beta_k = 2{,}5$. Siis valemi (6-5) või (6-6) järgi

$$T_k = \frac{2{,}5}{100 \cdot 25} = 0{,}001 \text{ s}.$$

Seega kulgeb kommutatsiooniprotsess kiiresti ning on masina välisahela suhtes perioodiline protsess sagedusega 1000... ...3000 Hz.

Kommutatsioonivõrrandid. Uurime kommutatsiooni seaduspärasusi lihtsilmusmähise (joon 6-4) korral.

Koostame Kirchhoffi teise võrrandi kommuteeritavale sektsioonile (joon. 6-4):

$$ir_s+i_1(r_L+r_{h1})-i_2(r_L+r_{h2})=\Sigma e, \qquad (6\text{-}7)$$

kus i on vool kommuteeritavas sektsioonis; kommutatsiooni alghetkel loetakse see positiivseks (joon. 6-4, *a*);

i_1, i_2 — voolud, mis kulgevad läbi ühendusjuhtmete («lipukeste») ja *1.* ning *2.* kommutaatorilesta harjasse;

r_s — sektsioonitakistus;

r_L — «lipukese» takistus;

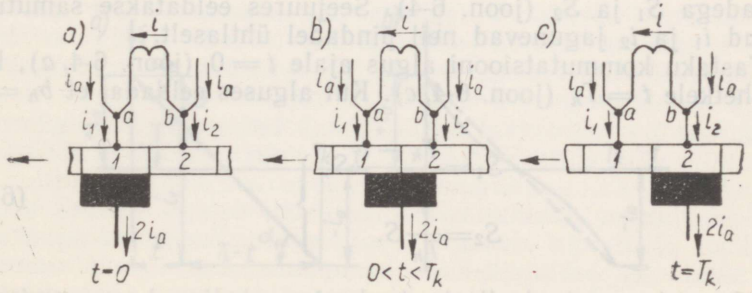
r_{h1}, r_{h2} — harikontakti takistus *1.* ja *2.* lesta ning harja vahel;

Σe — lühistatud sektsiooni endainduktsiooni protsessi ja teiste nähtuste tõttu kommuteeritavas sektsioonis indutseeritavate elektromotoorjõudude summa.

Peale selle võib Kirchhoffi esimese seaduse alusel sõlmpunktide *a* ja *b* kohta joon. 6-4 koostada kaks võrrandit:

$$\left.\begin{aligned} i_a+i-i_1&=0;\\ i_a-i-i_2&=0.\end{aligned}\right\} \qquad (6\text{-}8)$$

Kommutatsiooniprotsess määratakse kindlaks voolude i, i_1 ja i_2 ajalise muutumisega. Need voolud saame võrrandeist (6-7) ja (6-8), kui kõik teised suurused on teada. Üldjuhtumil on nende võrrandite lahendamine praktiliselt võimatu. Tõepoolest, i_a, r_s ja r_L võib lugeda konstantseteks ja etteantud suurusteks. Kuid r_{h1}



Joon. 6-4. Sektsiooni kommuteerumise ajaline kulg

ja r_{h2} osutuvad küllalt keerukaiks ja matemaatiliselt raskesti määratavaiks voolude i_1, i_2 ning aja t (vt. § 6-1) funktsioonideks. Sedasama võib öelda ka elektromotoorjõudude summa $\sum e$ kohta. Seepärast leiame allpool ligikaudse lahenduse, lähtudes nn. klassikalisest kommutatsiooniteooriast, mis võimaldab avastada kommutatsiooniprotsessi põhilisi seaduspärasusi ja kindlaks määrata selle parandamise viise.

Asetame i_1 ja i_2 võrrandist (6-8) võrrandisse (6-7). Siis saame

$$i(r_s+2r_L+r_{h1}+r_{h2})-i_a(r_{h2}-r_{h1})=\Sigma e,$$

millest

$$i=\frac{r_{h2}-r_{h1}}{r_s+2r_L+r_{h1}+r_{h2}}i_a+\frac{\Sigma e}{r_s+2r_L+r_{h1}+r_{h2}}. \qquad (6\text{-}9)$$

Selle avaldise parempoolse osa esimene liige kujutab endast sektsiooni kommutatsiooni nn. põhivoolu, teine liige aga kommutatsiooni lisavoolu. Ilmselt on näha, et avaldise (6-9) nimetajad määravad kommuteeritava sektsiooni lühistatud vooluahela takistuse. Seepärast võib kommutatsiooni lisavoolu vaadelda kui elektromotoorjõududega $\sum e$ määratavat sektsiooni lühisevoolu.

Takistus-, lineaarkommutatsioon. Vaatleme alguses juhtumit kui $\sum e = 0$. Sel puhul esineb sektsioonis ainult kommutatsiooni põhivool. Sektsiooni voolu i muutumine määratakse kindlaks ainult r_{h1} ja r_{h2} muutumisega, mille tõttu seda juhtumit nimetataksegi takistuskommutatsiooniks.

Takistused r_s ja r_L on tunduvalt väiksemad kui r_{h1} ja r_{h2}. Seepärast võib võtta $r_s \approx r_L \approx 0$ ning siis $\sum e = 0$ korral

$$i=\frac{r_{h2}-r_{h1}}{r_{h2}+r_{h1}}i_a. \qquad (6\text{-}10)$$

Klassikalises kommutatsiooniteoorias eeldatakse, et r_{h1} ja r_{h2} on pöördvõrdelised lestade *1* ja *2* ning harjade vaheliste puutepindadega S_1 ja S_2 (joon. 6-4). Seejuures eeldatakse samuti, et voolud i_1 ja i_2 jagunevad neil pindadel ühtlaselt.

Vastaku kommutatsiooni algus ajale $t = 0$ (joon. 6-4, *a*), lõpp aga hetkele $t = T_k$ (joon. 6-4, *c*). Kui alguses eeldada, et $b_h = b_k$, siis

$$\left.\begin{aligned} S_1&=\frac{T_k-t}{T_k}S;\\ S_2&=\frac{t}{T_k}S. \end{aligned}\right\} \qquad (6\text{-}11)$$

kus S — kommutaatorilesta ja harja vaheline kogu puutepind joon. 6-4, *a* ja *c* näidatud asendis.

Olgu üleminekutakistus harja ja lesta vahel piirasendeis vastavalt joon. 6-4, *a* ja *c* märgitud r_h-ga. Siis ülaltoodud eeldustel

$$\left.\begin{aligned} r_{h1} &= \frac{S}{S_1} r_h = \frac{T_k}{T_k - t} r_h; \\ r_{h2} &= \frac{S}{S_2} r_h = \frac{T_k}{t} r_h. \end{aligned}\right\} \qquad (6\text{-}12)$$

Paigutame nüüd suurused r_{h1} ja r_{h2} võrrandeist (6-12) võrrandisse (6-10). Saame, et

$$i = \left(1 - \frac{2t}{T_k}\right) i_a. \qquad (6\text{-}13)$$

Suuruse i sõltuvus t-st vastavalt avaldisele (6-13) on lineaarne (joon. 6-5, *a*). Niisugust kommuteerimist nimetataksegi seetõttu lineaarkommutatsiooniks.

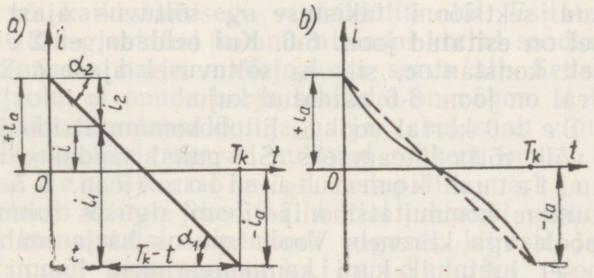
Määrame kindlaks voolutiheduse jaotuse harja all lineaarkommutatsiooni korral. Voolutihedused harja maha- ja pealejooksva ääre all on avaldatavad

$$j_{h1} = \frac{i_1}{S_1} = \frac{T_k}{S} \cdot \frac{i_1}{T_k - t};$$

$$j_{h2} = \frac{i_2}{S_2} = \frac{T_k}{S} \cdot \frac{i_2}{t}.$$

Joon. 6-5, *a* on näidatud ka voolude i_1 ja i_2 väärtused mingil hetkel t vastavalt võrrandeile (6-8). Seejuures järeldub joon. 6-5, *a*, et

$$\frac{i_1}{T_k - t} = \operatorname{tg} \alpha_1; \qquad \frac{i_2}{t} = \operatorname{tg} \alpha_2.$$



Joon. 6-5. Lineaarne (*a*) ja mittelineaarne (*b*) takistuskommutatsioon

Seega

$$j_{h1}=\frac{T_k}{S}\operatorname{tg}\alpha_1;\qquad j_{h2}=\frac{T_k}{S}\operatorname{tg}\alpha_2. \tag{6-14}$$

Ilmselt on näha, et lineaarkommutatsiooni korral (joon. 6-5, *a*) $\alpha_1=\alpha_2=\text{const}$. Järelikult on ka kogu kommutatsiooniperioodi vältel $j_{h1}=j_{h2}=\text{const}$.

Seega lineaarkommutatsiooni korral on voolutihedus kogu harja all kommutatsiooniaja vältel ühesugune, just nagu oleksid harjad pöörleval kontaktrõngal, aga mitte kommutaatoril. Niisugune kommutatsioon on seepärast teoreetiliselt ideaalne.

Võib näidata, et lihtsilmusmähise kommutatsioon osutub ka $b_h>b_k$ korral lineaarseks, kui ainult $\Sigma e=0$ ja $r_s=r_L=0$.

Kui $r_s\neq 0$ ja $r_L\neq 0$, siis võib võrrandite (6-9) ja (6-12) alusel väita, et $\Sigma e=0$ korral vool i muutub nii, nagu näidatud joon. 6-5, *b*. Järelikult üldjuhtumil takistuskommutatsioon ei osutu lineaarseks. Kuid normaaltingimustes erineb joon. 6-5, *b* toodud kõver sirgest vähe, mille tõttu selle erinevuse võib jätta arvestamata.

Aeglustatud ja kiirendatud kommutatsioon. Üldjuhtumil, $\Sigma e\neq 0$ korral, kommutatsiooni põhivoolule liitub lisavool, mis on määratav võrrandi (6-9) viimase liikmega:

$$i_{kl}=\frac{\Sigma e}{r_k}, \tag{6-15}$$

kus

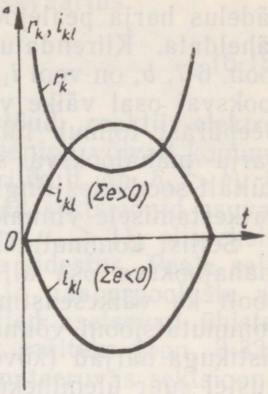
$$r_k=r_s+2r_L+r_{h1}+r_{h2}$$

või vastavalt võrrandile (6-12)

$$r_k=r_s+2r_L+\frac{T_k^2}{(T_k-t)t}r_h. \tag{6-16}$$

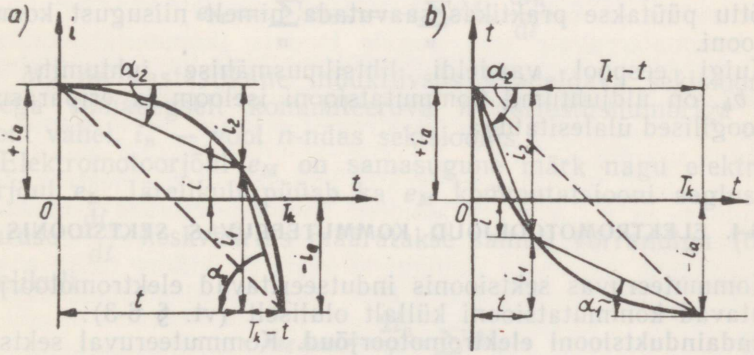
Lühistatud sektsiooni takistuse r_k sõltuvus ajast avaldise (6-16) alusel on esitatud joon. 6-6. Kui eeldada, et Σe on absoluutväärtuselt konstantne, siis i_{kl} sõltuvusel ajast t $\Sigma e>0$ ja $\Sigma e<0$ korral on joon. 6-6 näidatud kuju.

Suuruse $\Sigma e>0$ korral vool i_{kl} liitub kommutatsiooni põhivooluga, mille võib võtta lineaarseks. Sel puhul saadakse niinimetatud aeglustatud kommutatsioon (joon. 6-7, *a*), s. t. voolu muutumine kommutatsiooniperioodi alguses toimub aeglaselt, lõpu poole aga kiireneb. Voolu suurus harja mahajooksval osal säilib sel juhtumil kuni kommuteerimise lõpuni suurena, mille tõttu ka voolutihedus j_{h1} harja selle osa all jääb suureks. Lühistatud sektsiooni vooluahela katkestamine harja mahajooksva serva poolt on seejuures analoogiline *r*, *L*-ahela voolu väljalüli-



Joon. 6-6. Kommutatsiooni lisavool

Joon. 6-7. Aeglustatud (*a*) ja kiirendatud (*b*) kommutatsioon



tamisega või katkestamisega vinnaklüliti abil. Esitatud põhjuste tõttu tekivad aeglustatud kommutatsiooni korral soodsad tingimused sädelemiseks harja mahajooksva serva all. Seda soodustab samuti asjaolu, et puude harja servadel on vähem stabiilne (pilu olemasolu tõttu harjahoidiku ja harja vahel saab viimane mõnel määral liikuda, harja servad kuluvad rohkem jne.).

Suuruse $\Sigma e < 0$ korral on i_{kl}-l vastupidine märk ja voolu muutumise iseloom vastab joon. 6-7, *b*. Sel juhtumil voolud i, i_1 ja i_2 muutuvad kommutatsiooniperioodi alguses kiiresti ja niisugust kommutatsiooni nimetatakse kiirendatuks. Vool i_2 ning voolutihedus j_{h2} muutub harja pealejooksval osal juba kommutatsiooniprotsessi alguses suureks, kui harja see serv analoogiliselt vinnaklülitiga sektsiooni lühistab. Seejuures esineb mõningane

sädelus harja pealejooksva osa all, tugevat sädelust harilikult ei täheldata. Kiirendatud kommutatsiooni korral aga, nagu näha joon. 6-7, *b*, on vool i_1, aga samuti ka voolutihedus j_{h1} harja mahajooksval osal väike või võib praktiliselt koguni nulliga võrduda. Seepärast toimub lühistatud sektsiooni vooluahela katkestamine harja mahajooksva servaga kiirendatud kommutatsiooni korral küllalt soodsates tingimustes, mis sarnaneb väikese vooluga ahela katkestamisele vinnaklülitiga.

Sellist kommutatsiooni, kus vool kommuteerimise lõpul harja mahajooksva osa all on väike, nimetatakse mõningate autorite poolt ka väikeseastmelise vooluga kommuteerimiseks. Niisugust kommutatsiooni võimaldavad järsult tõusva pinge-voolu karakteristikuga harjad (kõver *1* joon. 6-1), millel on väikestel voolutihedustel suur üleminekutakistus.

Seega on aeglustatud kommutatsioon ebasoodne ja mittesoovitav. Vastupidi, veidi kiirendatud kommutatsioon on soodus ja seetõttu püütakse praktikas saavutada nimelt niisugust kommutatsiooni.

Kuigi eespool vaadeldi lihtsilmusmähise juhtumit, kus $b_h = b_k$, on üldjuhtumil kommutatsiooni iseloom ja eripärasused analoogilised ülalesitatuga.

6-4. ELEKTROMOTOORJÕUD KOMMUTEERUVAS SEKTSIOONIS

Kommuteeruvas sektsioonis indutseeritavad elektromotoorjõud mõjutavad kommutatsiooni küllalt oluliselt (vt. § 6-3).

Endainduktsiooni elektromotoorjõud. Kommuteeruval sektsioonil on teatav induktiivsus L_s, mille tõttu sektsioonis indutseeritakse elektromotoorjõud

$$e_L = -L_s \frac{di}{dt}.$$

Vastavalt § 6-3 valitud märkide juhisele muutub vool kommutatsiooniprotsessi vältel väärtusest $i = i_a$ $t = 0$ korral kuni väärtuseni $i = -i_a$ $t = T_k$ puhul. Seepärast $\frac{di}{dt} < 0$ ja $e_L > 0$. Järelikult püüab e_L vastavalt § 6-3-le aeglustada voolu muutumist kommuteeruvas sektsioonis.

Voolu tuletise keskväärtus:

$$\left[\frac{di}{dt}\right]_{kesk} = -\frac{2i_a}{T_k}. \qquad (6\text{-}17)$$

Seega endainduktsiooni elektromotoorjõu keskväärtus

$$e_{L\,kesk}=\frac{2L_s i_a}{T_k}. \qquad (6\text{-}18)$$

Vastastikuse induktsiooni elektromotoorjõud, reaktiiv-elektromotoorjõud. Samaaegselt vaadeldava sektsiooniga võivad kommuteeruda ka mitmed teised sektsioonid. Harilikult on $b_h > b_k$ ja hari lühistab mitu naabersektsiooni. Kui need sektsioonid asuvad ühes ja samas uurdes (elementaaruurete arv $u_u > 1$), siis eksisteerib nende vahel tugev elektromagnetiline sidestus. Peale selle on erinevate harjadega kommuteeritavatel ja naaberpooluste all asuvatel sektsioonidel, juhul kui nende küljed asetsevad ühistes uuretes, samuti tugev induktiivsidestus (vt. näiteks joon. 3-33). Seepärast indutseeritakse vaadeldavas kommuteeruvas sektsioonis vastastikuse induktsiooni elektromotoorjõud:

$$e_M=\sum_n e_{Mn}=-\sum_n M_n\frac{di_n}{dt},$$

kus M_n on vastastikune induktiivsus vaadeldava sektsiooni ja sellega samaaegselt kommuteeruva n järjestusnumbriga sektsiooni vahel, i_n — vool n-ndas sektsioonis.

Elektromotoorjõul e_M on samasugune märk nagu elektromotoorjõul e_L. Järelikult püüab ka e_M kommutatsiooni aeglustada. Suuruse $\frac{di_n}{dt}$ keskväärtus määratakse samuti võrrandiga (6-17). Järelikult

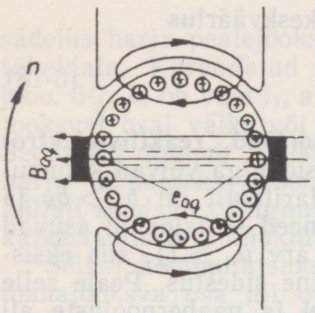
$$e_{M\,kesk}=\frac{2i_a}{T_k}\sum_n M_n. \qquad (6\text{-}19)$$

Harilikult liidetakse elektromotoorjõud e_L ja e_M ühtseks niinimetatud reaktiiv-elektromotoorjõuks:

$$e_r=e_L+e_M \qquad (6\text{-}20)$$

(sest neil on ühine iseloom ja peale selle on niiviisi mugavam arvutada).

Ankrureaktsiooni ristvälja elektromotoorjõud. Joon. 6-8 on kujutatud ankrureaktsiooni väli B_{aq}, mille tekitab vool ankrumähises. Kommuteeruva sektsiooni juhtmed, mis on sellel jooniselpaigutatud harjade alla, pöörlevad koos ankruga ankrureaktsiooni liikumatus väljas ja neis indutseeritakse e_{aq}. Viimase suund leitakse paremakäejuhisega ning on näidatud joon. 6-8. Nagu sellelt jooniselt nähtub, on elektromotoorjõul e_{aq} samasugune suund nagu sektsiooni voolul kommuteerimise alguses. Järelikult



Joon. 6-8. Ankrureaktsiooni ristvälja elektromotoorjõu määramine

püüab see säilitada voolu endist suunda, s. o. osutub positiivseks ja aeglustab samuti kommutatsiooni.

Elektromotoorjõud sektsioonis

$$e_{aq}=2B_{aq}w_s l_\delta v_a, \qquad (6\text{-}21)$$

kus B_{aq} on ankrureaktsiooni ristvälja induktsioon;

w_s — sektsiooni keerdude arv;

v_a — ankru ringkiirus.

Kõik vaadeldud elektromotoorjõud e_L, e_M ja e_{aq} või e_r ja e_{aq} on tekitatud ankruvoolust, aeglustavad kommutatsiooni ning on seetõttu kahjulikud. Nagu nähtub eespool toodud valemeist, on need elektromotoorjõud võrdelised koormusvooluga ja ankru pöörlemiskiirusega.

Välisvälja ja kommutatsiooni elektromotoorjõud. Üldjuhtumil võib kommuteeruvate sektsioonide tsoonis (kommutatsioonitsoonis) esineda ankru suhtes ka väline, s. t. induktoriga tekitatav magnetväli. Kommuteeruva sektsiooni külgede pöörlemisel selles väljas indutseeritakse neis elektromotoorjõud, mille suund sõltub välja suunast.

Loomulikult püütakse välisvälja abil saavutada elektromotoorjõudude e_r ja e_{aq} kompensatsiooni kommuteeritavas sektsioonis, sest masinates alates võimsusest 0,5 kW raskendavad need elektromotoorjõud tugevasti kommuteerimist. Praktikas tehakse seda harilikult lisapoolustega (vt. § 6-6), mis loovad masinas vajaliku intensiivsuse ja suunaga välisvälja.

Ankrureaktsiooni väli ja induktori välisväli moodustavad liitudes kommutatsioonitsoonis nn. kommuteeriva välja. Selle välja poolt kommuteeritavas sektsioonis indutseeritavat elektromotoorjõudu e_k nimetatakse k o m m u t a t s i o o n i elektromotoorjõuks ja määratakse analoogiliselt valemiga (6-21):

$$e_k=2B_k w_s l_\delta v_a, \qquad (6\text{-}22)$$

kus B_k on kommuteeriva välja induktsioon.

Lõppkokkuvõttes vaadeldakse kommutatsiooniteoorias seega kaht elektromotoorjõudu — sektsiooni reaktiiv-elektromotoorjõudu e_r ja kommutatsiooni elektromotoorjõudu e_k. Kommutatsiooniks parimate tingimuste loomiseks on hädavajalik, et need oleksid suuruselt võrdsed ja vastassuunalised (lineaarkommutatsioon) või et e_k oleks veidi suurem e_r-st (veidi kiirendatud kommutatsioon). Selleks peab kommuteeriva välja suund olema vastupidine ankrureaktsiooni välja suunaga.

Transformatsiooni elektromotoorjõud. Peapooluste voog Φ_δ läbib kommuteeritavat sektsiooni ja aheldub sellega (vt. näiteks joon. 3-17 jt., joon. 6-8). Kui selle sektsiooni küljed paiknevad neutraalses tsoonis, siis neis voo Φ_δ poolt pöörlemise elektromotoorjõudu ei indutseerita. Kui aga peapooluste voog ajaliselt muutub, siis indutseeritakse kommuteeritavas sektsioonis transformatsiooni (pulsatsiooni) elektromotoorjõud

$$e_{tr} = -w_s \frac{d\Phi_\delta}{dt}.$$

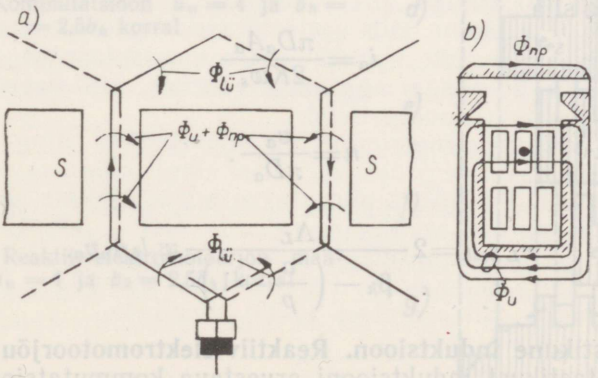
Alalisvoolumasinais tekib see elektromotoorjõud ainult erilistes tingimustes, näiteks mõnedel siirderežiimidel.

6-5. REAKTIIV-ELEKTROMOTOORJÕU MÄÄRAMINE

Endainduktsiooni elektromotoorjõu suurus. Et kindlustada projekteeritavais masinais normaalseid kommutatsioonitingimusi, tuleb määrata reaktiiv-elektromotoorjõu suurus.

Arvutame alguses endainduktsiooni elektromotoorjõu suuruse. See indutseeritakse uurete, hambapeade ja laupühenduste puistevoogudega (resp. Φ_u, Φ_{np} ja $\Phi_{l\ddot{u}}$) (joon. 6-9).

Vood Φ_u, Φ_{np} ja $\Phi_{l\ddot{u}}$ kulgevad põhiliselt õhus ning sõltuvad seetõttu vaid vähesel määral hammaste piirkonna küllastusest, olles võrdelised w_s-ga. Igaüks neist voogudest tekitab omakorda selle voo ja keerdude arvuga w_s võrdelise aheldusvoo. Seega sekt-



Joon. 6-9. Sektsiooni magnetilised puistevood

siooni summaarne endainduktsiooni aheldusvoog Ψ_L on võrdeline w_s^2-ga:

$$\Psi_L = \Lambda_{Ll} w_s^2 i. \tag{6-23}$$

Võrdetegur Λ_{Ll} kujutab endast sektsiooni puistevoogude magnetilist juhtivust ja on arvuliselt võrdne tegeliku sektsiooniga võrdsete mõõtmetega ühe keeru ($w_s = 1$) aheldusvooga voolul $i = 1$ A. Aheldusvoo Ψ_L põhiline osa on tekitatud ankru uuretes asuvate sektsiooni külgedega. Seepärast võib juhtivuse Λ_{Ll} taandada ankru kahekordse pikkusega

$$\frac{\Lambda_{Ll}}{2l_\delta} = \Lambda_L,$$

kus Λ_L on sektsiooni juhtivus ankru pikkusühiku kohta.

Öeldu alusel on sektsiooni induktiivsus

$$L_s = \frac{\Psi_L}{i}$$

esitatav seosena

$$L_s = 2w_s^2 l_\delta \Lambda_L. \tag{6-24}$$

Praktikas taotletakse lineaarsele lähedast kommutatsiooni. Seepärast arvutatakse lineaarkommutatsioonile vastava keskmise elektromotoorjõuga $e_{L\,kesk}$.

Vastavalt avaldistele (6-18), (6-24) ja (6-6)

$$e_{L\,kesk} = 2w_s^2 l_\delta \Lambda_L \frac{2Kni_a}{\beta_k - \left(\frac{a}{p} - 1\right)}.$$

Paigutame siia

$$i_a = \frac{\pi D_a A_a}{2Kw_s}$$

ja

$$n = \frac{v_a}{\pi D_a}.$$

Siis

$$e_{L\,kesk} = 2 \frac{\Lambda_L}{\beta_k - \left(\frac{a}{p} - 1\right)} w_s l_\delta A_a v_a. \tag{6-25}$$

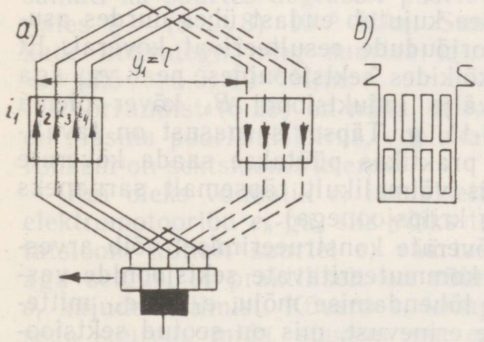
Vastastikune induktsioon. Reaktiiv-elektromotoorjõu suurus ja kuju. Vastastikust induktsiooni arvestava kommutatsiooni iseärasuste selgitamiseks vaatleme võrdsektsioonilise lihtsilmusmähise

juhtumit parameetritega $u_u = 4$ ja $b_h = 2{,}5b_k$ (joon. 6-10). Lihtsuse mõttes eeldame, et mähis on täissammuline ning ühistes uuretes asuvate sektsioonide enda- ja vastastikused induktiivsused on võrdsed. Kommutatsiooni loeme lineaarseks.

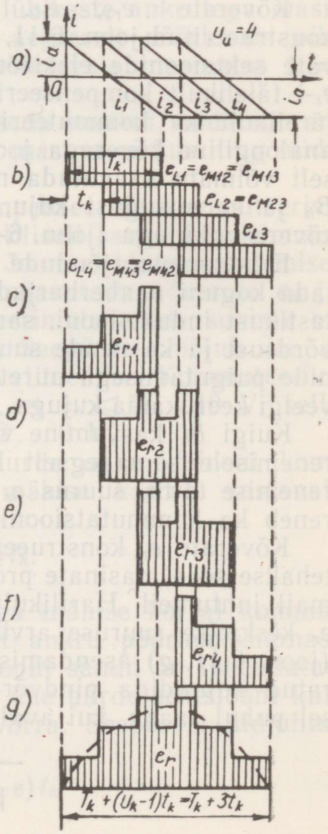
Vaadeldavate sektsioonide voolude muutumine kommutatsiooniprotsessis toimub ajalise nihkega

$$t_k = \frac{1}{Kn}, \tag{6-26}$$

nagu näidatud joon. 6-11, *a*. Ristkülikud joon. 6-11, *b* kujutavad endainduktsiooni elektromotoorjõudu e_L neis sektsioonides, kusjuures ristküliku kõrgus vastab elektromotoorjõu suurusele, kommutatsiooniperioodiga võrdne laius aga fikseerib selle elektromotoorjõu mõjumise alguse ja lõpu aja. Need ristkülikud on loomulikult samuti teineteise suhtes nihutatud aja t_k võrra.



Joon. 6-10. Kommutatsioon $u_u = 4$ ja $b_h = 2{,}5b_k$ korral



Joon. 6-11. Reaktiiv-elektromotoorjõu määramine $u_u = 4$ ja $b_h = 2{,}5b_k$ korral

Eeldame lihtsuse mõttes, et $e_L = e_M$. Siis iga joon. 6-11, *b* esinev ristkülik kujutab endast ka vastastikuse induktsiooni elektromotoorjõudu e_M, mis indutseeritakse igas vaadeldavas sektsioonis ülejäänud, samaaegselt kommuteeruvate sektsioonide poolt.

Et määrata reaktiiv-elektromotoorjõudu e_{r1} sektsioonis *1*, on vaja tingimata liita ristkülik *1* ja ristkülikute *2*, *3*, *4* need osad, mis asuvad ristküliku *1* all, sest et sektsioonid *2*, *3*, *4* mõjutavad sektsiooni *1* loomulikult ainult selle kommuteerimisel. Seega saame kõvera e_{r1} joon. 6-11, *c*, mis väljendab esimese sektsiooni reaktiiv-elektromotoorjõu ajalist muutumist. Analoogiliselt võib konstrueerida ülejäänud sektsioonide elektromotoorjõud e_{r2}, e_{r3}, e_{r4}, mis on esitatud joon. 6-11, *d*, *e*, *f*. Nagu nähtub joon. 6-11, on iga sektsiooni reaktiiv-elektromotoorjõud e_r vastastikuse induktsiooni tõttu isegi lineaarkommutatsioonil ajaliselt muutuv, kusjuures erinevate sektsioonide elektromotoorjõudude kõveratel on erinev kuju.

Kõverate e_{r1}, e_{r2}, e_{r3}, e_{r4} astmeline mähiskõver on konstrueeritud joon. 6-11, *g*. See kujutab endast ühes uurdes asuvate sektsioonide elektromotoorjõudude resulteerivat kõverat. Et e_r-i täielikult kompenseerida kõikides sektsioonides, peab e_k, aga järelikult ka kommuteeriva välja induktsiooni B_k kõver olema analoogiline kõveraga joon. 6-11, *g*. Täpset sarnasust on tavaliselt võimatu saavutada ning praktikas püütakse saada kõverate B_k ja e_k niisugust kuju, mis võimalikult täpsemalt sarnaneks kõvera e_r kujuga (joon. 6-11, *g* kriipsjoonega).

Elektromotoorjõudude e_r kõverate konstrueerimisel võib arvestada koguni naaberharjadega kommuteeritavate sektsioonide vastastikust induktsiooni, sammu lühendamise mõju, e_L ja e_M mittevõrdsust ja ka nende suuruste erinevust, mis on seotud sektsioonide paigutamisega uuretes kahte kihti. Kõverad e_r on sel puhul veelgi keerukama kujuga.

Kuigi b_k kasvamine viib vastastikuse induktsiooni mõju suurenemisele samaaegselt kommuteeruvate sektsioonide arvu suurenemise tõttu, suurus e_r aga veidi väheneb, sest seejuures suureneb ka kommutatsiooniperiood.

Kõverate e_r konstrueerimine on töömahukas ning seepärast tehakse seda masinate projekteerimisel ainult kõige vastutusrikkamail juhtumeil. Harilikult piirdutakse uurde kõikide sektsioonide e_r keskmise suuruse arvutamisega, mis vastab astmelise kõvera (joon. 6-11, *g*) asendamisele selle kõveraga ja abstsissteljega piiratud kujundiga pindvõrdse ristkülikuga. Valemi e_r jaoks võib sel puhul saada, kui avaldises (6-25) asendada

$$\frac{\Lambda_L}{\beta_k - \left(\frac{a}{p} - 1\right)}$$

suurusega

$$\xi=\frac{\Lambda_L+\Lambda_M}{\beta_k-\left(\frac{a}{p}-1\right)}=\frac{\Lambda}{\beta_k-\left(\frac{a}{p}-1\right)}, \qquad (6\text{-}27)$$

kus Λ_M on keskmine magnetiline juhtivus vastastikuse induktsiooni voogudele, aga $\Lambda=\Lambda_L+\Lambda_M$.

Seega saame harilikult arvutuspraktikas kasutatava Pichelmeieri valemi

$$e_r=2\xi w_s l_\delta A_a v_a. \qquad (6\text{-}28)$$

Magnetilised juhtivused Λ ja ξ sõltuvad peale uurete ja sektsiooni laupühenduste geomeetriliste mõõtmete ka teistest faktoritest (bandaažitraadi magnetilised omadused jne.). Valemid Λ ja ξ arvutamiseks tuuakse alalisvoolumasinate projekteerimist käsitlevais käsiraamatuis. Väikestes ja keskmistes masinates, samuti ka suurtes aeglaselt pöörlevais lühikeste ankrutega masinates $\xi=(5\ldots8)\ 10^{-6}$ H/m. Suurtes aeglaselt pöörlevais pikkade ankrutega ning suurtes kiirelt pöörlevais masinates $\xi=$ $=(3{,}5\ldots5{,}0)\ 10^{-6}$ H/m.

Võrrandist (6-28) on näha, et e_r on seda suurem, mida suurem on masina pöörlemiskiirus, voolukate ja masina pikkus ning mida rohkem on sektsioonis keerde.

Kui oleks võimalik e_r ideaalselt kompenseerida kommuteeriva elektromotoorjõu e_k-ga, siis võiks teoreetiliselt saada hea kommutatsiooni küllalt suurtel e_r väärtustel. Joon. 6-11, *g* vaatlemisel aga selgus, et praktiliselt on võimatu saavutada kõverate e_k ja e_r kujude ühtimist. Kõvera e_r kompenseerimata osade summa on seda suurem, mida suurem on e_r ise. Seepärast mõjub ka e_r suurus otsustavalt kommutatsiooni kvaliteedile. Kommuteeriva välja olemasolu korral on hädavajalik, et $e_r\leqslant 7\ldots10$ V, selle välja puudumisel aga olgu $e_r+e_{aq}\leqslant 2\ldots3$ V.

Kommutatsioonitsooni laius. Ühe uurde u_u sektsiooni kommuteerimisaeg T_u on täissammuga mähise korral vastavalt joon. 6-11, *g*

$$T_u=T_k+(u_u-1)t_k.$$

Lühendatud või pikendatud sammuga mähise korral kommuteeruvad alumised sektsioonid sõltuvalt ankru pöörlemissuunast ülemistest varem või hiljem. Kui sektsiooni samm on lühendatud või pikendatud ε võrra (vt. § 3-2), siis ühe uurde sektsiooni külgede kommuteerimisaeg suureneb εt_k võrra. Seepärast üldjuhtumil

$$T_u=T_k+(u_u-1+\varepsilon)t_k.$$

Paigutades siia T_k ja t_k suurused valemeist (6-6) ja (6-26), saame

$$T_u = \frac{\beta_k + \left(u_u - \frac{a}{p} + \varepsilon\right)}{Kn}. \qquad (6\text{-}29)$$

Kommutatsioonitsooniks nimetatakse kaart ankru ümbermõõdul, mille piirides uurdes olevad sektsiooni küljed kommuteerimise ajal nihkuvad. Selle tsooni laiuse $b_{k\,ts}$ saame, kui korrutame T_u ankru ringkiirusega

$$v_a = \pi D_a n.$$

Seega

$$b_{k\,ts} = \left[\beta_k + \left(u_u - \frac{a}{p} + \varepsilon\right)\right] \frac{\pi D_a}{K}. \qquad (6\text{-}30)$$

Kui paigutada avaldisse (6-30)

$$\frac{\pi D_a}{K} = \frac{\pi D_k}{K} \cdot \frac{D_a}{D_k} = b_k \frac{D_a}{D_k}$$

ja arvestada seost (6-3), siis valem (6-30) võtab veidi teise kuju

$$b_{k\,ts} = \left[b_k + \left(u_u - \frac{a}{p} + \varepsilon\right) b_k\right] \frac{D_a}{D_k}. \qquad (6\text{-}31)$$

Avaldistesse (6-30) ja (6-31) on vaja alati paigutada ε absoluutväärtus.

Suurus $b_{k\,ts}$ ei või olla naaberpeapooluste poolusekingade vahelisest kaugusest suurem kui 50...65%. Vastasel juhul satuvad kommuteeritavad sektsioonid peapooluste tugeva välja piirkonda, mis halvendab järsult kommutatsioonitingimusi. Seoses sellega võib avaldistest (6-30) ja (6-31) järeldada, et ei ole soovitav mähisesammu tunduvalt lühendada.

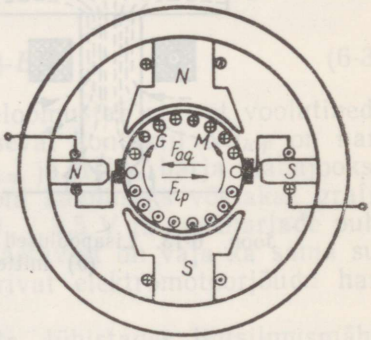
6-6. KOMMUTATSIOONI PARANDAMISE VIISID

Heade kommutatsioonitingimuste loomiseks on kõigepealt vaja kindlustada kommutaatori ja harjaseadme nõuetele vastavus, et kõrvaldada sädelemise mehaanilisi põhjusi (vt. § 6-2). Allpool vaadeldakse võtteid hädavajalike elektromagnetiliste kommutatsioonitingimuste tagamiseks. Need võtted on suunatud kommutatsiooni lisavoolu või kommuteeritava sektsiooni lühisevoolu vähendamisele ja taanduvad järgmistele abinõudele: 1) kommuteeriva elektromotoorjõu loomisele lisapoolustega või harjade

nihutamisega geomeetriliselt neutraalilt, 2) reaktiiv-elektromotoorjõu vähendamisele ja 3) kommuteeritava sektsiooni takistuse suurendamisele.

Lisapoolused. Kommutatsiooni parandamise põhiliseks viisiks kaasaegsetes alalisvoolumasinates on kommuteeriva magnetvälja loomine lisapooluste abil. Viimased paigutatakse peapooluste vahele (joon. 6-12) ja kinnitatakse poltidega induktori ikke külge. Lisapooluste magneetimisergutus F_{lp} peab olema suunatud vastupidi ankrureaktsiooni magneetimisergutusele F_{aq}, et kompenseerida seda ja luua peale selle veel kommuteeriva välja B_k reaktiiv-elektromotoorjõu e_r kompenseerimiseks. Järelikult kompensatsioonimähise puudumisel $F_{lp} > E_{aq}$, aga selle olemasolul $F_{lp} + F_{km} > > F_{aq}$. Viimasel juhtumil F_{lp} nõutav suurus on väiksem, sest et põhiline osa ankrureaktsiooni voost kompenseeritakse kompensatsioonimähisega.

Öeldut arvestades võib joon. 6-12 alusel formuleerida juhise: generaatori korral peab antud polaarsusega peapoolusele ankru pöörlemissuunas järgnema vastupidise polaarsusega, mootori korral aga sama polaarsusega lisapoolus.



Joon. 6-12. Lisapooluste paigutus ja polaarsus

Et suurused F_{aq} ja e_r on ankruvooluga võrdelised, siis nende kompenseerimiseks peavad F_{lp} ja B_k samuti ankruvooluga võrdelised olema. Selle tingimuse täitmiseks ühendatakse lisapooluste mähis ankrumähisega järjestikku, südamikud aga valmistatakse sellise ristlõikega, et need tööprotsessis ei küllastuks. Seepärast on neis nimikoormusel lubatav induktsioon mitte suurem kui 0,8 ... 1,0 T. Kuna induktori ikke üksikutes osades pea- ja lisapooluste magnetväljad liituvad, siis nende osade küllastumise vältimiseks ei tohi peapooluse induktsioon ikkes olla suurem kui 1,3 T. Lisapooluste südamikud valmistatakse lehtterasest või massiivsetena terassepisest.

Lisapooluste sellise konstruktsiooni korral on nende poolt indutseeritav kommuteeriv elektromotoorjõud

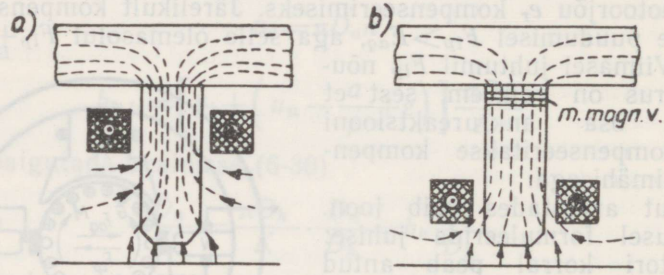
$$e_k \sim B_k v_a \sim I_a v_a.$$

Teisest küljest on reaktiiv-elektromotoorjõud samuti võrdeline $I_a v_a$-ga:

$$e_r \sim I_a v_a.$$

Seepärast toimub tingimuse $e_k = e_r$ täitmine koormuse ja pöörlemiskiiruse muutumisel automaatselt.

Lisapooluste suhteliselt väikese kasuliku magnetvoo juures tuleb nende magneetimisergutus F_{lp} võtta suur, sest et F_{lp} tunduv osa (75 ... 85%) kulutatakse F_{aq} kompenseerimiseks. Sel põhjusel on lisapooluste puistetegur suur: $\sigma_{lp} = 3 \ldots 5$ kompensatsioonimähise puudumisel ja $\sigma_{lp} = 2 \ldots 3$ selle olemasolul. Kui lisapooluste mähis paikneb ankrust kaugel (joon. 6-13, *a*), tekib



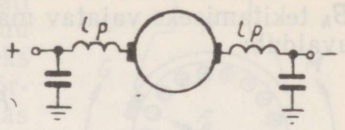
Joon. 6-13. Lisapoolused liigendamata (*a*) ja liigendatud (*b*) mittemagnetilise piluga

suur puistevoog. Puiste vähendamiseks paigutatakse lisapooluste mähis võimalikult ankru lähedale (joon. 6-13, *b*). Suurtes masinates jaotatakse õhupilu peale selle veel kahte ossa. Teine mittemagnetiline vahemik luuakse ikke ja lisapooluse südamiku vahel (joon. 6-13, *b*) mittemagnetiliste, näit. vask- või duralumiiniumvahekutega.

Lisapooluseid kasutatakse masinates võimsusega $P_N > 0{,}3$ kW. Harilikult paigutatakse masinasse peapoolustega võrdne arv lisapooluseid, kuid masinaisse võimsusega kuni 2,5 kW paigutatakse lisapooluseid kaks korda vähem. Lisapooluste kasutamine võimaldab suurendada masina voolukatet ning selle arvel vähendada masina gabariite ja maksumust.

Kommutatsioon tekitab elektromagnetilise võnkumise sagedusega 1000 ... 3000 Hz, mis levib masina külge ühendatud elektrivõrku mööda. See põhjustab raadiovastuvõtu- ja muu raadiotehnilise aparatuuri tööd raskendavaid raadiohäireid. Nende häirete vähendamiseks masina ankruahel sümmetreeritakse, s. t. ankruga järjestikku ühendatud mähised, sealhulgas ka lisapooluste mähis, jaotatakse kahte ossa, mis ühendatakse vastupidise polaarsusega harjade külge (joon. 6-14). Peale selle ühendatakse

erineva polaarsusega harjade ja masina kere vahele kondensaatorid kõrgsagedusvõngete šunteerimiseks masina klemmidel.



Joon. 6-14. Raadiohäirete summutamine

Lisapooluse magneetimisergutus. Võrrutades võrrandid (6-22) ja (6-28), leiame lineaarkommutatsiooniks vajaliku $B_k = B'_k$ suuruse:

$$B'_k = \xi A_a. \tag{6-32}$$

Kui $A_a = (3 \ldots 5)\ 10^4$ A/m ja $\xi = (5 \ldots 8)\ 10^{-6}$ H/m, siis $B'_k = 0{,}15 \ldots 0{,}40$ T.

Et saada veidi kiirendatud kommutatsiooni, on tingimata vaja kindel lisaliige B''_k nii, et

$$B_k = B'_k + B''_k. \tag{6-33}$$

Kiirendatud kommutatsiooni iseloomustab see, et voolutihedus $j_{h.p}$ ning vastavalt pingelang libiseval kontaktil $\Delta U_{h.p}$ on harja pealejooksva osa all suurem kui $j_{h.m}$ ja $\Delta U_{h.m}$ harja mahajooksva osa all. Kiirendatud kommutatsiooni saamiseks võetakse grafiitharjade puhul $\Delta U_{h.p} - \Delta U_{h.m} = 1{,}0 \ldots 1{,}5$ V ja vaskharjade puhul $\Delta U_{h.p} - \Delta U_{h.m} = 0{,}35 \ldots 0{,}65$ V. Vastavalt on vaja ka sama suuruse võrra suurendada kommuteerivat elektromotoorjõudu harja äärtega lühistatavas vooluahelas.

Üldjuhtumil katab hari β_k lesta, lühistades lihtsilmusmähise korral ka niisama palju sektsioone. Kuid m-käigulise liitsilmusmähise üldjuhtumil on harjaga lühistatava mähise ühe käigu järjestikku ühendatud sektsioonide arv võrdne:

$$\frac{\beta_k}{m} = \frac{\beta_k p}{a}.$$

Järelikult on vaja ühe sektsiooni kommuteeriva elektromotoorjõu lisaliiget

$$e''_k = -\frac{a(\Delta U_{h.p} - \Delta U_{h.m})}{p\beta_k},$$

milleks, vastavalt avaldisele (6-22), on vaja kommuteeriva välja induktsiooni lisaliiget

$$B''_k = -\frac{a(\Delta U_{h.p} - \Delta U_{h.m})}{2p\beta_k w_s l_\delta v_a}. \tag{6-34}$$

Seejuures peetakse silmas, et lisapooluse pikkus võrdub ankru pikkusega. Viimane valem on õige ka lainemähise korral.

Kui mitte arvestada lisapooluste magnetahela küllastust, siis

B_k tekitamiseks vajatav magneetimisergutus ühe lisapooluse jaoks avaldub:

$$F_k = \frac{k_{\delta l}\delta_l B_k}{\mu_0}, \tag{6-35}$$

kus δ_l on lisapooluse õhupilu laius ja $k_{\delta l}$ — lisapooluse õhupilutegur.

Lisapooluse tsoonis ankrureaktsiooni kompenseerimiseks vajatav magneetimisergutus

$$F_{aqk} = F_{aq} - F_{km} = \frac{\tau A_a}{2} - \frac{b_p A_k}{2}. \tag{6-36}$$

Vajalik summaarne lisapooluse magneetimisergutus

$$F_{lp} = F_k + F_{aqk},$$

mis vastavalt seostele (6-32) ... (6-36) on avaldatav kujul

$$F_{lp} = \frac{1{,}1 k_{\delta l}\delta_l}{\mu_0} = \left[\xi A_a + \frac{a(\Delta U_{h.p} - \Delta U_{h.m})}{2p\beta_k w_s l_\delta v_a}\right] + \\ + \frac{\tau A_a}{2} - \frac{b_p A_k}{2}. \tag{6-37}$$

Kompensatsioonimähise puudumisel $A_k = 0$. Poole väiksema lisapooluste arvu korral valemi (6-37) järgi arvutatud F_{lp} suurust tuleb kahekordistada. Tegur 1,1 valemis (6-37) arvestab magnetahela ferromagnetiliste osade magneetimisergutust.

Lisapoolusele vajalik keerdude arv

$$w_{lp} = \frac{F_{lp}}{I_{aN}}. \tag{6-38}$$

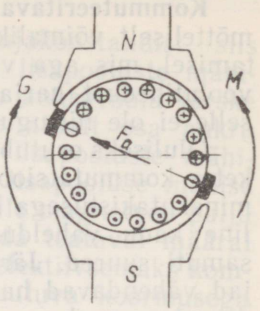
Lisapoolus peab looma kommuteeriva välja kommutatsioonitsooni kogu laiuse ulatuses, kusjuures selle tsooni äärte poole peab suurus B_k vähenema vastavalt uurde e_r kõvera kujule (vt. joon. 6-11, *g*). Õhupilu laius δ_l on harilikult peapooluste all oleva õhupilu laiusest δ 1,5 ... 2,0 korda suurem. Lisapooluse kinga laius moodustab seejuures

$$b_{lp} = (0{,}4 \ldots 0{,}80)\, b_{k\,ts}.$$

Kommutatsiooni parandamine harjade nihutamisega. Masinatesse võimsusega kuni mõnisada vatti lisapooluseid ei paigutata. Sel juhul võib kommuteeriva välja luua harjade geomeetriliselt neutraalilt nihutamisega, mille tagajärjel kommutatsioonitsoonis hakkab mõjuma peapooluste väli (joon. 6-15). Et kommuteeruvas sektsioonis selle välja poolt indutseeritava elektromotoorjõu e_k

suund oleks õige, peab peapooluste väli kommutatsioonitsoonis olema suunatud ankrureaktsiooni väljale vastu. Selleks on vaja generaatoris harju pöörata pöörlemis-, mootoris aga vastupidises suunas (joon. 6-15).

Kui peapooluste voog Φ_δ muutub võrdeliselt ankruvooluga (peavoolumasinad, vt. § 9-5 ja 10-5), siis võib mingi kindla harjade asendi puhul koormuse muutumisel laias diapasoonis saavutada häid kommutatsioonitingimusi. Kui aga $\Phi_\delta = \text{const}$, siis saavutatakse parimad kommutatsioonitingimused ainult ühel kindlal koormuse väärtusel.



Joon. 6-15. Kommutatsiooni parandamine harjade nihutamisega geomeetriliselt neutraalilt

Harjad paigaldatakse silma järgi, jälgides nende sädelemist.

Reaktiiv-elektromotoorjõu vähendamine. Nagu juba eespool selgus, on heaks kommutatsiooniks vaja, et $e_r \leqslant 7 \ldots 10$ V.

Suuruse e_r sõltuvus mitmesugustest parameetritest selgub võrrandist (6-28). Seejuures on vaja märkida, et A_a vähendamine ei ole materjali ärakasutamise seisukohast otstarbekas. Suurused $v_a = \pi D_a n$ ja l_δ määratakse masina nimivõimsusega. Järelikult e_r piiramine sõltub w_s ja ξ vähendamise võimalustest.

Masinates võimsusega üle 50 kW on w_s alati 1.

ξ vähendamine on võimalik kommuteeritavate sektsioonide vahelise vastastikuse induktsiooni vähendamisega, mis saavutatakse sammu lühendamisega kuni ühe hambajaotuse võrra ja treppmähise kasutamisega (vt. § 3-1). Viimasel juhtumil väheneb sektsioonidevaheline magnetiline sidestus selle tõttu, et kui u_u sektsiooni ülemised küljed asuvad ühes ja samas uurdes, siis nende alumised küljed paiknevad erinevates uuretes (vt. joon. 3-5, *b*).

Suuruse e_r vähendamiseks silmusmähiste korral valitakse suhe K/p paarituarvulisena. Naaberpoolustega ahelduvad sektsioonid kommuteeruvad siis ajalise nihkega, mille suurus vastab kommutaatori pöörlemisele poole kommutaatorijaotuse võrra kuluvale ajale, ning vastavalt väheneb vastastikune induktsioon. Samuti väheneb ξ uurde sügavuse ja laiuse suhte vähenemisel ning harja katteteguri β_k suurenemisel, sest võrrandi (6-27) nimetaja kasvab sel juhul lugejast kiiremini.

Suurust ξ saab samuti vähendada, suurendades juhtme ristlõike kõrgust ankru uurdes. Sel juhtumil väheneb juhtme ja sektsiooni induktiivsus kommuteerimise ajal tekkiva pinnaefekti tagajärjel.

Kommuteeritava sektsiooni takistuse suurendamine on põhimõtteliselt võimalik suurema takistusega ühenduslipukeste kasutamisel, mis aga vähendab masina kasutegurit ja suurendab ka voolutihedust harja mahajooksval osal (vt. joon. 6-5, *b*). Peale selle ei ole niisugused ühenduslipukesed töökindlad.

Oluliseks osutub sobivate karakteristikutega harjade valik. Rasketes kommutatsioonitingimustes töötavad paremini suurema üleminekutakistusega kõvad grafiitharjad, kuid seejuures on elektriline kadu vahelduskontaktis ja mehaaniline kadu hõõrdumisel samuti suured. Järsult tõusva pinge-voolu karakteristikuga harjad vähendavad harja mahajooksva osa voolutihedust ja võimaldavad seega kommutatsiooni parandada. Väikese üleminekutakistusega vaskgrafiitharju kasutatakse ainult masinates pingega 25 kuni 30 V.

Kommutatsiooni parandamiseks on esitatud ka hulk teisi mooduseid, mis aga kahjuks erialast kasutamist ei leia.

Kommutatsiooni parandamine siirderežiimides ja pulseeriva voolu korral. Eespool pöörati põhilist tähelepanu kommutatsioonile normaalsetel püsirežiimidel. Järskudel siirderežiimidel (tõukeline ja pulseeriv koormus, suured ülekoormused, lühised jne.), samuti ka alalisvoolumasinate toitmisel vahelduvvooluvõrgust läbi alaldite (eriti ühefaasilisest võrgust, näiteks vahelduvvoolul töötavad elektriraudteed) halvenevad kommutatsioonitingimused järsult.

Üheks kommutatsiooni halvenemise põhjuseks toodud tingimustel võib olla peapooluste magnetvoo muutumisel tekkiv transformatsiooni elektromootorjõud e_{tr} (vt. § 6-4). Selle elektromotoorjõu kompenseerimine lisapoolustega on praktiliselt võimatu, sest e_{tr} ja e_k muutumise seaduspärasused on erinevad. Nimelt ei sõltu e_{tr} hoopiski pöörlemiskiirusest. Seepärast võetakse möödapääsmatutel juhtumitel tarvitusele abinõud e_{tr} vähendamiseks. Näiteks vahelduvvoolu-elektriveduritele paigutatavais alalditest toidetavais alalisvoolu-veomootoreis šunteeritakse peapooluste ergutusmähised aktiivtakistustega. Ergutusmähise suure induktiivsuse tõttu hargneb seejuures alaldatud voolu pulseeriv komponent sildetakistisse ja peapooluste voog seda komponenti ei sisalda.

Voolu kiirel muutumisel ankruahelas ei muutu lisapooluste voog tingituna pöörisvoolude tekkimisest massiivses magnetahelas ning nende poolt loodavaist magnetvoogudest võrdeliselt ankruvooluga. Seega on reaktiiv-elektromotoorjõu kompenseerimine häiritud. Kommutatsiooni võib sel juhtumil parandada lisapooluste mähistega rööbiti ühendatud induktiivpooliga. Kui induktiivpooli ajakonstant

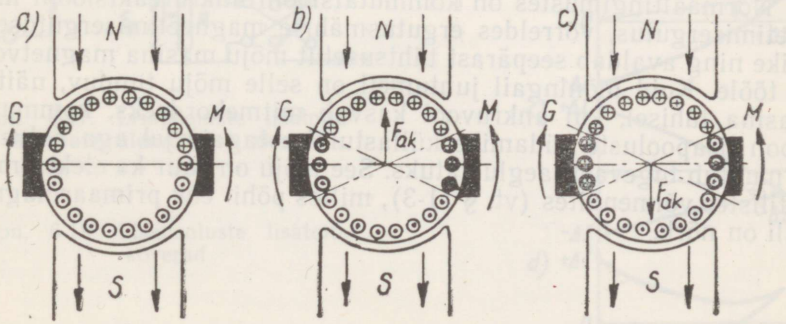
$$T_{ip}=\frac{L_{ip}}{r_{ip}}$$

on tunduvalt suurem lisapooluste mähise ajakonstandist, siis muutub vool selles poolis, võrreldes vooluga lisapooluste mähises, küllalt aeglaselt. Seepärast fikseeritakse ankruvoolu järske muutusi ΔI selle mähisega. Et mähist läbib ainult osa ankru koguvoolust, siis voolu suhteline muutumine lisapooluste mähises on suurem kui ankrumähises. Niisugune lisapooluse mähise voolu «forsseerimine» võimaldab saavutada selle magnetvoo palju kiiremat muutumist ning sellega kompenseerida teataval määral pöörisvoolude mõju magnetahelas. Kuid kõige efektiivsemaks kommutatsiooni parandamise abinõuks järsult muutuva koormusega masinates või toitevoolu tugeval pulsatsioonil on nii lisapooluste südamike kui ka masina ikke valmistamine elektrotehnilisest lehtterasest.

Kommutatsiooni parandamise efektiivseks abinõuks järsult vahelduval koormusel on samuti kompensatsioonimähise kasutamine, mis väldib ringtule tekkimist, aga samuti parandab lisapooluste toime tingimusi. Masina tunduvatel ülekoormustel, eriti lühistel, küllastuvad lisapooluste südamikud suurte puistevoogude tõttu kõige enne, mistõttu nad ei ole enam võimelised kompenseerima reaktiiv-elektromotoorjõudu ning kommutatsioon halveneb. Kompensatsioonimähise olemasolul lisapooluste puistevoog väheneb tunduvalt, mille tagajärjel nende õige toimimise piirkond suureneb.

6-7. KOMMUTATSIOONI ANKRUREAKTSIOON

Kommutatsiooni kõrvalekaldumisel lineaarsest loovad voolud kommuteeritavates sektsioonides peale 5. peatükis vaadeldud reaktsiooni veel lisa-ankrureaktsiooni.



Joon. 6-16. Kommutatsiooni ankrureaktsioon

Joon. 6-16 on skemaatiliselt näidatud kahepooluseline generaator koos geomeetrilisele neutraalile paigutatud harjadega. Harjad on kujutatud küllalt laiadena, et näidata nende all olevat kolme kommuteeritavat sektsiooni, mis on joonestatud paksema joonega ringikestena.

Joon. 6-16, *a* vastab lineaarkommutatsioonile. Kui keskmises kommuteeritavas sektsioonis on vool võrdne nulliga, siis äärmistes sektsioonides on vooludel vastupidised märgid. Nagu on näha joon. 6-16, *a*, ühtib voolude jagunemise sümmeetriatelg sel juhul geomeetrilise neutraaliga. Sel juhtumil ei avalda kommuteeritavad sektsioonid mingit täiendavat mõju pooluste väljale ja kommutatsiooni ankrureaktsioon puudub.

Maksimaalselt aeglustatud kommutatsiooni idealiseeritud juhtumile, kui vool kommuteeritavas sektsioonis säilib suuruselt ja suunalt kommuteerimisperioodi lõpuni muutumatuna ja seejärel hetkeliselt muudab oma märki, vastab joon. 6-16, *b* näidatud voolude jaotus. Sellest joonisest järeldub, et aeglustatud kommutatsiooni korral loovad kommuteeruvate sektsioonide voolud generaatoris demagneetiva ankrureaktsiooni, mida nimetatakse k o m m u t a t s i o o n i ankrureaktsiooniks. Kiirendatud kommuteerimise korral tekib generaatoris aga magneetiv kommutatsiooni ankrureaktsioon (joon. 6-16, *c*). Mootoris osutub kommutatsiooni ankrureaktsioon aeglustatud kommutatsioonil magneetivaks ning kiirendatud kommutatsioonil — demagneetivaks.

Maksimaalselt aeglustatud ning kiirendatud kommutatsioonil on kommutatsiooni ankrureaktsiooni magneetimisergutus maksimaalne. Selle väärtus ühe pooluse kohta võrdub

$$F_{ak.max} = \frac{1}{2} \frac{D_a}{D_k} b_h A_a \qquad (6\text{-}39)$$

Tegelikult F_{ak} arvutatakse piirides $F_{ak} = 0 \ldots F_{ak.max}$.

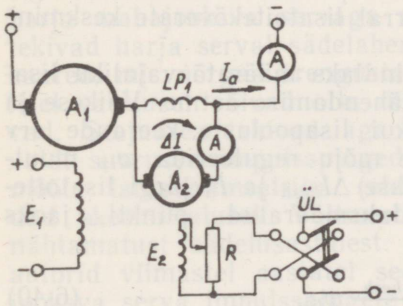
Normaaltingimustes on kommutatsiooni ankrureaktsiooni magneetimisergutus, võrreldes ergutusmähise magneetimisergutusega, väike ning avaldab seepärast tähtsusetut mõju masina magnetvoole ja tööle. Kuid mõningail juhtumeil on selle mõju tunduv, näiteks masina lühisel, kui ankruvool kasvab mitmekordseks, kommutatsioon lisapooluste südamike küllastumise tagajärjel aga halveneb ja muutub tugevasti aeglustatuks. See mõju on suur ka elektromagnetilistes võimendites (vt. § 11-3), milles põhi- ehk primaarmagnetväli on nõrk.

6-8. KOMMUTATSIOONI EKSPERIMENTAALNE KONTROLLIMINE JA SEADISTAMINE

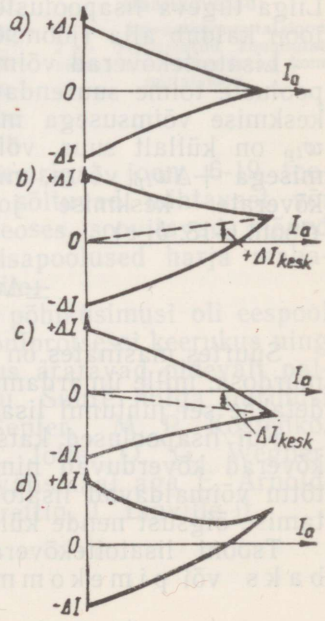
Kommutatsiooniprotsessi keerukuse tõttu baseerub selle teoreetiline analüüs real lihtsustustel. Seepärast on kommutatsiooni arvutus masinate projekteerimisel ligikaudne, mistõttu ongi suur tähtsus kommutatsiooni uurimise eksperimentaalsetel meetoditel. Seeria- ja individuaaltootmise masinate katseeksemplaride kommutatsiooni lõplik seadistamine toimub alati pärast nende eksperimentaalset uurimist.

Vaatleme kommutatsiooni eksperimentaalse kontrollimise levinumaid meetodeid.

Lisapooluste lisatoitemeetod. Joon. 6-17 on näidatud katse läbiviimise elektriline skeem. A_1 on katsetatava masina ankur, E_1 — masina ergutusmähis ja LP_1 — lisapooluste mähis; A_2 — abigeneraatori ankur lisapooluste toiteks, E_2 — abigeneraatori ergutusmähis, R — ergutusvoolu reguleerimise reostaat ja $ÜL$ — ümberlüliti abigeneraatori polaarsuse muutmiseks. Masina katsetamisel koormatakse selle ankrut ja lisapooluste mähist vooluga I_a, abigeneraatoriga juhitakse aga läbi mähise LP_1 lisavool («lisatoitevool») $+ \Delta I$, mille tagajärjel läbi lisapooluste mähise läheb vool



Joon. 6-17. Lisapooluste lisatoitekõverate ülesvõtmise skeem



Joon. 6-18. Lisapooluste lisatoitekõverad

$I_a \pm \Delta I$. Seejuures võetakse üles nn. lisatoitekõverad, mis väljenduvad sõltuvustega $+\Delta I = f(I_a)$ ja $-\Delta I = f(I_a)$ harjade kindlaksmääratud sädelusastmetel (1, $1\frac{1}{4}$ või $1\frac{1}{2}$).

Kõverate ülesvõtmist võib alustada tühijooksust ($I_a = 0$). Siis on ka $e_r = 0$. Toites eelnevalt pooluseid algul ühes, seejärel teises suunas, määrame kindlaks $I_a = 0$ korral voolude $+\Delta I$ ja $-\Delta I$ suurused, mis põhjustavad kindlaksmääratud sädelusastme. Sädelemise põhjuseks on sel puhul vool lühistatud sektsioonis. Viimane tekitatakse tasakaalustamata kommuteeriva elektromotoorjõuga e_k, mis indutseeritakse lisapooluste vooga lühistatud sektsioonides. Õigesti projekteeritud ja korralikult valmistatud masinates on voolud $+\Delta I$ ja $-\Delta I$ harjade paiknemisel geomeetrilisel neutraaljoonel $I_a = 0$ korral ligikaudu võrdsed.

Seejärel fikseerime ankrus A_1 mingi voolu I_a ja määrame uuesti voolud $+\Delta I$ ja $-\Delta I$, viies sädelemise harjadel etteantud astmeni jne.

Voolu I_a suurenemisel kommutatsioonitingimused halvenevad ja $+\Delta I$ vastavad väärtused vähenevad. Õigesti projekteeritud lisapooluste korral koonduvad lisatoitekõverad abstsisstelje mingis punktis (joon. 6-18, *a*). Kui lisapooluste mõju on nõrk, siis lisatoitekõverate keskjoon kaldub üles (kriipsjoon joon. 6-18, *b*), sest et sel puhul saavutatakse parimad kommutatsioonitingimused lisapooluste mõju tugevdamisega, s. t. positiivse lisatoitevooluga. Liiga tugeva lisapooluste toime korral lisatoitekõverate keskmine joon kaldub alla (joon. 6-18, *c*).

Lisatoitekõverad võimaldavad kindlaks määrata vajaliku lisapooluste toime suurendamise või vähendamise astme. Väikese ja keskmise võimsusega masinates, kui lisapooluste keerdude arv w_{lp} on küllalt suur, võib viimaste mõju reguleerida w_{lp} muutmisega $+\Delta w_{lp}$ võrra, mis määratakse ΔI_{kesk} ja I_a järgi lisatoitekõverate keskmise joone kindlaksmääratud punkti jaoks (joon. 6-18, *b*, *c*):

$$\pm\Delta w_{lp} = \frac{\pm\Delta I_{kesk}}{I_a} w_{lp}. \qquad (6\text{-}40)$$

Suurtes masinates on w_{lp} väike ja Δw_{lp} võib moodustada keeru murdosa, mille ümardamine põhjustaks suure vea. Seepärast muudetakse sel juhtumil lisapooluse õhupilu.

Kui lisapoolused katse tingimustes küllastuvad, siis lisatoitekõverad kõverduvad ning painduvad üles (joon. 6-18, *d*). Seetõttu võimaldavad lisatoitekõverad hinnata ka lisapooluste arvutamise õigsust nende küllastumise seisukohast.

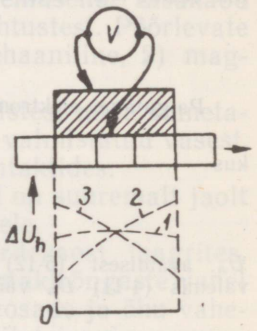
Tsooni lisatoitekõverate vahel nimetatakse s ä d e l u s v a b a k s või p i m e k o m m u t a t s i o o n i t s o o n i k s. Sõnasõnali-

ses mõttes on see õige, kui kõverad võetakse üles sädelusastme 1 jaoks. Kuid tihti on masinatel nimivoolu korral suurem sädelusaste, ning siis ei ole lisatoitekõverate ülesvõtmisel 1. astmel mõtet.

Lisatoitekõveraid võib üles võtta kommutaatori pinna ja harjade korrasolekul ning alles pärast harjade mitmetunnist töötamist kommutaatoril koormuse all. Kõverate punktide hajumise vältimiseks on vaja jälgida mingi ühe harja sädelemist. Kogu katse tervikuna nõuab kogemusi ja vilumust.

Lisatoitemeetodi esitas V. T. Kasjanov.

Potentsiaalikõverate ülesvõtmisel mõõdetakse voltmeetriga pingelangu ΔU_h harja ja kommutaatori vahel piki harjaga kaetud kommutaatori kaart (joon. 6-19). Voltmeeter ühendatakse kommutaatoriga viimasel nihutatava kitsa abiharja kaudu. Potentsiaalikõverate kuju sõltub kommutatsiooni iseloomust (joon. 6-19) ning võimaldab seepärast teha kvalitatiivse iseloomuga järeldusi, eriti lisapooluste mõju osas. Kuid otsast kvantitatiivset hinnangut ei ole võimalik selle meetodiga anda.



Joon. 6-19. Harja potentsiaalikõverad:
1 — lineaarkommutatsioon; *2* — aeglustatud kommutatsioon; *3* — kiirendatud kommutatsioon

Impulsspingete mõõtmine harja mahajooksval serval. Kui kommutatsioon on aeglustatud ning kommuteeritava sektsiooni lühistatud vooluahela katkestamisel harja mahajooksva servaga vool katkeb, tekivad harja serval sädelahendused ning kaared, mis nõrgas arengustaadiumis välisel vaatlusel võivad olla mittemärgatavad. Seejuures tekivad aga mõnekümne voldi suurused impulsspinged, mida võib mõõta lampvoltmeetriga (elektronvoltmeetriga) joon. 6-19 toodud skeemi alusel. Voltmeetri näidud sõltuvad nähtavast või nähtamatust sädelusastmest. Sellega seoses soovitavad mõned autorid viimastel aastatel seadistada lisapoolused harja mahajooksva serva impulsspingete miinimumile.

Lõpuks märgime, et kommutatsiooni põhiküsimusi oli eespool vaadeldud küllalt lühidalt. Kommutatsiooniprotsessi keerukus ning selle parandamise suur praktiline tähtsus äratavad pidevalt paljude uurijate huvi selle küsimuse vastu. Suure hulga uurimisi NSV Liidus on sel alal teinud K. I. Senfer, M. P. Kostenko, O. B. Bron, V. T. Kasjanov, A. B. Joffe, O. G. Wegner, M. F. Karasjov, E. M. Sinelnikov jt., välismaal aga E. Arnold, B. Lamme, L. Dreifuss, A. Modeau, K. Trettin, T. Linville jt.

6-9. ALALISVOOLUMASINA PIIRVÕIMSUS

Võimsust, millele võib valmistada alalisvoolumasina, piiratakse kommutatsioonitingimustega, s. t. reaktiiv-elektromotoorjõu e_r ja lubatava keskmise pinge suurusega kommutaatorilestade vahel $u_{k\,kesk}$. Samuti piirab seda mehaanilise tugevuse tingimuste alusel määratav ankru lubatud ringkiirus v_a. Leiame alalisvoolumasina võimsuse sõltuvuse neist suurustest.

Paigutame avaldisse (4-15) valemist (6-28) määratava l_δ väärtuse, aga samuti ka

$$D_a = \frac{v_a}{\pi n}. \tag{6-41}$$

Siis saame ühe otsitavatest seostest kujul

$$P_{em} = \frac{\alpha_\delta B_\delta}{2\xi w_s} \cdot \frac{v_a e_r}{n}. \tag{6-42}$$

Paigutame elektromagnetilise võimsuse avaldisse

$$P_{em} = E_a I_a = k_e U_a I_a,$$

kus

$$k_e = \frac{E_a}{U_a},$$

U_a avaldisest (5-12) ja I_a avaldisest (4-11). Asendades samaaegselt valemis (4-11) D_a väärtuse valemi (6-41) järgi ja arvestades, et

$$N = 2w_s K,$$

saame teise otsitava seose

$$P_{em} = \frac{k_e A_a}{2w_s} \cdot \frac{a}{p} \cdot \frac{v_a u_{k\,kesk}}{n}. \tag{6-43}$$

Avaldistest (6-42) ja (6-43) nähtub, et alalisvoolumasina piirvõimsus on pöördvõrdeline pöörlemiskiirusega.

Suurtes masinates $w_s = 1$. Kui peale selle valida $\xi = 4 \cdot 10^{-6}$ H/m, $k_e = 0{,}97$, $\alpha_\delta = 0{,}72$, $B_\delta = 1{,}0$ T, $A_a = 55\,000$ A/m, $e_r = 90$ V, $u_{k\,kesk} = 18$ V ja $v_a = 70$ m/s, siis valemi (6-42) alusel

$$P_{em} = \frac{56{,}5 \cdot 10^6}{n}\ [\mathrm{W}] = \frac{3{,}4 \cdot 10^6}{n_{\mathrm{p/min}}}\ [\mathrm{kW}] \tag{6-44}$$

ja valemi (6-43) alusel

$$P_{em} = \frac{a}{p} \cdot \frac{33{,}5 \cdot 10^6}{n}\ [\mathrm{W}] = \frac{a}{p} \cdot \frac{2 \cdot 10^6}{n_{\mathrm{p/min}}}\ [\mathrm{kW}]. \tag{6-45}$$

Näiteks kahekäigulise silmusmähise korral $(a/p = 2)$ ja $n_{p/min} = 500$ [p/min] määrame valemiga (6-44) $P_{em} = 6800$ kW ja valemiga (6-45) $P_{em} = 8000$ kW. Ühekäigulise silmusmähise korral $(a/p = 1)$ ja $n_{p/min} = 500$ [p/min] saame vastavalt $P_{em} = 6800$ kW ja $P_{em} = 4000$ kW, s. t. lubatava $u_{k\,kesk}$ ettemääratava kitsenduse tõttu võib sel juhtumil luua masina ainult võimsusele $P_{em} = 4000$ kW.

Käesoleval ajal on ehitatud masinaid võimsusega $P_{em} = \frac{(3{,}0 \cdot 10^6)}{n_{p/min}}$ [kW].

Seitsmes peatükk

ELEKTRIMASINATE KAOD JA KASUTEGUR

7-1. KAOD

Üldsätteid. Elektrimasina töötamisel kulub osa tarbitavast energiast kasutult ja hajub soojuse näol. Kasutult kulunud energia võimsust nimetatakse kaovõimsuseks ehk lihtsalt kadudeks. Elektrimasinates tekkivad kaod jaotatakse põhi- ja lisakadudeks. Põhikaod tekivad masinas toimuvate põhiliste elektromagnetiliste ja mehaaniliste protsesside tulemusena. Lisakaod on tingitud mitmesugustest teisejärgulistest nähtustest. Pöörlevate elektrimasinate põhikaod on järgmised: 1) mehaaniline, 2) magnetiline ehk teraseskadu ja 3) elektriline.

Viimase hulka kuulub elektriline kadu mähistes, mida nimetatakse ka vaseskaoks, kuigi mähised ei ole alati valmistatud vasest, kaod reguleerimisreostaatides ja kaod harikontaktides.

Käesolevas peatükis vaadeldavad küsimused on suuremalt jaolt ühised nii alalis- kui ka vahelduvvoolumasinatele.

Mehaaniline kadu p_{meh} koosneb: 1) hõõrdekaost laagrites, 2) hõõrdekaost harjade ja kommutaatori või kontaktrõngaste vahel ning 3) ventilatsioonikaost, mis hõlmab masinaosade ja õhu vahelisest hõõrdest tingitud ning teisi masina ventilatsiooniga seoses olevaid kadusid (väljuva õhu kineetiline energia ning kaod ventilaatoris). Sageli jahutatakse elektrimasinaid mitte õhuga, vaid vesiniku või veega ja vastavad kaod kuuluvad samuti ventilatsioonikao hulka.

Kadu laagrites $p_{\rho l}$ arvutatakse masinaelementide ja elektrimasinate projekteerimise kursustes käsitletavate seoste põhjal. See kadu sõltub laagrite tüübist (veere- või liugelaagrid), hõõrduvate pindade seisukorrast, määrdest jne. Vajab allakriipsutamist, et antud masina puhul sõltub see kadu ainult pöörlemiskiirusest ega sõltu koormusest.

Harjade hõõrdekadu saab arvutada valemiga

$$p_{\rho h} = k_{\rho h} f_h S_h v_k, \qquad (7\text{-}1)$$

kus $k_{\rho h}$ on harjade ja kommutaatori või kontaktrõngaste vaheline hõõrdetegur ($k_{\rho h} = 0{,}15 \ldots 0{,}30$);

f_h — erisurve harjale (surve harja pinnaühikule);

S_h — kõikide harjade summaarne kontaktpind;

v_k — kommutaatori või kontaktrõngaste ringkiirus.

Ventilatsioonikadu $p_{\rho h}$ sõltub masina konstruktsioonist ja ventilatsioonitüübist. Selle kao arvutamise üksikasju käsitletakse elektrimasinate projekteerimise kursustes. Juhul kui masinat ei

ventileerita sisseehitatud, vaid eraldi paikneva ventilaatoriga, arvatakse ventilatsioonikao hulka ka ventilaatori ajami poolt tarbitav võimsus.

Sisseehitatud ventilaatoriga endaventilatsiooniga masinate ventilatsioonikadu arvutatakse sageli alljärgneva empiirilise valemiga:

$$p_{\rho v} = 1{,}75 Q v^2 \text{ [W]}, \tag{7-2}$$

kus Q on masinast läbisurutava õhu hulk, m³/s;
v — ventilaatori tiibade välimiste otste ringkiirus, m/s.

Et Q on võrdeline v-ga, siis seosest (7-2) järeldub, et ventilatsioonikadu $p_{\rho v}$ on võrdeline masina pöörlemiskiiruse kolmanda astmega.

Summaarne mehaaniline kadu

$$p_{meh} = p_{\rho l} + p_{\rho v} + p_{\rho h}. \tag{7-3}$$

Ülaltoodust järeldub, et antud masina mehaaniline kadu p_{meh} sõltub ainult pöörlemiskiirusest ega sõltu koormusest. 10 ... 500 kW võimsusega alalisvoolumasinate mehaaniline kadu p_{meh} moodustab vastavalt ligikaudu 2 ... 0,5% masina nimivõimsusest.

Magnetiline kadu (teraseskadu) p_{te} hõlmab kadu, mis tekib terassüdamikus pöörisvoolude ja hüstereesi tagajärjel (vt. § S-4). Selle kao arvutamiseks jaotatakse südamik sellisteks osadeks, et iga osa ulatuses magnetiline induktsioon on muutumatu. Näiteks alalisvoolumasinates arvutatakse eraldi kadu ankrusüdamikus

$$p_{tea} = k_{tea} p_{1,0/50} B_a^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} G_{tea} \tag{7-4}$$

ja ankru hammastes

$$p_{tez} = k_{tez} p_{1,5/50} \left(\frac{B_z}{1,5}\right)^2 \left(\frac{f}{50}\right)^{1,3} G_{tez}, \tag{7-5}$$

kus $p_{1,0/50}$ ja $p_{1,5/50}$ on magnetiline kadu terase mahuühiku kohta sagedusel 50 Hz ja induktsioonidel vastavalt $B = 1{,}0$ T ja $B = 1{,}5$ T;

B_a ja B_z — keskmised induktsiooni väärtused ankru ikkes ja hammastes;

G_{tea} ja G_{tez} — ankru ikke ja hammaste terase mass;

k_{tea} ja k_{tez} — tegurid, mis võtavad arvesse kadude suurenemist terase töötlemistehnoloogia tagajärjel (kalestumine stantsimisel, isoleerimata leheosade kokkupuutumine pakis) ning induktsiooni ebaühtlase jaotumise ja mittesiinuselise ajalise muutumise tõttu.

Alalisvoolumasinates võib võtta $k_{tea} = 3{,}6$ ja $k_{tez} = 4{,}0$.

Magnetilise kao hulka kuulub ka see lisakadu, mis sõltub masina põhivoo suurusest (pooluste voost) ja on tingitud südamike hambulisusest. Seda kadu nimetatakse mõnikord ka tühijooksu lisakaoks, sest see esineb ergutatud masinas juba tühijooksul.

Nimetatud kao hulka kuulub alalisvoolumasinates eelkõige ankru hambulisusest tingitud pinnakadu poolusekingades p_p. Tingituna hammaste ja uurete olemasolust pöörleval ankrul pulseerub magnetiline induktsioon igas poolusekinga pealispinna punktis (vt. joon. 2-4) sagedusega

$$f_z = Zn,$$

omades maksimaalväärtust, kui vaadeldava punkti vastas paikneb ankru hammas ja minimaalväärtust, kui see punkt on kohakuti ankru uurdega. Pulsatsiooni tagajärjel indutseeritakse poolusekingades pöörisvoolud, kusjuures nad kulgevad ainult õhukeses pealmises kihis, kuna f_z väärtus on tuhande ja rohkem hertsi piirides. Nende kadude suurus sõltub: 1) induktsiooni suurusest, mis on suurem ankru avatud uurete puhul, 2) pulsatsiooni sagedusest f_z ja 3) pooluste teraslehtede paksusest ja nendevahelise isolatsiooni kvaliteedist poolusekingade pealispinnal.

Kui alalisvoolumasinatel on uurded ka poolusekingades (kompensatsioonimähise olemasolul), siis ankru hammastes ja poolustes tekivad nende vastastikuse liikumise tagajärjel magnetvoo pulsatsioonid. Hambaid läbivad vood on maksimaalsed, kui ankru hambad on kohakuti pooluste hammastega, ning minimaalsed, kui hambad on kohakuti uuretega. Nende pulsatsioonide sagedus on samuti suur. Seejuures tekib pulsatsioonikadu p_{puls} hammastes ning samuti pinnakadu ankru pealispinnal.

Analoogiline südamike hambulisusest tingitud ja põhimagnetvoo suurusest sõltuv pinna- ning pulsatsioonikadu tekib ka vahelduvvoolumasinates. Kadu p_{pind} ja p_{puls} arvutatakse elektrimasinate projekteerimise kursustes toodud valemite abil.

Tühijooksu lisakao hulka kuulub ka kadu, mis tekib traatbandaažides, mähisehoidikuis ja teistes pooluste magnetväljas pöörlevates masinaosades.

Summaarne magnetiline kadu

$$p_{te} = p_{tea} + p_{tez} + p_{pind} + p_{puls}. \qquad (7\text{-}6)$$

Elektriline kadu p_{el} arvutatakse igas mähises valemi $p_{el} = I^2 r$ abil. Mähise takistus sõltub mähise temperatuurist. Seepärast nõuab ГОСТ 183-55 kadude määramist A, E ja B klassi isolatsiooniga mähistes arvutuslikul temperatuuril 75 °C ning F ja H klassi isolatsiooniga mähistes temperatuuril 115 °C. Alalisvoolu-

normaalmasinatel on kaks elektriahelat: ankru- ja ergutusahel. Seepärast arvutatakse eraldi kadu ankruahelas p_{ela} ja ergutusahelas p_{elerg}.

Kadu mähistes võib avaldada ka mähise voolutiheduse j ja massi (isolatsioonita) G kaudu. Tõepoolest

$$p_{el\ mähis} = I^2 r = I^2 \frac{\varrho l}{s} = \left(\frac{I}{s}\right)^2 \frac{\varrho l s \gamma}{\gamma},$$

kus l on mähise juhtmete üldpikkus;
s — juhtme ristlõige;
γ — juhtmematerjali tihedus;
ϱ — eritakistus.

Kuid $\left(\frac{I}{s}\right)^2 = j^2$ ja $ls\gamma = G$.

Seepärast

$$p_{el\ mähis} = \frac{\varrho}{\gamma} j^2 G.$$

Näiteks vasel $\gamma = 8{,}9$ g/cm^3 $= 8{,}9 \cdot 10$ kg/m^3 ja temperatuuril 75 °C

$$\varrho = \frac{1}{4600}\ \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{cm} = \frac{1}{46 \cdot 10^6}\ \Omega \cdot \text{m}.$$

Kui võtta j A/m^2, saame

$$p_{el\ mähis} = \frac{1}{46 \cdot 10^6 \cdot 8{,}9 \cdot 10^3} (10^6 j)^2 G = 2{,}44 j^2 G. \qquad (7\text{-}7)$$

Seega määrab valem (7-7) vaskmähises massiga G [kg] tekkiva kao temperatuuril 75 °C ja voolutihedusel j [A/m^2].

Elektrilise kao hulka kuuluvad ka kaod reguleerimisreostaatides ja harikontaktides. Kao suurus sama polaarsusega harikontaktides arvutatakse valemi abil

$$p_{el\ h} = \Delta U_h I, \qquad (7\text{-}8)$$

kus ΔU_h on pingelang ühe harja kontaktpinnal. Et ΔU_h sõltuvus mitmesugustest suurustest ja teguritest on keeruline, võetakse arvutuste lihtsustamiseks ГОСТ 183-55 kohaselt süsi- ja grafiitharjadele $\Delta U_h = 1$ V ja metall-süsiharjadele $\Delta U_h = 0{,}3$ V.

Lisakadu p_{li}. Sellesse rühma liigitatakse kaod, mis on tingitud mitmesugustest teisejärgulistest protsessidest masina koormamisel. Seepärast nimetatakse neid koormusvoolust sõltuvaid kadusid mõnikord ka koormuse lisakaoks.

Alalisvoolumasinate koormamisel tekib vaadeldav kadu ankru ristreaktsioonist (vt. § 5-1) põhjustatud õhupilu magnetvälja kõvera moonutuste tagajärjel. Selle tulemusena jaotub magnet-

voog hammastes ja ankru ikke ristlõigetes ebaühtlaselt: poolusekinga ühes servas induktsioon hammastes ja ankru ikkes väheneb, kuid teises servas suureneb. Selline magnetvoo ebaühtlane jaotumine põhjustab magnetilise kao suurenemist, samuti nagu voolu ebaühtlane jaotumine juhtmes (näiteks pinnaefekti tagajärjel) kutsub esile elektrilise kao suurenemise. Magnetvoo sellise ebaühtlase jaotumise tõttu suureneb ka pinnakadu poolusekingades. Kompensatsioonimähiste olemasolu korral vaadeldud osa lisakaost praktiliselt puudub.

Teine osa lisakaost alalisvoolumasinates on seotud kommutatsiooniga. Kommuteeritavate sektsioonide puistevoogude ajalisest muutusest tingituna (vt. joon. 6-9) indutseeritakse mähise juhtmetes pöörisvoolud. Täiendavaid kadusid kutsub esile ka kommutatsiooni lisavool.

Esineb veel teisigi lisakao tekkimise põhjusi (pöörisvoolud kinnitusdetailides jne.).

Et lisakaod olenevad paljudest t e g u r i t e s t, on nende arvutamiseks kasutatavad valemid keerulised ning mitte eriti täpsed. Samuti on raskendatud nende kadude katseline määramine. Seepärast määratakse praktikas lisakadusid kõige sagedamini kogemuste põhjal, teatava protsendina nimivõimsusest. ГОСТ 183-55 järgi on need kaod kompenseerimata alalisvoolumasinate puhul nimikoormusel 1% generaatori kasulikust võimsusest või mootori poolt võrgust võetavast elektrilisest võimsusest ning kompenseeritud masinate puhul vastavalt 0,5%. Teiste koormuste jaoks need kaod arvutatakse ümber võrdeliselt koormusvoolu ruuduga.

Kõik lisakaod, mis ei ole vahetult seotud masina mähistes toimuvate elektriliste protsessidega, kaetakse masina võllilt saadava mehaanilise võimsuse arvel.

Summaarne ehk kogukadu p_Σ kujutab endast kõigi kadude summat:

$$p_\Sigma = p_{meh} + p_{te} + p_{el} + p_{li}. \qquad (7\text{-}9)$$

Tabel 7-1

Kaovõimsused alalisvoolugeneraatoris nimiandmetega 500 kW, 460 V, 375 pööret/min

Kaovõimsuse liik	Kaovõimsus vattides	Kaovõimsuse suurus protsentides kogukaovõimsusest
Mehaaniline kaovõimsus	3 200	8,2
Magnetiline kaovõimsus	9 200	23,3
Elektriline kaovõimsus	22 000	55,8
Lisakaovõimsus	5 000	12,7
Summaarne kaovõimsus	39 400	100

Tabelis 7-1 on näitena toodud kaoandmed kaasaegses alalisvoolumasinas nimikoormusel.

7-2. KASUTEGUR

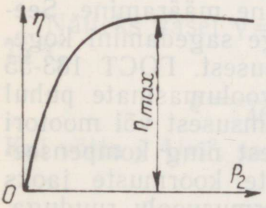
Üldsätteid. Kasutegur määratakse kasuliku ehk väljundvõimsuse P_2 ja tarbitava võimsuse P_1 suhtena:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \tag{7-10}$$

ehk protsentides

$$\eta_{\%} = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100. \tag{7-11}$$

Kaasaegsed elektrimasinad on kõrge kasuteguriga. Nii on 10-kW alalisvoolumasina kasutegur 83 ... 87%, 100-kW — 88 ... ... 93% ja 1000-kW — 92 ... 96%. Ainult väikeste masinate kasutegur on suhteliselt madal. Näiteks 10-W alalisvoolumootori kasutegur on 30 ... 40%.



Joon. 7-1. Elektrimasina kasuteguri sõltuvus koormusest

Elektrimasina kasuteguri kõver $\eta = f(P_2)$ kasvab koormuse suurenemisel esialgu kiiresti, saavutab maksimaalväärtuse (tavaliselt nimikoormusele lähedasel koormusel) ja suurtel koormustel väheneb (joon. 7-1). Viimane asjaolu on seletatav sellega, et üksikud kaod (elektriline kadu $I_a^2 r_a$ ja lisakadu) kasvavad kasulikust võimsusest kiiremini.

Otsene ja kaudne meetod kasuteguri määramiseks. Otsene meetod kasuteguri määramiseks, mille puhul valemis (7-10) kasutatakse katsetulemusena saadud P_1 ja P_2 väärtusi, võib anda olulisi ebatäpsusi, sest esiteks P_1 ja P_2 omavad lähedasi väärtusi ja teiseks on nad katseliselt vaid ligikaudselt määratavad. Kõige suuremate raskuste ja ebatäpsustega on seotud mehaanilise võimsuse mõõtmine.

Kui näiteks võimsuste tegelikke väärtusi $P_1 = 1000$ kW ja $P_2 = 950$ kW on võimalik määrata täpsusega 2%, võime kasuteguri tegeliku väärtuse

$$\eta = \frac{950}{1000} = 0{,}95$$

asemel saada

$$\eta = \frac{950 + 0{,}02 \cdot 950}{1000 - 0{,}02 \cdot 1000} = \frac{1{,}02 \cdot 950}{0{,}98 \cdot 1000} = 0{,}987$$

või

$$\eta = \frac{0{,}98 \cdot 950}{1{,}02 \cdot 1000} = 0{,}913.$$

Seepärast näeb ГОСТ 183-55 ette, et masinatel, mille $\eta > 50\%$, tuleb kasutegur määrata kaudsel meetodil, mille puhul katseliselt määratakse kogukadu p_Σ.

Asetades valemisse (7-10)

$$P_2 = P_1 - p_\Sigma,$$

saame

$$\eta = 1 - \frac{p_\Sigma}{P_1}. \qquad (7\text{-}12)$$

Kasutades aga asendust

$$P_1 = P_2 + p_\Sigma,$$

saame valemi teiseks kujuks:

$$\eta = 1 - \frac{p_\Sigma}{P_2 + p_\Sigma}. \qquad (7\text{-}13)$$

Et elektrivõimsusi on võimalik kõige lihtsamalt ja täpsemini mõõta (mootoritel P_1 ja generaatoritel P_2), sobib mootoritele rohkem valem (7-12) ja generaatoritele (7-13). Kadude ja kogukao p_Σ katselise määramise meetodeid kirjeldatakse elektrimasinate kohta kehtivates standardites ning elektrimasinate katsetamise ja uurimise juhistes. Isegi siis, kui p_Σ määrata tunduvalt väiksema täpsusega kui P_1 või P_2, saame siiski täpsemaid tulemusi, kasutades valemi (7-10) asemel valemeid (7-12) ja (7-13).

Kasuteguri maksimumi tingimused. Üksikud kaoliigid sõltuvad koormusest erinevalt. Tavaliselt võib lugeda, et osa kadusid jääb koormuse muutumisel muutumatuks, sest teine osa kadudest muutub.

Näiteks, kui alalisvoolugeneraator töötab muutumatu pöörlemiskiiruse ja muutumatu ergutusvooluga, on mehaaniline kadu ja teraseskadu samuti muutumatud. Seevastu elektriline kadu ankru ja lisapooluste ning kompensatsioonimähistes muutub võrdeliselt I_a^2-ga ja harikontaktides võrdeliselt I_a-ga. Generaatori pinge on seejuures praktiliselt muutumatu ning seepärast saame teatava täpsusastmega $P_2 \sim I_a$.

Seega mõnevõrra idealiseeritud üldjuhtumil võib võtta, et

$$P_2 = U_N I = U_N I_N \frac{I}{I_N}$$

ehk

$$P_2 = k_k P_{2N}, \qquad (7\text{-}14)$$

kus koormatustegur

$$k_k = \frac{I}{I_N} = \frac{P_2}{P_{2N}} \tag{7-15}$$

määrab masina suhtelise koormuse suuruse.

Kogukadu võib samuti väljendada k_k kaudu:

$$p_\Sigma = p_0 + k_k p_1 + k_k^2 p_2, \tag{7-16}$$

kus p_0 on püsikadu, mis ei sõltu koormusest;

p_1 — nimikoormusel k_k esimesest astmest sõltuvate kadude väärtus;

p_2 — nimikoormusel k_k ruudust sõltuvate kadude väärtus.

Asetame P_2 valemist (7-14) ja p_Σ valemist (7-16) kasuteguri valemisse

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + p_\Sigma}.$$

Siis

$$\eta = \frac{k_k P_{2N}}{k_k P_{2N} + p_0 + k_k p_1 + k_k^2 p_2}. \tag{7-17}$$

Selleks, et määrata, missugusel k_k väärtusel kasutegur saavutab maksimaalväärtuse, võtame valemist (7-17) tuletise $\partial\eta/\partial k_k$ ja võrrutame ta nulliga:

$$\frac{\partial \eta}{\partial k_k} = \frac{(p_0 - k_k^2 p_2) P_{2N}}{(k_k P_{2N} + p_0 + k_k p_1 + k_k^2 p_2)^2} = 0.$$

Selle avaldise nimetaja võrdub lõpmatusega, kui $k_k = \infty$. See juhtum ei paku huvi. Seepärast on vaja nulliga võrdsustada lugeja. Seejuures saame

$$p_0 = k_k^2 p_2. \tag{7-18}$$

Seega on kasutegur maksimaalne sellisel koormusel, mille puhul koormuse ruudust sõltuvad muutuvad kaod $k_k^2 p_2$ võrdsustuvad püsikaoga p_0. Valemi (7-18) kohaselt on maksimaalse kasuteguri puhul koormatusteguri väärtus

$$k_k = \sqrt{\frac{p_0}{p_2}}. \tag{7-19}$$

Masina projekteerimisel antud η_{max} väärtuse puhul võib lugeda, et

$$p_0 + k_k^2 p_2 \approx p_\Sigma = \text{const},$$

sest kadu $k_k p_1$ on suhteliselt väike. Muutes seejuures kadude p_0 ja $k_k^2 p_2$ omavahelist suhet, võime saavutada maksimaalse kasuteguri väärtuse koormuse mitmesuguste väärtuste puhul. Kui masin töötab peamiselt nimikoormusele lähedastel koormustel, on kasulik, et k_k väärtus [vt. valemit (7-19)] oleks lähedane ühele. Kui masin töötab peamiselt väikestel koormustel, on kasulik, et k_k [vt. valemit (7-19)] oleks vastavalt väiksem.

Kaheksas peatükk

ELEKTRIMASINATE SOOJENEMINE JA JAHUTUS

8-1. SOOJUSÜLEKANNE ELEKTRIMASINATES

Energiakadu põhjustab soojuse eraldumise ja elektrimasina osade kuumenemise. Soojusülekanne masina enam kuumenenud osadest vähem kuumenenutesse ning ümbritsevasse keskkonda toimub soojusjuhtivuse, kiirguse ja konvektsiooni teel.

Soojusülekanne soojusjuhtivuse teel toimub elektrimasinates peamiselt tahketes kehades (vask, teras, isolatsioon), samal ajal kui gaasides (õhk, vesinik) ning vedelikes (õli, vesi) on peamine tähtsus soojusülekandel konvektsiooni teel.

Kui kahe paralleelse tasandi kumbki pind (näiteks mähise vask ja masina uurde sein) on võrdne S-ga ning kummagi pinna temperatuurid ϑ_1 ja ϑ_2 on konstantsed, siis kantakse ajaühikus läbi nende pindade vahel oleva keskkonna (antud juhtumil isolatsiooni) üle soojushulk

$$Q = \frac{\lambda S}{\delta}(\vartheta_1 - \vartheta_2). \qquad (8\text{-}1)$$

Siin δ on pindadevaheline kaugus, λ — vahekeskkonna soojusjuhtivuse tegur, mis arvuliselt võrdub soojushulgaga, mis kantakse ajaühikus läbi pinnaühiku temperatuuride erinevusel 1 K ning ühe pikkusühikuga võrduva pindadevahelise kauguse puhul.

Metallide soojusjuhtivus on küllalt suur; näiteks vasel $\lambda = 385 \frac{W}{m \cdot K}$, elektrotehnilisel terasel aga $\lambda = 20 \ldots 45 \frac{W}{m \cdot K}$. Elektriisoleermaterjalidel on soojusjuhtivus vastupidi aga väike; näiteks isolatsioonil klass A $\lambda = 0{,}10 \ldots 0{,}13 \frac{W}{m \cdot K}$, klassil B $\lambda = 0{,}15 \ldots 0{,}20 \frac{W}{m \cdot K}$. Seetõttu on temperatuurivahed elektri-

masinate mähiste isolatsioonis tunduvad, mis raskendab mähiste jahtumist ning piirab voolukatte ja -tiheduse suurust.

Klass A isolatsiooniga masinatele on iseloomulikud järgmised suurused: isolatsiooni paksus $\delta = 0{,}5$ mm $= 5 \cdot 10^{-4}$ m, soojusvoog isolatsiooni pinna 1 m² kohta $Q = 2500$ W. Kui eeldada $\lambda = 0{,}125 \frac{W}{m \cdot K}$, siis sellistel tingimustel on vastavalt avaldisele (8-1) temperatuurivahe isolatsioonis

$$\Theta_{isol.} = \vartheta_1 - \vartheta_2 = \frac{Q\delta}{\lambda S} = \frac{2500 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{0{,}125 \cdot 1} = 10 \text{ K}.$$

Vahelduvvoolu kõrgepingemasinates on isolatsiooni paksus mõni millimeeter, mistõttu $\Theta_{isol.} = 20 \ldots 25$ K.

Kiirgumise teel toimuv soojusülekanne. Absoluutselt musta keha korral kehtib Stefan-Boltzmanni seadus:

$$q_{ki} = \alpha_{ki} (\vartheta_{1a}^4 - \vartheta_{2a}^4), \qquad (8\text{-}2)$$

kus q_{ki} on keha ühelt pinnaühikult ühes ajaühikus kiirguv soojushulk;

α_{ki} — kiirgustegur

ϑ_{1a}, ϑ_{2a} — kiirgava pinna ja ümbritseva keskkonna absoluutne temperatuur.

Vastavalt katseandmetele $\alpha_{ki} = 5{,}65 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$. Mitteabsoluutselt (s. o. harilikel) mustadel kehadel, näiteks lakkisolatsiooniga malm- ja teraspindadel väheneb α_{ki} eeltooduga võrreldes 3...10%. Praktilisteks arvutusteks võib avaldisele (8-2) anda järgmise kuju:

$$\vartheta_{1a}^4 - \vartheta_{2a}^4 = (\vartheta_{1a} - \vartheta_{2a})(\vartheta_{1a}^3 + \vartheta_{1a}^2 \vartheta_{2a} + \vartheta_{1a} \vartheta_{2a}^2 + \vartheta_{2a}^3). \qquad (8\text{-}3)$$

Elektrimasinatel muutuvad $\vartheta_{1a} = 273 + \vartheta_1$ ja $\vartheta_{2a} = 273 + \vartheta_2$ kitsastes piirides ning seepärast muutub suhteliselt vähe ka avaldise (8-3) parempoolse osa teine kordaja. Esimene kordaja $\vartheta_{1a} - \vartheta_{2a} = \Theta$ väljendab aga keha ületemperatuuri. Seetõttu võib valemit (8-2) kirjutada järgmisel kujul:

$$q_{ki} = \lambda_{ki} \Theta, \qquad (8\text{-}4)$$

kus λ_{ki} on teisendatud kiirgustegur, mis arvuliselt võrdub ajaühikus ühelt pinnaühikult kiirgunud soojushulgaga ületemperatuuril 1 K. Elektrimasinates on keskmiselt $\lambda_{ki} = 6{,}0 \frac{W}{m^2 \cdot K}$.

Pinnalt S ajaühikus kiirguv kogu soojushulk:

$$Q_{ki} = \lambda_{ki} S \Theta. \tag{8-5}$$

Loomuliku konvektsiooniga soojusülekanne. Kuumenenud kehaga kokkupuutuvad vedeliku- või gaasiosakesed soojenevad, muutuvad kergemaks ning tõusevad seetõttu ülespoole, vabastades oma koha teistele, soojenemata osakestele, mis omakorda soojenedes tõusevad jällegi ülespoole jne. Seda nähtust nimetatakse loomulikuks konvektsiooniks erinevalt kunstlikust konvektsioonist, mis tekitatakse näiteks ventilaatoriga jahutatavale pinnale õhu suunamisega.

Vaatleme algul loomulikku konvektsiooni.

Konvektsiooni teel ajaühikus pinnaühikult ärajuhitav soojushulk määratakse (8-4)-le analoogilise valemiga ning võrdub

$$q_{ko} = \lambda_{ko} \Theta, \tag{8-6}$$

pinnalt pindalaga S aga

$$Q_{ko} = \lambda_{ko} S \Theta. \tag{8-7}$$

Siin λ_{ko} on konvektsiooni soojusülekandetegur, mis võrdub ajaühikus pinnaühikult ärajuhitud soojushulgaga ületemperatuuril 1 K, ning Θ — jahutatava pinna ületemperatuur.

Suurus λ_{ko} sõltub jahutatava pinna mõõtmetest ja kujust, asendist jne. Elektrimasinatel võib õhkkonvektsiooni korral keskmiselt eeldada $\lambda_{ko} = 8 \frac{W}{m^2 \cdot K}$. Konvektsiooni teel toimub soojusülekanne trafomähistelt õlis 15...20 korda intensiivsemalt kui õhus.

Vastavalt valemitele (8-5) ja (8-7) võrdub kiirgumise ja konvektsiooni teel pinnalt eemaldatav soojushulk

$$Q = \lambda_{kk} S \Theta, \tag{8-8}$$

kus

$$\lambda_{kk} = \lambda_{ki} + \lambda_{ko}.$$

Õhu puhul võib keskmiselt võtta $\lambda_{kk} = 14 \frac{W}{m^2 \cdot K}$.

Seoseid (8-5), (8-7) ja (8-8) kasutatakse ületemperatuuri arvutamiseks tingimustes, kui kunstlik konvektsioon puudub, näiteks trafo paagi mitteventileeritava välispinna korral.

Elektrimasinates on mitmesuguste pindade soojuse hajumistingimused kiirguse ja konvektsiooni teel erinevad. Soojuse ärajuhtimine kaasaegsetes ventileeritavates masinates kunstliku konvektsiooniga prevaleerib sedavõrd, võrreldes kiirguse teel eemaldatava soojusega, et viimast harilikult ei arvestata.

Soojuse hajumine kunstliku konvektsiooni teel. Soojuse intensiivsemaks eemaldamiseks kasutatakse harilikult elektrimasinate välis- ja sisepindade õhuga ventileerimist.

Soojuse hajumise suurendamine kunstliku konvektsiooniga toimub mitmesugusel tasemel sõltuvalt puhumise ühtlusest, ventileeritavate pindade kujust jne. Antud küsimuse uurimine komplitseerub elektrimasinate ja nende osade konstruktiivse mitmekesisuse, samuti ka aerodünaamiliste nähtuste keerukuse tõttu masina sisetühimikes ja -kanaleis.

Katsed näitavad, et soojussiirdeteguri määramiseks võib vaadeldaval juhtumil kasutada järgmist ligikaudset empiirilist valemit:

$$\lambda_{ko} = \lambda'_{ko}(1 + C_{ko}\sqrt{v}), \qquad (8\text{-}10)$$

kus λ_{ko} on ventileeritava pinna konvektsioonitegur;
λ'_{ko} — ventileeritava pinna konvektsioonitegur loomulikul konvektsioonil;
v — õhu liikumiskiirus jahutatava pinna suhtes, m/s;
C_{ko} — pinna ventileerimise ühtluse astmest sõltuv empiiriline tegur.

Kui näiteks $v = 25$ m/s ja $C_{ko} = 1{,}3$, siis suureneb soojuse hajumine vastavalt valemile (8-10) 7,5 korda ning õhu jaoks

$$\lambda_{ko} = 8 \cdot 7{,}5 = 60 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2 \cdot \mathrm{K}}.$$

8-2. IDEAALSE HOMOGEENSE TAHKE KEHA SOOJENEMINE JA JAHTUMINE

Soojenemisvõrrand. Kuigi elektrimasin on keeruka ehitusega, võib tema soojenemisprotsessi analüüsi aluseks võtta ideaalse homogeense tahke keha soojenemise teooria. Nimetatud keha all mõistetakse siin keha, millel on ühtlane soojuse hajumine kogu pinnalt ning lõpmata suur soojusjuhtivus, mille tõttu keha kõikidel punktidel on ühesugune temperatuur. Koostame niisuguse keha soojenemise diferentsiaalvõrrandi, milleks vaatleme keha soojusbilanssi.

Eraldugu kehas ajaühikus soojushulk Q. Siis lõpmata väikese ajavahemiku kestel eralduv soojushulk on võrdne $Q\mathrm{d}t$. Osaliselt see soojus akumuleerub kehas, mille tulemusel tõuseb temperatuur, osaliselt aga antakse ära väliskeskkonda.

Kui aja $\mathrm{d}t$ vältel keha temperatuur tõusis $\mathrm{d}\Theta$ võrra, siis selle aja vältel akumuleeruv soojushulk on võrdne $Gc\,\mathrm{d}\Theta$, kus G on keha mass ja c — massi erisoojus.

Olgu vaadeldavas lõpmata väikeses ajavahemikus keha üle-

temperatuur võrdne Θ-ga. Siis on ümbritsevasse ruumi äraantav soojushulk kiirguse, konvektsiooni ja soojusjuhtivuse kaudu aja dt vältel võrdne $S\lambda\Theta\, dt$, kus S on keha pind, λ — pinna summaarne keskmine soojussiirdetegur.

Energia jäävuse seaduse alusel

$$Q\, dt = Gc\, d\Theta + S\lambda\Theta\, dt. \tag{8-11}$$

Enne kui asuda soojenemisvõrrandi (8-11) lahendamisele, teisendame teda veidi.

Väljakujunenud ületemperatuur ja soojenemise ajakonstant. Pärast küllalt pika aja möödumist (teoreetiliselt $t = \infty$ korral) saavutab keha temperatuur püsiväärtuse. Siis $d\Theta = 0$ ja $\Theta = \Theta_\infty$. Paigutades need suurused avaldisse (8-11), saame

$$Q\, dt = S\lambda\Theta_\infty\, dt,$$

millest

$$\Theta_\infty = \frac{Q}{S\lambda}. \tag{8-12}$$

Väljakujunenud ületemperatuur Θ_∞ on seda suurem, mida rohkem eraldub soojust ning mida halvemad on soojuse ärastamise tingimused, s. t. mida väiksem on $S\lambda$.

Jagame avaldise (8-11) mõlemad osad $S\lambda$-ga, rakendame võrdust (8-12) ning tähistame

$$T = \frac{Gc}{S\lambda}. \tag{8-13}$$

Siis saame valemi (8-11) asemel

$$\Theta_\infty\, dt = T\, d\Theta + \Theta\, dt. \tag{8-14}$$

Avaldise (8-14) kõikide liikmete ühik peab olema ühesugune: temperatuur korrutatud ajaga. Seepärast on T-l aja dimensioon, mida võib määrata ka valemi (8-13) abil. Suurust T nimetatakse keha soojenemise ajakonstandiks; vastavalt valemile (8-13) on see seda suurem, mida suurem on keha soojusmahtuvus Gc ja mida väiksem on soojuse ärastamise intensiivsus, s. t. mida väiksem on $S\lambda$.

Kui määrata (8-12) $S\lambda$ ja paigutada valemisse (8-13), saame veel ühe avaldise T määramiseks:

$$T = \frac{Gc\Theta_\infty}{Q}. \tag{8-15}$$

Selle avaldise nimetaja on võrdne kehas akumuleerunud soojushulgaga temperatuuri Θ tõstmiseks suuruseni Θ_∞. Järelikult, vastavalt avaldisele (8-15) on T võrdne ajaga, mille vältel keha

saavutab püsiväärtuse Θ_∞, kui soojusülekanne ümbritsevasse keskkonda puudub ja kogu eralduv soojus salvestub kehas.

Soojenemisvõrrandi lahendamine. Võrrandis (8-14) võib muutujad eraldada ning anda sellele kuju

$$\frac{dt}{T}=\frac{d\Theta}{\Theta_\infty-\Theta}. \tag{8-16}$$

Võrrandi (8-16) integreerimisel saame

$$\frac{t}{T}=-\ln(\Theta_\infty-\Theta)+C. \tag{8-17}$$

Konstant C määratakse algtingimusest: $t=0$ korral on kehal üldjuhtumil mõningane ületemperatuur $\Theta=\Theta_0$. Asetades näidatud suurused t ja Θ võrdusesse (8-17), leiame, et

$$C=\ln(\Theta_\infty-\Theta_0).$$

Paigutame selle väärtuse võrdusesse (8-17) ja muudame märgid. Siis

$$\ln\frac{\Theta_\infty-\Theta}{\Theta_\infty-\Theta_0}=-\frac{t}{T},$$

millest leiame sõltuvuse $\Theta=f(t)$ lõppkuju:

$$\Theta=\Theta_\infty(1-e^{-\frac{t}{T}})+\Theta_0 e^{-\frac{t}{T}}. \tag{8-18}$$

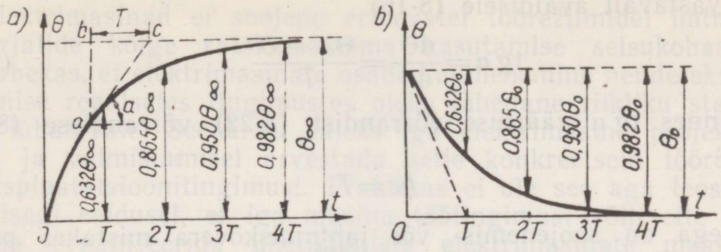
Soojenemise juhtum $\Theta_0=0$ korral. Sel puhul on meil avaldise (8-18) asemel

$$\Theta=\Theta_\infty(1-e^{-\frac{t}{T}}), \tag{8-19}$$

millele vastab soojenemise eksponentkõver, mis on kujutatud joon. 8-1, *a*. Väikeste t korral, kui ka Θ on väike, on soojuse kandumine ümbritsevasse keskkonda samuti väike. Suurem osa soojusest akumuleerub kehas ning selle temperatuur, nagu näha joon. 8-1, *a*, kasvab kiiresti. Seejärel suureneb koos Θ kasvuga soojuse hajumine ning keha temperatuuri kasv aeglustub. Aja $t=\infty$ korral, vastavalt võrrandile (8-19), $\Theta=\Theta_\infty$.

Joon. 8-1, *a* on näidatud Θ väärtused, mis saavutatakse ajavahemike T, $2T$, $3T$ ja $4T$ järel. Sellelt jooniselt on näha, et keha saavutab praktiliselt püsiületemperatuuri ajavahemiku $t=4T$ järel.

Keha jahtumine. Kui kehal on mingi algületemperatuur $\Theta_0\neq 0$, kuid $Q=0$ ning järelikult vastavalt avaldisele (8-12) $\Theta_\infty=0$, siis keha jahtub $\Theta=\Theta_0$-st kuni $\Theta=\Theta_\infty=0$-ni.



Joon. 8-1. Ideaalse homogeense tahke keha soojenemis- (*a*) ja jahtumisköver (*b*)

Paigutades võrrandisse (8-18) $\Theta_\infty = 0$, saame keha jahtumisvõrrandi

$$\Theta = \Theta_0 e^{-\frac{t}{T}}. \qquad (8\text{-}20)$$

Keha eksponent-jahtumisköver, vastavalt võrrandile (8-20), on esitatud joon. 8-1, *b*. Alguses, kui Θ ja vastavalt sellele ka soojuse hajuvus on suur, jahtub keha kiiresti, kuid Θ vähenemisega jahtumine aeglustub. Aja $t = \infty$ korral saavutab keha ümbritseva keskkonna temperatuuri, s. o. $\Theta = 0$-ga.

Keha soojenemise üldjuhtumit, mis on kirjeldatav võrrandiga (8-18), võib valemite (8-19) ja (8-20) alusel vaadelda kui kahe režiimi superpositsiooni: 1) keha soojenemist algületemperatuurist $\Theta_0 = 0$ kuni $\Theta = \Theta_\infty$ ja 2) keha jahtumist $\Theta = \Theta_0$-st kuni $\Theta = 0$-ni. Joon. 8-2 vastab köver *3* võrrandi (8-18) alusel konstrueeritud soojenemisköverale. Selle kõvera võib saada võrranditele (8-19) ja (8-20) vastavate köverate *1* ja *2* ordinaatide liitmisel.

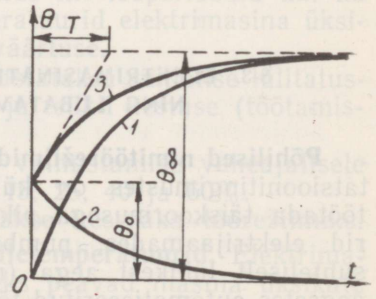
T määramise graafiline meetod. Leiame kõvera $\Theta = f(t)$ puutuja lõigu aluse suuruse *bc* asümptoodil $\Theta = \Theta_\infty$ (joon. 8-1, *a*). Joon. 8-1, *a* järeldub, et

$$bc = \frac{ab}{\operatorname{tg}\alpha} = \frac{\Theta_\infty - \Theta}{\operatorname{tg}\alpha}, \qquad (8\text{-}21)$$

kus α on kõvera $\Theta = f(t)$ puutuja kaldenurk.

Nagu teada

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{d\Theta}{dt}.$$



Joon. 8-2. Ideaalse homogeense tahke keha soojenemise üldjuhtum

Kuid vastavalt avaldisele (8-16)

$$\operatorname{tg}\alpha=\frac{d\Theta}{dt}=\frac{\Theta_\infty-\Theta}{T}. \qquad (8\text{-}22)$$

Pannes $\operatorname{tg}\alpha$ väärtuse võrrandist (8-22) võrrandisse (8-21), saame

$$bc=T.$$

Seega on soojenemis- või jahtumiskõvera mistahes punkti puutuja lõigu alus võrdne soojenemise ajakonstandiga T. Seda kõverate $\Theta=f(t)$ omadust võib rakendada T graafilisel määramisel, katseliselt ülesvõetud kõvera $\Theta=f(t)$ korral. Joon. 8-1, *b* ja 8-2 on näidatud T määramise viis puutuja konstrueerimisega kõvera alguspunktile.

Kokkuvõtlikke märkusi. Eespool oli esitatud ideaalse homogeense tahke keha soojenemisteooria. Elektrimasin ei ole tegelikult selline ideaalne keha, sest ta koosneb mitmesugustest lõplikku soojusjuhtivust omavatest osadest, kusjuures elektriisolatsiooni soojusjuhtivus on küllalt väike. Seepärast on masina üksikutel osadel (mähis, südamikud jne.) erinev temperatuur. Järelikult oleks elektrimasinat palju õigem käsitleda kui paljude homogeensete kehade kogumit, mille vahel toimub soojusvahetus. Tegelikes tingimustes suurus T ei ole samuti täiesti konstantne, sest et soojussiirdetegurid sõltuvad teataval määral temperatuurist. Peale selle ventilatsioonikanaleid läbides õhk või mõni teine soojusvahendi (agens) soojeneb, mistõttu õhu temperatuur jahutatava pinna erinevates osades on erinev.

Seega ei ole soojenemis- ja jahtumiskõverad rangelt võttes eksponentsiaalsed. Kuid enamikul praktilistel juhtumitel ei tee me neid eksponentsiaalseiks lugedes olulist viga, s. t. võime kasutada eespool esitatud ideaalse homogeense keha soojenemisteooriat.

8-3. ELEKTRIMASINATE PÕHILISED NIMITÖÖREŽIIMID NING LUBATAVAD ÜLETEMPERATUURID

Põhilised nimitöörežiimid. Elektrimasinate töörežiimid ekspluatatsioonitingimustes on küllalt mitmekesised. Masinad võivad töötada täiskoormusega pikemat aega (nagu näiteks generaatorid elektrijaamades, pumbaseadmete elektrimootorid jne.) või suhteliselt lühikest aega (mõned kraana mootorid jne.). Kaasaegsetes automatiseeritud tööstus- ja teistes seadmetes on elektrimasinatel küllalt sagedasti tsükliline töörežiim. Väga paljudel juhtudel töötavad elektrimasinad ka vahelduva koormusega.

Elektrimasinad ei soojene erinevatel töörežiimidel ühtmoodi. Materjalide kõige ratsionaalsema kasutamise seisukohast on otstarbekas, et elektrimasinate osade kuumenemine nende ekspluateerimise reaalsetes tingimustes oleks lähedane riikliku standardiga lubatavale. Seepärast tuleks iga elektrimasina projekteerimisel ja valmistamisel arvestada selle konkreetseid töörežiime ja ekspluatatsioonitingimusi. Praktikas ei ole see aga teostatav, sest isegi eeldusel, et iga masina töötingimusi võib ette näha, ei saa organiseerida ühetüübiliste elektrimasinate mass- või seeriatootmist, ning nad oleksid kallid. Seepärast valmistatakse vastavalt ГОСТ 183-55 elektrimasinaid kolmeks põhiliseks nimitöörežiimiks.

Kestvaks nimitööreżiimiks nimetatakse elektrimasina töörežiimi muutumatul nimikoormusel, mis kestab nii kaua, kui elektrimasina kõikide osade ületemperatuurid jahutava keskkonna konstantsel temperatuuril saavutavad praktiliselt püsiväärtuse.

Elektrimasina lühiajaliseks nimitööreżiimiks nimetatakse töörežiimi, mille puhul muutumatu nimikoormuse perioodid jahutava keskkonna muutumatul temperatuuril vahelduvad masina seisuperioodidega; seejuures ei ole koormusperioodid niivõrd pikad, et elektrimasina kõikide osade ületemperatuurid saavutaksid püsiväärtuse, elektrimasina seisuajad on aga niivõrd pikad, et kõik selle osad jõuavad praktiliselt jahtuda ümbritseva keskkonna temperatuurini.

Vastavalt ГОСТ 183-55 valmistatakse masinaid lühiajalisele töörežiimile töötamisaja kestusega 15, 30, 60 ja 90 minutit.

Elektrimasina vaheajaliseks nimitööreżiimiks nimetatakse töörežiimi, mille puhul lühiajalised perioodid muutumatu nimikoormusega (tööperioodid) jahutava keskkonna muutumatul temperatuuril vahelduvad lühiajaliste masina seisuperioodidega (vaheaegadega), kusjuures nii tööperioodid kui ka vaheajad ei ole nii pikad, et ületemperatuurid elektrimasina üksikutes osades võiksid saavutada püsiväärtuse.

Vaheajalist nimitöörežiimi iseloomustatakse suhtelise lülitatuskestusega (ПВ), s. t. töötamiskestuse ja tsükli kestuse (töötamis- ja vaheaja kestuse summa) suhtega.

ГОСТ 183-55 näeb ette masinate valmistamise vaheajalisele töörežiimile töötamiskestusega (ПВ) 15, 25, 40 ja 60%.

Enamik elektrimasinaid valmistatakse kestvaks töörežiimiks.

Elektrimasinate osade lubatavad ületemperatuurid. Elektrimasinate normaalse tööea kindlustamiseks peavad masina üksikute osade temperatuurid, ja eriti just mähiste isolatsiooni temperatuur, olema piiratud.

Paragrahvis S-4 toodi erinevatele isolatsiooniklassidele luba-

tavad maksimaalsed töötemperatuurid ϑ_{max}. Kuid isolatsiooni töötemperatuur ϑ masina üksikutes osades ei sõltu üksnes masina koormusest, vaid ka ümbritseva või jahutava keskkonna temperatuurist ϑ_0. Masina koormusest sõltub ainult selle üksikute osade ületemperatuur Θ. Loetletud suuruste vahel kehtib sõltuvus

$$\vartheta = \vartheta_0 + \Theta.$$

Esitatud põhjustel normeerivad ГОСТ 183-55 ning standardid üksikutele masinatüüpidele maksimaalselt lubatavad ületemperatuurid Θ_{lub} ning samaaegselt fikseerivad ümbritseva keskkonna maksimaalselt lubatava temperatuuri väärtuse $\vartheta_0 = 35$ või 40 °C.

Mähiste ületemperatuuride määramise viisid ei garanteeri nende maksimaalväärtuste saamist. Näiteks takistusmeetod võimaldab kindlaks määrata ainult mähise keskmise ületemperatuuri. Seepärast määratakse standardites Θ_{lub} väärtused sõltuvalt temperatuuri mõõtmise viisist ja mähise konstruktsioonist. Viimane on 5 ... 15 K võrra väiksem kui $\vartheta_{max} - \vartheta_0$.

Kõige kindlamaid tulemusi annavad takistusmeetod ja sisestatud termodetektorite meetod. Viimasteks on kas takistustermomeetrid või termopaarid, mis on paigutatud uuretesse poolide vahele ja ka teistesse masina osadesse juba selle valmistamisel. Takistustermomeetrid valmistatakse peenest vasktraadist ning temperatuur määratakse nende takistuse muutumise järgi.

Toodud mõõtmismeetodite korral määravad standardid kindlaks $\vartheta_0 = 35$ °C juures erinevaile isolatsiooniklassidele lubatavad ületemperatuurid: 65 K — isolatsiooniklass A, 75 K — klass E, 85 K — klass B, 105 K — klass F, 130 K — klass H. Kui ümbritseva keskkonna temperatuur on kõrgem või madalam 35 °C-st, siis lubavad standardid ületemperatuuride teatavaid muudatusi. Elektrimasinate lubatavaid lühiajalisi ülekoormusi normeeritakse samuti standarditega.

8-4. ELEKTRIMASINATE SOOJENEMINE ERINEVATEL TÖÖREŽIIMIDEL

Soojenemine kestval töötamisel toimub kõvera joon. 8-1, *a* või 8-2 järgi. Seejuures peab olema $\Theta_\infty \leqslant \Theta_{lub}$ antud isolatsiooniklassile.

Elektrimasinate projekteerimisel viiakse läbi ka soojusarvutus masina üksikute osade ületemperatuuride määramiseks. Kestva töörežiimi soojusarvutus on põhiline, sest sellel baseerub ületemperatuuride arvutus ka lühiajalisel ja vaheajalisel töörežiimil.

Elektrimasinate soojusarvutus on küllalt keerukas ning seda käsitletakse üksikasjalikumalt elektrimasinate projekteerimise

kursustes. Siin toome ainult arvutuskäigu kestval töötamisel, kui ületemperatuurid saavutavad püsiväärtuse.

Kadude suurused masina üksikutes osades on leitud masina elektrilisel arvutusel. Konstruktiivskeemist määratakse soojusvoogude suunad ning jahutatavatelt pindadelt äraantav soojushulk. Seejärel määratakse õhu või muu jahutava keskkonna kiirus üksikutel jahutatavatel pindadel ning arvutatakse: 1) valemi (8-1) järgi temperatuurilang mähiste isolatsioonis $\Theta_{is} = \vartheta_1 - \vartheta_2$, 2) sama valemi (8-1) alusel temperatuurilang südamikus mähise ja jahutatava pinna vahelises piirkonas Θ_{sk}, 3) valemi (8-8) järgi jahutatava pinna ületemperatuur $\Theta = \Theta_{jp}$. Peale selle on gaaside ja vedelike liikumisel kanalites vaja arvestada ka jahutava keskkonna enda keskmist kuumenemist $\Delta\Theta_j$.

Mähise ületemperatuuri $\Theta_{mäh}$ väljendab summa

$$\Theta_{mäh} = \Theta_{is} + \Theta_{sk} + \Theta_{jp} + \Delta\Theta_j. \qquad (8\text{-}23)$$

Suurus $\Theta_{mäh}$ ei tohi ületada ГОСТ 183-55 jt. järgi lubatavat väärtust.

Jahutava keskkonna kiirust neil või teistel pindadel, aga samuti ka vastavate soojussiirdetegurite suurusi õnnestub kindlaks määrata ainult ligikaudu, tingituna aerodünaamiliste nähtuste ja soojusvoogude jaotuse keerukusest masinas. Seepärast annavad soojusarvutused küllalt täpseid tulemusi ainult piisavate katseandmete olemasolu korral.

Soojenemine lühiajalisel töötamisel. Et määrata lühiajalisel töötamisel masina üksikosade ületemperatuure Θ_{lr}, leitakse algul eespool toodud meetodiga ületemperatuur Θ_∞ juhtumil, kui masin töötaks antud võimsusel kestvalt. Samuti määratakse soojenemise ajakonstandid T. Teades lühiajalise režiimi kestust t_{lr}, võib sellel režiimil saavutatavad ületemperatuurid arvutada valemiga (8-19).

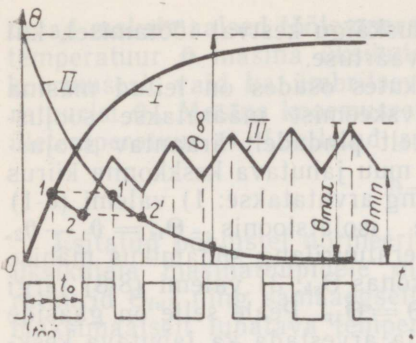
$$\Theta_{lr} = \Theta_\infty \left(1 - e^{-\frac{t_{lr}}{T}}\right). \qquad (8\text{-}24)$$

Suuruse Θ_{lr} väärtused peavad mahtuma etteantud piiridesse.

On ilmne, et $\Theta_{lr} < \Theta_\infty$ ning et lubatavad ületemperatuurid Θ_{lub} on kõikidel režiimidel ühesugused, siis lühiajalisel režiimil võib lubada Θ_∞-le

$$\frac{1}{1 - e^{-\frac{t_{lr}}{T}}}$$

korda suuremat väärtust kui kestval töötamisel. Sama palju kordi võivad suuremad olla ka kadude lubatavad väärtused masinas. Seepärast masinate etteantud gabariitide ja materjalide



Joon. 8-3. Soojenemiskõvera konstrueerimine vaheajalisel töörežiimil

kulu korral on masinate võimsused lühiajalisel tööreżiimil suuremad kui kestval tööreżiimil.

Soojenemine vaheajalisel töötamisel. Eeldame, et masin alustab tööd külmast olekust vaheajalise koormuse režiimis. Olgu töötamisaeg märgitud $t_{töö}$ ja vaheaeg t_0-ga.

Masina soojenemine esimesel töötamisperioodil kulgeb mööda lõiku *0 ... 1* soojenemiskõveral *I* (joon. 8-3), mille saab konstrueerida, teades soojenemise ajakonstanti *T* ja püsitemperatuuri Θ_∞ töötamisel kestvas režiimis antud võimsusega.

Seejärel saabub paus ja masin hakkab jahtuma. Jahtumine toimub mööda lõiku *1' ... 2'* kõveral *II* (joon. 8-3). Seda kõverat saab samuti joonestada, teades Θ_∞ ja ajakonstandi T_j väärtust jahtumisel. Kui ventileerimistingimused on pausi ajal samasugused nagu tööperioodilgi, siis $T_j = T$. Kui aga näiteks pausi ajal masin seisab ja teda ei ventileerita, siis $T_j > T$. Jahtumine pärast esimest tööperioodi kulgeb mööda kõvera *II* niisugust lõiku, mis algab selle tööperioodi lõpuks saavutatud Θ väärtusest. Nihutades kõvera II lõiku *1' ... 2''* rööbiti iseendaga asendisse *1 ... 2*, saame Θ muutumise kõvera osa 0 ... 1 ... 2 esimesel töötsüklil.

Teise tööperioodi ajal toimub soojenemine kõvera *I* seda osa mööda, mille algus vastab esimese töötamispausi lõpuks saavutatud Θ väärtusele.

Samasugusel viisil võib konstrueerida masina soojenemise hammaskõvera *III* vaheajalisel töötamisel. Ta koosneb kõverate *I* ja *II* osadest, mis on enda suhtes rööbiti nihutatud vastava töötamisaja $t_{töö}$ ja pausi t_0 võrra. Need ajavahemikud on märgitud joon. 8-3 alumises osas.

Mõne aja möödudes vaheajalise töötamise temperatuurirežiim praktiliselt stabiliseerub ning kõvera *III* tõus lakkab. Masina ületemperatuur kõigub seejuures Θ_{max}-st kuni Θ_{min}-ni (joon. 8-3). Suuruse Θ_{max} väärtus ei tohi ületada antud isolatsiooniklassi Θ_{lub} väärtust.

Nagu nähtub joon. 8-3, on sellel režiimil $\Theta_{max} < \Theta_\infty$ kestval töötamisel. Vastavalt sellele võib vaheajalisel töötamisel masina samade gabariitide ning ventilatsioonitingimuste korral lubada

$\Theta_\infty/\Theta_{max}$ korda suuremaid kadusid ja vastavalt ka suuremat võimsust. Kasutades kestvale töörežiimile ettenähtud masinat vaheajalisel režiimil, võib selle võimsust suurendada, kui see on lubatav teiste töötingimuste, näiteks kommutatsiooni või pöördemomendiga ülekoormatavuse seisukohast.

8-5. ELEKTRIMASINATE VENTILATSIOON

Elektrimasinate konstruktiivsed lahendused. Elektrimasinate liigse soojenemise vältimiseks tuleb tagada vajalikud tingimused masinas eralduva soojuse ärajuhtimiseks. Elektrimasinate võimsuse kasvuga soojuse ärajuhtimise tingimused halvenevad (vt. § 4-3), mistõttu suurtes masinates tuleb kasutada palju intensiivsemaid jahutusviise.

Jahutusviisid omakorda sõltuvad elektrimasinate konstruktiivsest lahendusest, millest siin esitame kõige tüüpilisemaid.

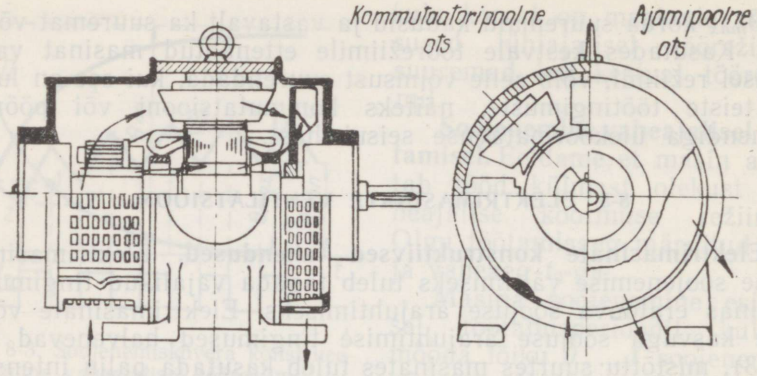
Lahtistel elektrimasinatel ei ole spetsiaalseid vahendeid pöörlevate ja voolu juhtivate osade kaitsmiseks puudutamise ja samuti ka kõrvaliste esemete masina sisemusse sattumise vältimiseks. Niisuguseid masinaid kasutatakse ainult masinasaalides ja laboratooriumides. Kaitstud elektrimasinatel on nimetatud vahendid olemas ning masinaid kasutatakse kinnistes ruumides. Pritsmekindlad masinad on täiendavalt kaitstud masina sisemusse sattuda võivate 45° nurga all langevate veetilkade eest. Niisuguste masinate kõikidele ülemistes osades paiknevatele avadele asetatakse kinnised katted ja žalusiid, milles võivad olla sirmidega kaetud lõhed. Niisuguse ehitusviisiga masinad on laialdaselt levinud ja neid võib kasutada ka välistingimustes.

Kinniste elektrimasinate siseruum on väliskeskkonnast täielikult eraldatud. Neid kasutatakse tolmustes ruumides, samuti ka vabas õhus. Kinnistest masinatest veelgi täiuslikumad on plahvatuskindlad ning hermeetilised masinad. Esimesi neist kasutatakse tööks plahvatusohtlikes šahtides ning keemiaettevõtetes, kui nõutakse, et sädelemine või plahvatus masina sisemuses ei põhjustaks väliskeskkonna gaaside plahvatust või süttimist. Hermeetiliste masinate liitepinnad on eriti tihedad, mistõttu nad võivad töötada isegi vee all.

Elektrimasinate jahutusviise. Masinaid liigitatakse jahutusviisi järgi:

1) loomuliku jahutusega masinad, millel ei ole mingeid spetsiaalseid jahutusseadmeid;

2) sisemise endajahutusega masinad, mida jahutatakse ventilaatoritega või teiste ventileeritava masina pöörlevatele osadele kinnitatud masina sisemisi kanaleid ventileerivate seadistega (lahtised ja kaitstud masinad);



Joon. 8-4. Alalisvoolumasina aksiaal-ventilatsioonisüsteem

3) välise endajahutusega masinad, mille välispinda jahutatakse endaventilatsiooni teel, masina siseosad on aga välisõhule ligipääsuks suletud (kinnised masinad);

4) sõltumatu jahutusega masinad, kus gaasiline või vedel soojusvahendi antakse masinasse autonoomse ajamiga ventilaatori, kompressori või pumbaga.

Allpool illustreeritakse alalisvoolumasinate mitmesuguste jahutusviiside eripärasusi, vahelduvvoolumasinate jahutamine toimub samamoodi.

Loomuliku jahutusega masinaid ehitatakse kaasajal võimsusele ainult kuni mõnikümmend vatti. Mõningatel juhtumitel kasutatakse loomulikku jahutust ka kinnistes masinates võimsusega kuni mõnisada vatti. Sel puhul varustatakse masina korpus ribidega, et intensiivistada soojuse ärajuhtimist ja suurendada jahutuspinda.

Sisemise endajahutusega masinad on kõige enam levinud. Seejuures eristatakse aksiaal- (joon. 8-4) ja radiaal-ventilatsioonisüsteemi (joon. 8-5). Esimesel juhtumil toimub soojuse ülekanne õhule selle aksiaalsuunalisel liikumisel mööda jahutatavaid pindu, teisel — radiaalsuunalisel.

Aksiaalventilatsiooniga alalisvoolumasinais liigub õhuvoog pooluste vahel ning ankru välispinda mööda, kuid $D_a > 200$ mm korral ka ankru ja võlli vahel või ankrusüdamikus olevaid aksiaalkanaleid mööda. Õhuvood uhuvad samuti ka kommutaatorit. Õhk suundub masinasse selle ühest otsast ning paisatakse välja teisest otsast.

Mööda masina jahutatavaid osi liikudes õhk soojeneb ning

järelikult on aksiaalventilatsiooni korral masina soojenemine aksiaalsuunas ebaühtlane. Seepärast kasutatakse aksiaalventilatsiooni harilikult masinates aktiivpikkusega mitte üle 200 ... ... 250 mm.

Radiaal-ventilatsioonisüsteemi korral on ankrusüdamikul vaheribidega radiaalkanalid (vt. § 1-2 ja joon. 1-9). Ankru pöörlemisel toimivad ribid analoogiliselt ventilaatorilabadega ning seetõttu osutub ventilaatorite võllile paigutamine mõnikord liigseks.

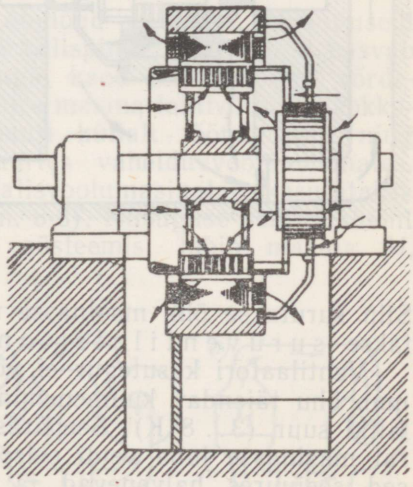
Selle ventilatsioonisüsteemi korral suundub õhk masinasse otstest ja paisatakse välja kere külgedelt või läbi selles olevate avade.

Välise endajahutusega masinad on kinnise konstruktsiooniga ning nende võllile on kinnitatud kere välispinda jahutav välisventilaator (joon. 8-6). Seejuures varustatakse kere välispind jahutuspinna suurendamiseks tihti pikiribidega. Sageli on masinal ka sisemine ventilaator või ventilatsioonitiivikud, et kiirendada õhu liikumist masina sisemuses ning intensiivistada sellega soojusvahetust masina siseosade ja kere vahel (joon. 8-6).

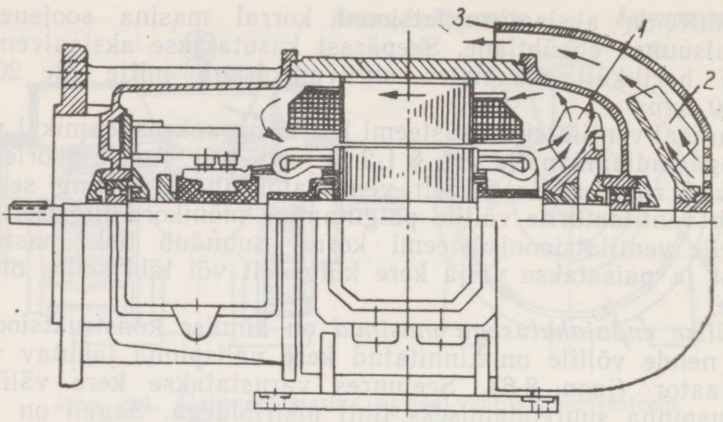
Sõltumatu jahutusega masinad. Harilikult jahutatakse ka niisuguseid masinaid õhuga, mis juhitakse masinasse autonoomse ventilaatoriga (joon. 8-7). Niisugust ventilatsiooni nimetatakse ka sundventilatsiooniks. Mõnikord monteeritakse ventilaator koos oma ajammootoriga ventileeritava masina korpusele.

Vaadeldaval juhtumil võib ventilatsioonisüsteem olla nii aksiaalne kui ka radiaalne. Seda ventilatsiooniviisi kasutatakse siis, kui masina pöörlemiskiirust reguleeritakse suurtes piirides. Väikestel pöörlemiskiirustel ei saa sel juhul endaventilatsiooniga (ventilaatoriga masina võllil) tagada hädavajalikku õhukogust.

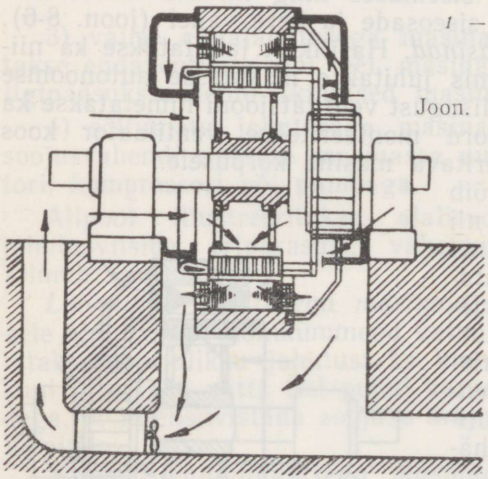
Imi- ja suruventilatsioon. Joon. 8-4 ja 8-7 kujutatud skeemidel asub ventilaator masina ventilatsioonitrakti lõpus ning seda läbib masina sisemuses kuumenenud õhk. Niisugust ventilatsiooni nimetatakse i m i v e n t i l a t s i o o n i k s. Kui ventilaator on monteeritud masina ventilatsioonitrakti algusse, siis seda läbib külm õhk.



Joon. 8-5. Alalisvoolumasina radiaalventilatsioonisüsteem



Joon. 8-6. Välise endajahutusega alalisvoolumasin:
1 — siseventilaator; *2* — välisventilaator; *3* — ventilaatorikate



Joon. 8-7. Sõltumatu ventilatsiooniga alalisvoolumasin

Siin surutakse õhk masinasse ning sellist ventilatsiooni nimetatakse s u r u v e n t i l a t s i o o n i k s.

Ventilaatori kasutegur ei võrdu ühega ning ventilaatoris toimub õhu täiendav kuumenemine, mis mõnel juhul võib olla küllaltki suur (3.. 8 K). Seepärast antakse surveventilatsiooni korral masinasse juba veidi eelsoojendatud õhku. Jahutumistingimused seejuures halvenevad ja imiventilatsiooniga võrdse efekti saavutamiseks suureneb õhukulu 15 ... 20%. See omakorda põhjustab ventilatsioonikao suurenemise 50 ... 70% võrra. Neil põh-

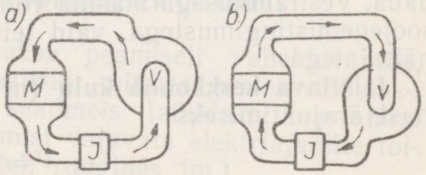
justel tuleb eelistada imiventilatsiooni, kui see ei nõua masina keerulisemat konstruktsiooni. Kuid imiventilatsioonil on ka mõned puudused. Näiteks joon. 8-4 toodud skeemi puhul imetakse kommutaatoril tekkiv tolm masina sisemusse.

Läbitõmbe- ja kinnine ventilatsioon. Nii nagu enda-, võib ka sõltumatut ventilatsiooni luua kahel viisil: a) läbitõmbe- ja b) kinnise süsteemina.

Läbitõmbeventilatsiooni korral suundub jahutusõhk masinasse seda ümbritsevast välisest ruumist ning naaseb pärast masina läbimist atmosfääri (joon. 8-4 ja 8-7). Niisuguse ventilatsiooni puudus seisneb selles, et masina sisepindadele koguneb õhus sisalduvat tolmu ja mustust, mis halvendab jahutustingimusi ning võib isegi avarii põhjustada. Filtrite kasutamine õhu sisenemisavas ei ole ratsionaalne, sest neid tuleb tihti puhastada ning nad suurendavad ka takistust õhu liikumisel. Filtri mitteõigeaegsel puhastamisel halvenevad jahutustingimused tunduvalt. Tingimata on vaja silmas pidada, et kõige suuremaid masinaid läbib iga tund mõnisada tonni õhku, ja seepärast on isegi väikese tolmusisalduse korral selle absoluutne hulk küllaltki suur.

Väikese võimsusega masinate korral lahendatakse tekkivad raskused lihtsamalt. Tugevasti saastatud atmosfääri korral võib kasutada kinnisi välispinnalt jahutatavaid masinaid. Mõõduka tolmusisalduse korral õhus võib kasutada kaitstud konstruktsiooniga masinaid, puhudes neid regulaarselt suruõhuga läbi ning võttes masina perioodiliseks puhastamiseks aastas üks-kaks korda lahti.

Suurte masinate jaoks need abinõud ei kõlba. Niisuguseid masinaid ei ole võimalik jahutada välispinnalt, sest pind kasvab võrdeliselt lineaarmõõtmete ruuduga, kaod masinas aga võrdeliselt lineaarmõõtmete kuubiga. Suure masina lahtivõtmine, kokkupanek ning puhastamine on samuti küllalt töömahukad ning kallid operatsioonid, mistõttu suurtes vahelduvvoolumasinates, real juhtumitel aga ka suurtes alalisvoolumasinates, kasutatakse kinnist ventilatsioonisüsteemi (joon. 8-8). Niisuguse ventilatsiooni korral tsirkuleerib õhk kinnises süsteemis: läbib masina *M*, õhujahuti *J*, ventilaatori *V* ning läheb uuesti masinasse. On võimalik kasutada nii suru- (joon. 8-8, *a*) kui ka imiventilatsiooni (joon. 8-8, *b*).



Joon. 8-8. Suletud ventilatsioonisüsteem

Vesinikjahutus. Vesinik osutub palju efektiivsemaks jahutajaks kui õhk. Võrreldes õhuga, on vesiniku soojusjuhtivus atmosfäärirõhul 7,1 korda suu-

rem. Vesiniku keskmine soojussiirdetegur on samal kiirusel 1,7 korda ning ühesuguse kaalulise kulu korral 11,8 korda suurem. Tänu sellele on õhuga võrdse jahutusefektiivsuse saavutamiseks vaja kaaluliselt palju vähem vesinikku. Ventilatsioonikadu, mis moodustab suurtes kiirekäigulistes masinates suurema osa summaarsest kaost, väheneb peaaegu kümme korda. Vesinikjahutusel suureneb isolatsiooni tööiga, sest et puudub hapendumisprotsess ning koroonalahenduste mõjul kahjulike lämmastikuühendite moodustumine. Seepärast kasutatakse vesinikku laialdaselt kiirekäiguliste vahelduvvoolumasinate, võimsusega 25 000 kW ja rohkem, jahutamiseks.

Vesinikjahutuse korral on käibel kinnine ventilatsioonisüsteem ning plahvatuva segu tekkimise vältimiseks hoitakse surve süsteemis atmosfäärirõhust veidi kõrgemana. Paljudel juhtumitel suurendatakse jahutuse intensiivistamiseks vesiniku survet jahutussüsteemis kuni $(2 \ldots 3) \cdot 10^5$ N/m^2. Seejuures peavad tihendid olema kindlad, et vältida vesiniku lekkimist masinast.

Mähiste vahetu või sisemine jahutamine. Elektrimasinatele võimsusega $(300 \ldots 500)\ 10^3$ kW ja rohkem ei ole kinnine vesinikjahutusega ventilatsioonisüsteem küllaldane. Seepärast valmistatakse niisuguste masinate mähis õõnsatest juhtmetest ja kasutatakse nende juhtmete sisejahutust kas mõneatmosfäärilise surve all oleva vesiniku või veega. Nende asemel võib kasutada ka trafoõli. Kuid vee soojusjuhtivus ning soojussiirdetegur on tunduvalt suuremad kui trafoõlil. Seepärast kasutatakse õli harvemini. Et vee juurdeviimine pöörlevasse rootorimähisesse on seotud konstruktsiooni komplitseerumisega, kasutatakse sisemist segajahutust: rootorimähiseid jahutatakse vesinikuga, staatorimähist aga veega.

Vesinik juhitakse mähistesse kompressorite, mõnikord aga on pöörlevale rootorile kinnitatud eriliste gaasijaoturite abil. Vee sissejuhtimiseks kasutatakse pumpi. Jahutussüsteemid ehitatakse kõikidel juhtumitel kinnistena ühe ja sama soojusvahendi massi tsirkuleerimisega ning jahutamisega selleks otstarbeks ettenähtud jahutites.

Mähiste vahetul jahutamisel puudub temperatuurilang isolatsioonis ning seetõttu on võimalik voolutihedust järsult suurendada. Vesijahutusega masina võimsust ei määrata põhiliselt enam soojenemistingimustega, vaid teiste tehniliste ning majanduslike näitajatega.

Jahutava keskkonna kulu (m^3), mis on vajalik soojuse masinast ärajuhtimiseks

$$V = \frac{p}{c\Theta_v},$$

kus p on ärajuhitav kaovõimsus W;

c — jahutava keskkonna mahu erisoojus $\frac{J}{m^3 \cdot K}$;

$\Theta_v = \vartheta_{välj} - \vartheta_{sis}$ — masinast väljuva kuumenenud jahutava keskkonna ületemperatuur K.

Õhu puhul $c = 1100 \frac{J}{m^3 \cdot K}$. Suurus Θ_v muutub sõltuvalt ventilatsioonisüsteemist, masina konstruktsioonist ja võimsusest piirides 12...30 K. Seega 1 kW võimsuskao eemaldamiseks on vaja õhu hulka

$$V = \frac{1000}{1100 \cdot (12 \ldots 30)} = (0{,}03 \ldots 0{,}075) \text{ m}^3/\text{s}$$

ehk 110...270 m³/h.

Atmosfäärirõhuga vesinikul on $c = 1100 \frac{J}{m^3 \cdot K}$ ning seepärast on vesiniku mahukulu samasugune nagu õhkjahutusel. Vesiniku mahu erisoojus muutub võrdeliselt rõhuga ning seega suuremal rõhul vesiniku mahukulu vastavalt väheneb. Kuid vesiniku kaaluline kulu ei sõltu rõhust ja on 14,4 korda väiksem õhu kaalulisest kulust.

Vee puhul $c = 3500 \cdot 1100 \frac{J}{m^3 \cdot K}$, trafoõlil on aga $c = 1400 \cdot 1100 \frac{J}{m^3 \cdot K}$. Muude võrdsete tingimuste korral on vee mahukulu seega 3500 korda väiksem kui õhul. See võimaldab vähendada vee voolamiskiirust ja kanalite ristlõikeid.

Elektrimasinate jahutusviise ning arvutusi vaadeldakse üksikasjalikumalt elektrimasinate projekteerimise ja konstrueerimise kursustes.

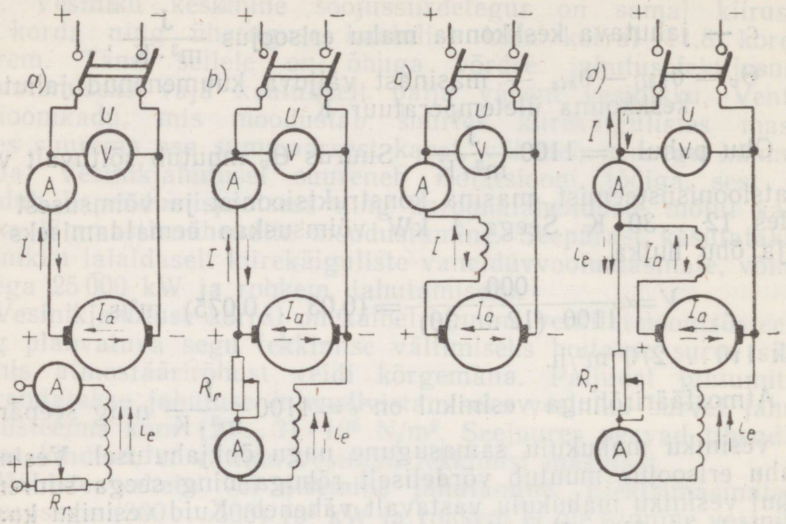
Üheksas peatükk

ALALISVOOLUGENERAATORID

9-1. ÜLDANDMEID ALALISVOOLUGENERAATOREIST

Olgugi et tööstuses kasutatakse peamiselt vahelduvvoolu, leiavad alalisvoolugeneraatorid siiski mitmesugustes tööstus-, transpordi- ja paljudes teistes seadmeis laialdast kasutamist (laiades piirides kiiruse reguleerimist vajavate elektriajamite toiteks, elektrolüüsiseadmeis, laevadel, rongides jm.).

Neil juhtumeil kasutatakse primaarjõumasinaina tavaliselt vahelduvvoolumootoreid, auruturbiine või sisepõlemismootoreid.



Joon. 9-1. Generaatorite ja mootorite skeemid:
a — sõltumatu ergutusega, *b* — rööpergutusega, *c* — jadaergutusega ja *d* — liitergutusega. Voolu suunad generaatorirežiimis on näidatud pideva joonega nooltega ja mootorirežiimis — kriipsjoonega nooltega

Alalisvoolugeneraatorite liigitus ergutusviisi järgi. Alalisvoolugeneraatorid jagunevad sõltumatu ja endaergutusega generaatoreiks.

Sõltumatu ergutusega generaatorid jaotatakse elektromagnetilise ergutusega generaatoriteks (joon. 9-1, *a*), kus ergutusmähist toidetakse välisest, sõltumatust vooluallikast (akupatareist, alalisvoolu-abigeneraatorist ehk ergutist, alalisvooluvõrgust), ja püsimagneteist induktoriga magnetelektrilisteks generaatoriteks. Viimaseid toodetakse ainult väikestele võimsustele. Antud peatükis vaadeldakse ainult elektromagnetilise ergutusega generaatoreid.

Endaergutusega generaatoreis toidetakse ergutusmähist samas generaatoris toodetud elektrienergiaga. Kõigis elektromagnetilise ergutusega generaatoreis kulutatakse ergutusele 0,3 ... 0,5% nende nimivõimsusest. Madalam piir kuulub siin kõige võimsamaile masinaile, kõrgem piir aga masinaile võimsusega *ca* 1 kW.

Endaergutusega generaatorid jaotatakse sõltuvalt ergutusmähise lülitusviisist: 1) rööpergutusega ehk haruvoolugeneraatoriteks (joon. 9-1, *b*), 2) jadaergutusega ehk peavoolugeneraatori-

teks (joon. 9-1, *c*) ja 3) liitergutusega ehk kompaundgeneraatoriteks (joon. 9-1, *d*). Viimastel on kaks ergutusmähist: rööp- ja jadamähis, paigutatud samadele peapoolustele.

Kui mõlema mähise ergutusväljad on samasuunalised, on tegemist pärikompaundgeneraatoriga, kui aga vastassuunalised — vastukompaundgeneraatoriga.

Harilikult kasutatakse pärilülitust, kusjuures põhiosa magneetimisergutusest (65 ... 80%) tekitab rööpmähis.

Joonisel 9-1, *d* on rööpmähis lülitatud läbi ergutusreostaadi jadamähise taha (nn. pikk šunt), kuid see võib olla lülitatud ka vahetult ankrule (nn. lühike šunt). Suurt vahet neis lülitustes pole, sest pingelang jadamähises moodustab ainult 0,2 ... 1,0% generaatori nimipingest U_N ja ergutusvool i_e on väike. Harilikult kasutatakse joonisel 9-1, *d* toodud lülitust.

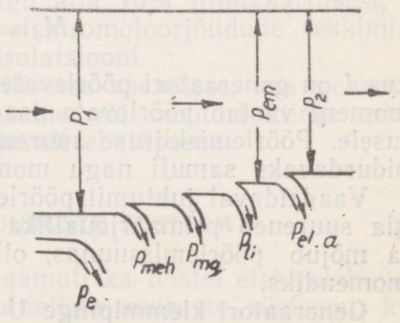
Haruvoolugeneraatori ergutusvool moodustab 1 ... 5% ankru nimivoolust I_{aN} või koormusvoolust $I_N = I_{aN} - i_e$. Peavoolugeneraatoris on ergutusvool ja ankruvool võrdsed: $i_e = I_a = I$ ning nimikoormusel tekkiv pingelang ergutusmähises moodustab 1 ... ... 5% nimipingest U_N.

Rööpergutusmähis on valmistatud suhteliselt peenest traadist ja suure keerdude arvuga, jadamähis aga suhteliselt jämedast traadist ning väikese keerdude arvuga.

Rööpergutusahelasse, samuti tihti ka sõltumatu ergutusega generaatori ergutusahelasse lülitatakse reostaat R_r (joon. 9-1, *a*, *b*, *d*).

Võimsad alalisvoolumasinad töötavad sõltumatul ergutusel. Väikese ja keskmise võimsusega masinad on tavaliselt rööp- või liitergutusega. Jadaergutusega masinad on vähe levinud.

Energeetiline diagramm sõltumatu ergutusega generaatori jaoks on toodud joonisel 9-2. Primaarjõuallikalt saadud võimsus P_1, kui sellest lahutada mehaaniline, magnetiline ja lisakaovõimsus p_{meh}, p_{mg} ja p_{li}, muundub ankrus elektromagnetiliseks võimsuseks P_{em}. See kulutatakse osaliselt elektrilisele kaole ankruahelas $p_{el.a}$ (ankru-, lisapooluste, kompensatsioonimähise ja harjade puutetakistuses), ülejäänud osa moodustab aga tarbijale antava kasuliku võimsuse P_2. Sõltumatu ergutusega generaatori ergutuskaovõimsus p_e kaetakse välise vooluallika poolt.



Joon. 9-2. Sõltumatu ergutusega generaatori energeetiline diagramm

Seega on sõltumatu ergutusega generaatori võimsuste võrrand avaldatav järgmiselt:

$$P_2 = P_1 - p_{meh} - p_{mg} - p_{li} - p_{el.a} = P_{em} - p_{el.a} \tag{9-1}$$

ehk teisiti

$$P_1 = p_{meh} + p_{mg} + p_{li} + P_{em}. \tag{9-2}$$

Analoogilised energeetilised diagrammid võib koostada ka teistele generaatoritüüpidele.

Pöördemomendid. Jagades võrrandi 9-2 kõiki liikmeid pöörlemise nurkkiirusega

$$\Omega = 2\pi n,$$

saame pöördemomentide võrrandi püsirežiimil:

$$M_p = M_0 + M_{em}. \tag{9-3}$$

Siin

$$M_p = \frac{P_1}{\Omega} \tag{9-4}$$

kujutab endast primaarse jõuallika pöördemomenti,

$$M_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} \tag{9-5}$$

— ankru poolt arendatavat elektromagnetilist pöördemomenti ja

$$M_0 = M_p + M_{te} = \frac{p_m}{\Omega} + \frac{p_{mg} + p_{li}}{\Omega} \tag{9-6}$$

— pöördemomenti, põhjustatuna hõõrdekaost m_p ning teraseskaost M_{te}, mis kaetakse mehaanilise võimsusega.

Siirderežiimis, kui pöörlemiskiirus muutub, esineb veel nn. dünaamiline pöördemoment

$$M_d = I \frac{d\Omega}{dt}, \tag{9-7}$$

kus I on generaatori pöörlevate osade inertsmoment. Dünaamiline moment vastab pöörlevate osade massi kineetilise energia muutusele. Pöörlemiskiiruse suurenemisel moment $M_d > 0$ ja osutub pidurdavaks samuti nagu moment $M_0 + M_{em}$.

Vaadeldaval juhtumil pöörlevate osade massi kineetiline energia suureneb primaarjõuallika töö arvel. Kui aga $M_d < 0$, siis ta mõjub pöörlemissuunas, olles seega pöörlemist säilitavaks momendiks.

Generaatori klemmipinge U võrrand on avaldatav kujul

$$U = E_a - I_a r_a - 2\Delta U_h, \tag{9-11}$$

kus

$$E_a = C_e n \Phi_\delta \tag{9-12}$$

kujutab endast ankru elektromotoorjõudu, r_a — kõigi ankruahelasse järjestikku lülitatud mähiste takistust ja $2\Delta U_h$ — mõlema polaarsusega harjade puutetakistusel tekkivat pingelangu.

Harilikult kasutatakse arvutuste lihtsustamise eesmärgil harjade puutetakistuse püsiväärtust

$$R_h = \frac{2\Delta U_h}{I_{aN}} \tag{9-13}$$

ja võrrandi (9-11) asemel

$$U = E_a - I_a R_a, \tag{9-14}$$

kus

$$R_a = r_a + R_h \tag{9-15}$$

on ankru resulteeriv takistus.

Tingituna harjade puutetakistuse mittekonstantsusest on valem (9-14) mõningal määral ligikaudne, kuid tekkiv viga on tähtsusetu. Süsi- ning grafiitharjade korral võetakse $2\Delta U_h = 2$ V ja metallgrafiitharjade puhul $2\Delta U_h = 0{,}6$ V. Generaatorirežiimis on alati $U < E_a$.

Harjade paigutamine neutraalile. Harilikult paigutatakse harjad geomeetrilisele neutraalile ja edaspidisel generaatori ning mootori töö vaatlemisel, kui ei ole viidatud mingile teistsugusele olukorrale, eeldamegi nende sellist paigutust.

Harjad paigutatakse neutraalile induktiivmeetodil — seisva masina ergutusmähisesse alalisvoolu sisse- ja väljalülitamise teel. Sealjuures jälgitakse harjadele lülitatud voltmeetri või galvanomeetri näite. Harjatraavers kinnitatakse asendis, mille juures voolu väljalülitamisel tekkiv voltmeetri näit on minimaalne. Kasutamiseks sobib mõõteriist, mille nullpunkt on skaala keskel. Voolu väärtus ergutusmähises olgu alla 10% nimiväärtusest, et vältida suurte endainduktsiooni elektromotoorjõudude tekkimist, mis võiksid kahjustada mähise isolatsiooni.

Harjad võib paigutada ka sellisesse asendisse, kus generaatori tühijooksupinge on maksimaalne või mootori kiirus minimaalne. See meetod on aga tunduvalt ebatäpsem.

9-2. SUHTELISTE SUURUSTE SÜSTEEM

Elektrimasinate teoorias, aga samuti ka teistel elektrotehnikaaladel kasutatakse laialdaselt suhteliste suuruste süsteemi, kus pinge, vool, võimsused ja teised suurused avaldatakse mingi sama, baasväärtuse osana. Elektrimasinate teoorias võetakse baas-

väärtuseks masina vool, pinge jm. nimisuurused (mitmefaasilise vahelduvvoolumasina korral faasiväärtused).

Suhteliste suuruste eraldamiseks absoluutsuurustest, mida mõõdetakse füüsikaliste ühikutega (näiteks SI süsteemis), tähistatakse nad tärnikestega. Siis suhteline vool

$$I_* = \frac{I}{I_N}$$

ja suhteline pinge

$$U_* = \frac{U}{U_N}.$$

Suhteline võimsus

$$P_* = \frac{P}{P_N} = \frac{UI}{I_N U_N} = U_* I_*.$$

Suhteline pöörlemiskiirus

$$\Omega_* = \frac{\Omega}{\Omega_N} = \frac{2\pi n}{2\pi n_N} = \frac{n}{n_N} = n_*$$

ja suhteline pöördemoment

$$M_* = \frac{M}{M_N} = \frac{M\Omega_N}{P_N}.$$

Elektritakistuse nimi- ehk baassuuruseks võetakse

$$r_N = \frac{U_N}{I_N},$$

mis generaatori korral on võrdne koormustakistusega (tarbija) nimirežiimil.

Seega takistuse r suhteline suurus

$$r_* = \frac{r}{r_N} = \frac{I_N r}{U_N}.$$

Järelikult kujutab takistuse r suhteline suurus endast samal takistusel nimivoolu korral tekkiva pingelangu ja nimipinge suhet, teiste sõnadega öeldult — suhtelist pingelangu nimivoolu korral.

On kerge näha, et Ohmi, Kirchhoffi ja teiste seaduste matemaatiline kuju, aga samuti ka pingete, momentide jne. võrrandid võib samuti avaldada suhtelistes suurustes. Näiteks eelmise paragrahvi võrrandite (9-3), (9-8), (9-14) jm. puhul on küllaldane, kui tähistada kõiki suurusi tärnikestega.

Suhteliste suuruste kasutamise korral on ühe või teise suuruse väärtust lihtsam ja parem hinnata. Kui näiteks on teada, et generaatori koormus $P = 15$ kW, siis on võimatu öelda, kas see koormus on antud generaatorile suur või väike. Kui näiteks $P_N = 10$ kW, siis on masin tugevasti üle koormatud, kui aga $P_N = 10\,000$ kW, siis on koormus tähtsusetu. Samal ajal aga võimsuse suhtelised väärtused ($P_* = 1{,}5$ — esimesel juhul ja $P_* = 0{,}0015$ — teisel juhul) iseloomustavad täiesti konkreetselt masina koormatust.

Analoogiline on olukord ka mitmesuguste elektrimasinate vooluahelate takistustega, mille väärtused muutuvad laiades piirides, sõltuvalt masina nimiandmeist absoluutväärtustes. Näiteks väikeste alalisvoolumasinate ankrumähise takistus R_a on kümneid oome, suurtel seevastu aga vaid millioome. Suhtelistes väärtustes see takistus muutub aga kitsastes piirides $R_{a*} = 0{,}02 \ldots$ $\ldots 0{,}10$ (esimene väärtus kehtib masinaile võimsusega tuhandeid kilovatte, teine võimsustele mõni kilovatt). See on ka loomulik, sest kõik alalisvoolumasinad projekteeritakse nii, et ankruahelas tekkiv pingelang ja elektriline kadu oleks minimaalne. Mõeldamatu on näiteks selline alalisvoolumasin, millel $R_{a*} > 1$.

9-3. SÕLTUMATU ERGUTUSEGA GENERAATORID

Generaatorite omadusi analüüsitakse generaatori tööd määravate põhiliste suuruste vahelisi seoseid iseloomustavate karakteristikute abil.

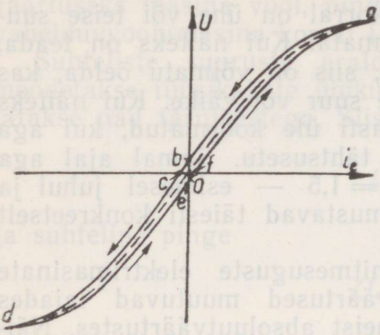
Sellised põhisuurused on: 1) klemmipinge U, 2) ergutusvool i_e, 3) ankruvool I_a või koormusvool I, 4) pöörlemiskiirus n. Harilikult töötavad generaatorid püsikiirusel — $n = \text{const}$. Seetõttu määratakse põhilised karakteristikud olukorras, kus $n = n_N = \text{const}$. Generaatoril on viis põhilist karakteristikut: 1) tühijooksu-, 2) lühise-, 3) välis-, 4) reguleerimis- ja 5) koormuskarakteristik. Kõiki neid saab määrata nii arvutuslikult kui ka eksperimentaalselt.

Vaatleme järgnevalt sõltumatu ergutusega generaatori põhilisi karakteristikuid.

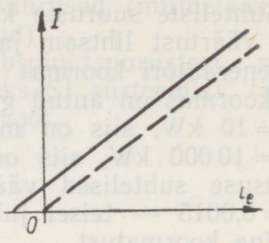
Tühijooksukarakteristik $U = f(i_e)$, kusjuures $I = 0$ ja $n = \text{const}$, määrab generaatori ankru elektromotoorjõu E_a ehk tühijooksupinge U_0 ($I = 0$, $P_2 = 0$) sõltuvuse ergutusvoolust.

Karakteristiku saamiseks kasutatakse joon. 9-1, *a* toodud lülitusskeemi, jättes koormuslüliti avatuks.

Karakteristiku ülesvõtmist on soovitav alustada maksimaalsel ergutusvoolul ja maksimaalsel pingel $U = (1{,}15 \ldots 1{,}25)\, U_N$ — punkt *a* kõveral joon. 9-3. Et magnetahel on küllastunud, siis lan-



Joon. 9-3. Sõltumatu ergutusega generaatori tühijooksukarakteristik



Joon. 9-4. Sõltumatu ergutusega generaatori lühisekarakteristik

geb pinge (kõvera langev haru *ab*) ergutusvoolu vähendamisel esialgu aeglaselt, hiljem aga kiiremini. Ergutusvoolu $i_e = 0$ juures jääb generaatori klemmidele jääkpinge $U_{00} = Ob$ (joon. 9-3), mille väärtus on (0,02 ... 0,03) U_N. Jääkpinge indutseeritakse ankrumähise pooluste ja ikke jääk-(remanents)voo poolt. Muutes nüüd ergutusvoolu polaarsust ja hakates seda nullväärtusest alates pikkamööda suurendama, siis mingi $i_e < 0$ juures pinge muutub nulliks (punkt *c* joon. 9-3). Seejärel *U* muudab märki ja kasvab absoluutväärtuselt mööda kõvera haru *cd*. Pärast seda, kui *U* ja i_e saavutavad punktis *d* sama absoluutväärtuse kui punktis *a*, vähendatakse voolu i_e kuni nullini (punkt *e*), muudetakse ta polaarsust ja alates nullväärtusest suurendatakse uuesti. Seejuures muutub *U* piki haru *efa*. Lõpptulemusena jõuame jällegi punkti *a*. Tühijooksukõveral on seega kitsa hüstereesisilmuse kuju, tingituna induktori magnetahela magnetilisest hüstereesist.

Tühijooksukarakteristiku ülesvõtmisel võib ergutusvoolu muuta a i n u l t joon. 9-3 noolega näidatud suunas. Vastasel korral punktid hajuvad, s. t. nad ei asu enam samal silmuse harul.

Kriipsjoont joonisel 9-3 nimetatakse arvutuslikuks tühijooksukarakteristikuks. Viimane kordab vastavas mõõtkavas generaatori magneetimiskõverat ja tema abil võib määrata masina küllastusteguri k_μ (vt. § 2-5 ja joon. 2-11).

Tühijooksukarakteristik võimaldab otsustada masina magnetahela küllastuse üle nimipingel, kontrollida eksperimentaalselt arvutustulemusi ning kujutab endast masina ekspluatatsiooniomaduste uurimisalust (vt. allpool samas paragrahvis).

Lühisekarakteristik $I = f(i_e)$, kusjuures $U = 0$ ja $n = \text{const}$,

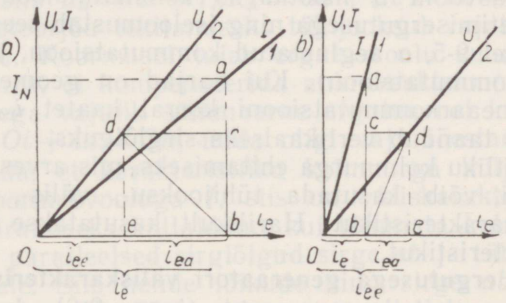
võetakse üles generaatori lühistatud väljundklemmide korral. Et $U = 0$, siis vastavalt võrrandile (9-14) $E_d = I_a R_a$, et aga R_a on väike, siis peab katse tingimustes ka E_a olema väike. Seetõttu tuleb katse läbi viia ettevaatlikult, alustades võimalikult minimaalse ergutusvooluga, et voolud ankrus ei tõuseks lubamatult suureks. Harilikult võetakse lühisekatsel maksimaalseks ankruvooluks $I_k = (1{,}25 \ldots 1{,}5) I_N$.

Et lühisekatsel voog on väike ja masin pole küllastunud, siis seos $I = f(i_e)$ on praktiliselt lineaarne (joon. 9-4). Tingituna jääkvoost masinas on $i_e = 0$ juures lühisvool $I \neq 0$, ulatudes võimsamate masinate puhul nimivooluni ja isegi üle selle. Seetõttu on soovitav sellised masinad enne katsetamist demagneetida, toites nende ergutusmähiseid tühijooksul sellise väärtusega vastassuunalise ergutusvooluga, mille juures $U = 0$.

Demagneetunud masina korral algab lühisekarakteristik nullist (kriipsjoon joon. 9-4). Kui üles on võetud demagneetimata masina lühisekarakteristik (pidev joon joon. 9-4), on seda otstarbekas nihutada endaga paralleelselt koordinaatide algusesse (kriipsjoon joon. 9-4).

Karakteristlik (reaktiiv-) kolmnurk iseloomustab ankrureaktsiooni suurust ja pingelangu ankruahelas. Ta ehitatakse katsetulemuste alusel ankrureaktsiooni suuruse määramiseks ja kasutatakse samuti masina mõningate karakteristikute konstrueerimiseks juhul, kui neid katseliselt üles võtta ei saa.

Karakteristlik kolmnurk on konstrueeritav kas katseandmetest tühijooksu- ja ükskõik millise teise põhikarakteristiku abil või arvutusandmete alusel. Vaatleme siin selle ehitamist tühijooksu- ja lühisekarakteristiku abil. Joonisel 9-5 on kujutatud lühisekarakteristik $I = f(i_e)$ (sirge 1) ja tühijooksukarakteristiku lineaarne



Joon. 9-5. Karakteristliku kolmnurga konstrueerimine:
a — demagneetiva ja *b* — magneetiva ankrureaktsiooni korral

algusosa $U = f(i_e)$ (sirge *2*), mis kulgevad läbi koordinaatide alguspunkti.

Ehitame karakteristliku kolmnurga masina nimivoolu jaoks $I_a = I = I_N$, millele lühisekarakteristikul vastab punkt *a* ja abstsissteljel punkt *b* (joon. 9-5, *a*). Sirgele *ab* paneme lõigu *bc*, mis sirge *2* mõõtkavas vastab pingelangule ankruahelas IR_a, ja tõmbame punktist *c* horisontaali lõikumiseni tühijooksukarakteristikuga punktis *d*. Kolmnurk *bcd* ongi karakteristlik kolmnurk. Selle kolmnurga horisontaalne kaatet *cd* vastab ergutusvoolu mõõtkavas ankrureaktsiooni magneetimisergutusele, mida võib tõestada järgmiselt.

Lõik *Ob* joonisel 9-5, *a* võrdub lühisel nimivoolu $I = I_N$ tekitamiseks vajaliku ergutusvoolu i_e väärtusega. Seejuures ankrus indutseeritavale elektromotoorjõule $E_a = I_N R_a$ vastab lõik *bc*, mille tekitamiseks tühijooksul vajatav ergutusvool i_{eo} võrdub lõiguga *Oe*. Ergutusvoolude vahe $Ob - Oe = eb = i_{ea}$ saab olla põhjustatud ainult ankruvoolu mõjust, vastates seega ankrureaktsiooni magneetimisergutusele ergutusvoolu mõõtkavas.

Joonisel 9-5, *a* on ankrureaktsioon demagneetiv ($i_{ea} > 0$) ja joonisel 9-5, *b* magneetiv ($i_{ea} < 0$). Viimasel juhul on lühisekarakteristik loomulikult järsem. Ankruvoolude teistsuguste väärtuste korral ($I \neq I_N$) kolmnurga *bcd* kaatetid muutuvad praktiliselt võrdeliselt ankruvoolu väärtusega, sest harjade puutetakistuse mittelineaarsuse mõju on tähtsusetu.

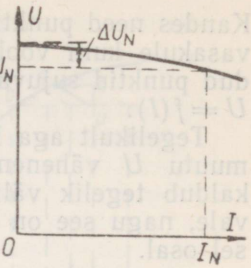
Et lühisekarakteristiku ülesvõtmisel masina magnetahel on küllastumata, siis vastavalt sellele arvestab saadud karakteristlik kolmnurk ainult ankru pikireaktsiooni, põhjustatuna harjade teadlikust või juhuslikust nihutamisest geomeetriliselt neutraalilt ja samuti ka mittelineaarsest kommutatsioonist. Juhul kui harjad asetsevad geomeetrilisel neutraalil, kolmnurga kaatet $i_{ea} = eb$ võrdub ergutusvoolu i_e mõõtkavas kommutatsiooni ankrureaktsiooni magneetimisergutusega ning iseloomustab seega kommutatsiooni (joonisel 9-5, *a* aeglustatud kommutatsioon, joonisel 9-5, *b* kiirendatud kommutatsioon). Kui harjad on geomeetrilisel neutraalil, siis lineaarkommutatsiooni korral kaatet $i_{ea} = eb = 0$ ja kolmnurk *bcd* taandub vertikaalseks sirglõiguks.

Karakteristliku kolmnurga ehitamiseks, mis arvestaks ka ankru ristreaktsiooni, võib kasutada tühijooksu-, välis-, reguleerimis- või koormuskarakteristikut. Harilikult kasutatakse selleks siiski koormuskarakteristikut.

Sõltumatu ergutusega generaatori väliskarakteristik $U = f(I)$, kusjuures $i_e = \text{const}$ ja $n = \text{const}$ (joon. 9-6), kujutab endast generaatori pinge sõltuvust koormusest normaaltingimustel ergutusvoolu järelreguleerimiseta.

Koormusvoolu *I* suurenemisel klemmipinge *U* mõnevõrra lan-

geb, tingituna ankruahelas tekkiva pingelangu IR_a suurenemisest ja samuti E_a vähenemisest, mis omakorda on põhjustatud ankru ristreaktsiooni suurenevast mõjust (kui harjad on geomeetrilisel neutraalil). Edasisel koormusvoolu suurendamisel hakkab pinge järjest kiiremini langema, sest ankrureaktsiooni mõjul üldvoog väheneb ja masina tööpunkt nihkub järsemalt langevale magneetimiskõvera osale. Väliskarakteristikut soovitatakse üles võtta ergutusvoolul $i_e = i_{eN}$, kui koormusvoolule $I = I_N$ vastab pinge $U = U_N$ (nimirežiim). Üleminekul tühijooksule ($I = 0$) tekib siis teatava kindla väärtusega pingetõus ΔU_N (joon. 9-6), mida nimetatakse generaatori nimipingemuutuseks. Sõltumatu ergutusega generaatoris



Joon. 9-6. Sõltumatu ergutusega generaatori väliskarakteristik

$$\Delta U_{N\%} = \frac{\Delta U_N}{U_N} \cdot 100 = 5 \ldots 15\%.$$

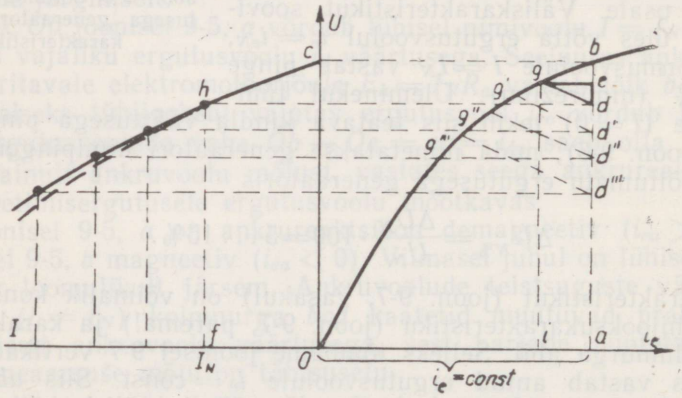
Väliskarakteristikut (joon. 9-7, vasakul) on võimalik konstrueerida tühijooksukarakteristiku (joon. 9-7, paremal) ja karakteristliku kolmnurga abil. Selleks tõmbame joonisel 9-7 vertikaalsirge *ab*, mis vastab antud ergutusvoolule $i_e = \text{const}$. Siis $ab = Oc$ kujutab endast tühijooksupinget ja määrab väliskarakteristiku alguspunkti. Paigutame seejärel joonisele 9-7 karakteristliku kolmnurga *deg*, mis on koostatud vastavas mõõtkavas nimivoolu kohta ($I = I_N$) selliselt, et selle tipp *g* asub tühijooksukarakteristikul ja kaatet *de* sirgel *ab*. Võib tõestada, et sel juhul lõik $ad = fd$ võrdub pingega U nimikoormusel ($I = I_N$). Tõepoolest, kui $U = ad$, siis $E_a = U + I_N R_a = ad + de = ae = ig$, ning sellise elektromotoorjõu tekitamiseks tühijooksul vajatakse ergutusvoolu $i_{e0} = Oi$. Koormusel tuleb ergutusvoolu suurendada $i_{ea} = ge = ia$ võrra, et kompenseerida ankrureaktsiooni demagneetivat mõju. Seega vajalik summaarne ergutusvool koormusel $i_e = i_{e0} + i_{ea} = Oi + ia = Oa$, mida oligi vaja tõestada.

Kui eeldada, et karakteristliku kolmnurga küljed muutuvad võrdeliselt koormusvooluga I, siis on väliskarakteristiku teiste punktide määramiseks küllaldane, kui tõmmata kolmnurga hüpotenuusiga *dg* paralleelsed sirglõigud sirge *ab* ja tühijooksukarakteristiku vahele. Siis nende lõikude ning sirge *ab* lõikepunktid määravadki pinge U väärtuse koormusvooludel

$$I = \frac{g'd'}{gd} I_N \text{ jne.}$$

Kandes need punktid mööda horisontaali joon. 9-7 ordinaatteljest vasakule kuni voolu I vastava väärtuseni ning ühendades saadud punktid sujuva kõveraga, saamegi otsitud väliskarakteristiku $U = f(I)$.

Tegelikult aga karakteristliku kolmnurga horisontaalkaatet ei muutu U vähenemisel võrdeliselt koormusvooluga I. Seetõttu kaldub tegelik väliskarakteristik konstrueeritust mõnevõrra kõrvale, nagu see on näidatud kriipsjoonega joonise 9-7 vasakpoolsel osal.

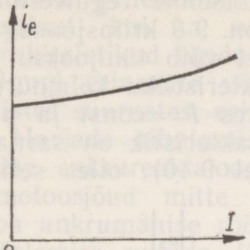


Joon. 9-7. Sõltumatu ergutusega generaatori väliskarakteristiku konstrueerimine tühijooksukõvera ja karakteristliku kolmnurga abil

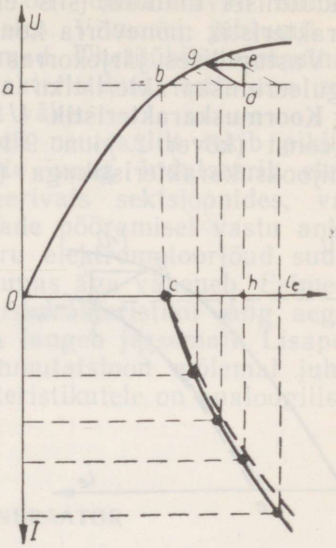
Väliskarakteristiku punkt $U = 0$ juures vastab lühisevoolule generaatori täisergutusel. Kuna R_a on väike, siis see vool ületab 5 ... 15-kordselt I_N. Selline lühis on generaatorile väga ohtlik, sest kommutaatoril tekib ringtuli, ning tekkivad suured mehaanilised jõud ja pöördemomendid võivad masinat mehaaniliselt ohustada. Seetõttu varustatakse kõik ekspluatatsioonis olevad keskmised ja suured generaatorid kiirautomaatlülititega, mis lülitavad generaatori 0,01 ... 0,05 sekundit pärast välise järsu lühise tekkimist võrgust välja. Kahjuks ei kaitse need masinat sisemise lühise korral.

Tühijooksu- ja väliskarakteristiku abil, teades R_a väärtust, võib tegelikku küllastust arvestades konstrueerida karakteristliku kolmnurga iga U ja E_a jaoks, konstrueerides (joon. 9-7) vastupidises järjestuses.

Reguleerimiskarakteristik $i_e = f(I)$, kusjuures $U = \text{const}$ ja $n = \text{const}$. Reguleerimiskarakteristik näitab, kuidas on vaja ergu-



Joon. 9-8. Sõltumatu ergutusega generaatori reguleerimiskarakteristik



Joon. 9-9. Sõltumatu ergutusega generaatori reguleerimiskarakteristiku konstrueerimine tühijooksukõvera ja karakteristliku kolmnurga abil

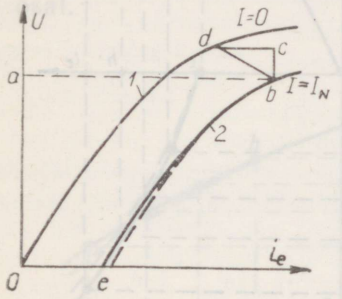
tusvoolu reguleerida, et koormuse muutumisel pinge generaatori klemmidel jääks muutumatuks (joon. 9-8). Koormuse suurenemisel on vaja ergutusvoolu suurendada, et kompenseerida pingelangu suurenemist ankruahela takistusel I_aR_a ja samuti ka ankrureaktsiooni mõju suurenemist. Üleminekul tühijooksult $U = U_N$ nimikoormusele $I = I_N$ tuleb ergutusvoolu suurendada 15...25% võrra.

Reguleerimiskarakteristikut (joon. 9-9 alumine osa) võib konstrueerida tühijooksukarakteristiku ja karakteristliku kolmnurga abil (joon. 9-9 ülemine osa). Antud pingele $U = Oa = cb$ vastav ergutusvool i_e tühijooksul $I = 0$ võrdub lõiguga Oc. Nimivoolule vastav karakteristlik kolmnurk paigutatakse nii, et ta tipud g ja d asetseksid vastavalt tühijooksukarakteristikul ja sirgel abd. Sel juhul lõik $Oh = ad$ võrdub ergutusvooluga nimikoormusel $I = I_N$, mida võib tõestada samuti kui väliskarakteristiku konstrueerimise juhtumil. Karakteristiku ülejäänud punktide leidmiseks on küllaldane tõmmata (joon. 9-9) karakteristliku kolmnurga hüpotenuusile dg paralleellõigud tühijooksukarakteristiku ja sirge abd vahele. Nende lõikude alumised punktid vastavad ergutusvoolu väärtustele koormustel, mis on määratud vastava lõigu ja hüpotenuusi dg suhtega. Lastes neist punktidest vertikaaljooned alla (joon. 9-9) lõikumiseni koormusvoolu I tasapinnaga, saamegi reguleerimiskarakteristiku punktid. Et masina küllastus koormuse

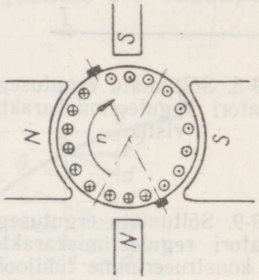
muutumisel muutub, siis erineb tegelik, katseline reguleerimiskarakteristik mõnevõrra konstrueeritust (joon. 9-9 kriipsjoonega).

Vastupidises järjekorras konstrueerimisel võib tühijooksu- ja reguleerimiskarakteristiku abil saada karakteristliku kolmnurga.

Koormuskarakteristik $U = f(i_e)$, kusjuures $I = \text{const}$ ja $n = \text{const}$ (kõver *2* joon. 9-10). Koormuskarakteristik on sarnane tühijooksukarakteristikuga (kõver *1* joonisel 9-10), olles sellest



Joon. 9-10. Sõltumatu ergutusega generaatori koormuskarakteristik



Joon. 9-11. Harjade nihutamine neutraalilt lisapooluste olemasolu korral

veidi madalamal, tingituna pingelangust ankruahelas ja ankrureaktsiooni mõjust. Tühijooksukarakteristik on seega ainult koormuskarakteristiku erijuhuks ($I = 0$). Tavaliselt võetakse koormuskarakteristik üles nimivoolu juures $I = I_N$.

Selgitame, kuidas kõverate *1* ja *2* abil (joon. 9-10) konstrueerida karakteristlikku kolmnurka. Olgu lõik *Oa* võrdne pingega U, mille juures soovitakse ehitada kolmnurka (näiteks $U = U_N$). Selleks tõmbame horisontaali *ab* ja koormuskarakteristikul asuvast punktist *b* kanname vertikaalile lõigu $bc = IR_a$. Siin *I* vastab voolule, mille juures koormuskarakteristik on üles võetud. Punktist *c* tõmmatud horisontaallõik *cd* on otsitava kolmnurga *bcd* kaatet, mis arvestab ankrureaktsiooni mõju koormusel. Selle konstruktsiooni tõestus on analoogiline väliskarakteristiku konstrueerimisel toodud tõestusega (vt. joon. 9-7).

Libistades sel viisil konstrueeritud karakteristlikku kolmnurka (joonisel 9-10) endaga paralleelselt nii, et tipp *d* asub tühijooksukõveral, siis tipp *b* joonistab koormuskarakteristiku (kriipsjoonega kõver joonisel 9-10). See kõver erineb mõnevõrra katselisest kõverast, sest kaateti *cd* pikkus muutub sõltuvalt masina küllastusastmest. Punkt *e* (joonisel 9-10) vastab generaatori lühisepunktile.

Kõik generaatori karakteristikud on joonistatavad niihästi absoluut- kui ka suhtelistes suurustes. Viimasel juhtumil on karakteristikud tunduvalt ülevaatlikumad. Ühetüübiliste masinate (olgugi erinevate võimsustega) karakteristikud, esitatuna suhtelistes suurustes, erinevad üksteisest vähe.

Harjade nihutamisel geomeetriliselt neutraalilt tekib pikiteljeline ankrureaktsioon ja lisapooluste voog indutseerib elektromotoorjõud mitte enam kommuteerivais sektsioonides, vaid juba ankrumähise rööpharudes. Harjade pööramisel vastu ankru pöörlemise suunda (joon. 9-11) ankru elektromotoorjõud suureneb, nihutamisel ankru pöörlemise suunas aga väheneb. Esimesel juhul on koormuse suurenemisel väliskarakteristiku lang aeglasem (vt. joonis 9-6), teisel juhul aga langeb järsemalt. Lisapooluste olemasolu korral halveneb kommutatsioon mõlemal juhul.

Harjade nihke mõju teistele karakteristikutele on analoogiliselt analüüsitav.

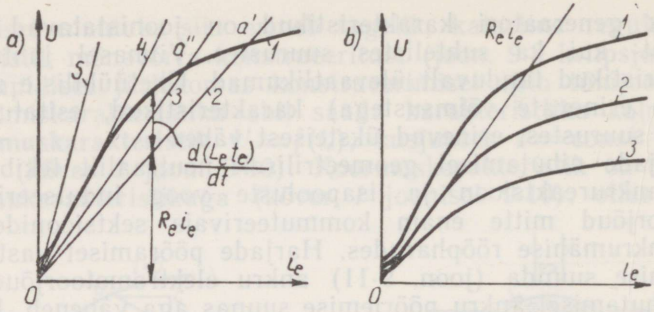
9-4. HARUVOOLUGENERAATOR

Haruvoolugeneraator ergutub ainult siis, kui 1) poolustes on olemas jääkvoog ja 2) ergutusmähise otsad on õieti lülitatud või ankru pöörlemissuund on õige. Peale selle peab ergutusahela takistus olema väiksem ja ankru pöörlemiskiirus suurem teatavaist kriitilistest väärtustest.

Endaergutuseks on küllaldane, et jääkvoog moodustaks 2... ...3% masina nimivoost. Ekspluatatsioonis olevas masinas on selline jääkvoog alati olemas. Uue või mingil põhjusel demagneetunud masina ergutusmähisest tuleb mingist välisest alalisvooluallikast saadavat voolu läbi lasta, et teda magneetida. Vaatleme, kuidas toimub endaergutus eespool loetletud eeltingimuste olemasolu korral.

Pöörlevas ankrumähises indutseeritakse jääkvoo poolt nõrk elektromotoorjõud, mis tekitab ergutusmähises väikese voolu i_e. See voog suurendab pooluste voogu, mistõttu ankrus indutseeritakse juba tugevam elektromotoorjõud ja vastavalt tekib ka suurem i_e jne. Endaergutuse selline laviinitaoline protsess kestab seni, kuni generaatori pinge saavutab teatava püsiväärtuse.

Kui ergutusmähise lülitus või ankru pöörlemissuund on vale, tekib vastupidise suunaga ergutusvool, mis vähendab jääkvoogu, ning endaergutus on võimatu. Siis on vaja kas ergutusmähise otsad ümber lülitada või pöörlemissuunda muuta. Vajalikku endaergutuse eeltingimuste olemasolu on võimalik kontrollida väikese piirkonnaga voltmeetri abil ankrumähise klemmidel, ühendades ja katkestades ergutusahelat ning jälgides ankrupinget.



Joon. 9-12. Haruvoolugeneraatori endaergutus erinevate ergutusahela takistuste (*a*) ja erinevate pöörlemiskiiruste (*b*) korral

Endaergutusega generaatori polaarsus sõltub jääkvälja polaarsusest. Kui etteantud pöörlemissuuna korral on vaja generaatori polaarsust muuta, tuleb ta välise vooluallika voolu abil ümber magneetida.

Vaatleme lähemalt generaatori endaergutusprotsessi tühijooksul.

Joonisel 9-12, *a* on kujutatud tühijooksukarakteristik (kõver *1*). Sirge *2* on nn. ergutusahela karakteristik, s. o. sõltuvus $U_e = R_e i_e$, kus $R_e = \text{const}$ ja võrdub kogu ergutusahela takistusega, kaasa arvatud ka reguleerreostaat.

Endaergutusprotsessi vältel $i_e \neq \text{const}$ ja pinge ergutusahela klemmidel

$$U_e = U'_e + \frac{d(L_e i_e)}{dt} = R_e i_e + \frac{d(L_e i_e)}{dt},$$

kus L_e on ergutusahela induktiivsus.

Ankrupinge tühijooksul ($I = 0$)

$$U_a = E - i_e R_a$$

on antud joonisel 9-12, *a* kõveraga *1*. Kuna i_e on väike, siis praktiliselt $U_a = E_a$. Kuid haruvoolugeneraatori puhul $U_a = U_e$ (joon. 9-1, *b*). Seega kõvera *1* ja sirge *2* vastavate ordinaatide vahe joonisel 9-12, *a* iseloomustab ergutusvoolu i_e muutumise kiirust ja suunda

$$\frac{d(L_e i_e)}{dt}.$$

Kui sirge *2* kulgeb allpool kõverat *1*, siis

$$\frac{d(L_e i_e)}{dt} > 0,$$

ergutusvool i_e kasvab ja suureneb ka generaatori pinge kuni sirge *2* ja kõvera *1* lõikepunktini, kus

$$\frac{d(L_e i_e)}{dt} = 0.$$

Siis ergutusvoolu i_e kasv lakkab.

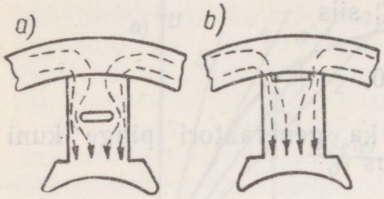
Vaadeldes joonist 9-12, *a*, näeme, et ergutusvoolu i_e ja pinge U kasv on alguses aeglane, siis kiireneb ja protsessi lõpus jällegi aeglustub. Endaergutusprotsess lakkab tühijooksukarakteristiku mittelineaarsuse tõttu punktis a'. Küllastuse puudumisel kasvaks generaatori pinge U_a praktiliselt lõpmatuseni $U_a = \infty$. Üldiselt iga endaergutusprotsess — elektriline, mehaaniline jne., mis esineb mitmesugustes seadmetes, on piiratud ainult süsteemi karakteristiku mittelineaarsusega.

Kui suurendada ergutusahela takistust R_e, saame sirge *2* asemel sirge *3* (joon. 9-12, *a*). Endaergutusprotsess seejuures aeglustub ja masina lõpp-pinge, määratuna punktiga a'', on väiksem. Suurendades veelgi takistust R_e, saame sirge *4*, mis on puutujaks kõverale *1*. Sel juhul masin asub endaergutuse piiril ja mingil juhuslikul väikesel pöörlemiskiiruse või R_e muutusel (näit. soojenemise mõjul) võib ta kas arendada väikest pinget või selle kaotada. Sirgele *4* vastavat takistust R_e nimetatakse kriitiliseks takistuseks (R_{ekr}). Kui $R_e > R_{ekr}$ (sirge *5*), siis endaergutus on võimatu ning masina pinge on määratud jääkvoo suurusega.

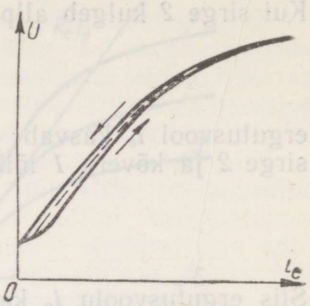
Öeldust järeldub, et haruvoolugeneraator saab töötada ainult magnetahela teatava küllastuse olemasolu korral. Takistuse R_e muutmisega saab pinget U reguleerida kuni väärtuseni $U = U_{min}$, mis vastab tühijooksukarakteristiku põlve algusele. Normaalkonstruktsiooniga masinates

$$U_{min} = (0{,}65 \ldots 0{,}75)\, U_N.$$

Ankru elektromotoorjõud $E \sim n$. Erinevail kiirustel $n_1 > n_2 > n_3$ saadavad tühijooksukarakteristikud on kujutatud joonisel 9-12, *b* kõveratega *1*, *2* ja *3*. Jooniselt nähtub, et mingi R_e väärtuse juures vastab kõverale stabiilne endaergutus, kõvera *2* korral asub masin endaergutuse piiril ja kõvera *3* puhul on endaergutus võimatu. Järelikult vastab iga R_e väärtusele teatav kindel pöörlemiskiirus $n = n_{kr}$ (kõver *2* joonisel 9-12, *b*), millest väiksema kiiruse



Joon. 9-13. Magnetahela magnetilised küllastussillad



Joon. 9-14. Haruvoolugeneraatori tühijooksukarakteristik

korral masin ei ergutu. Seda kiirust $n = n_{kr}$ nimetatakse kriitiliseks pöörlemiskiiruseks.

Mõnel juhul nõutakse, et haruvoolugeneraatori pinge U oleks laiades piirides reguleeritav. Näiteks $U_N/U_{min} = 5 : 1$ või isegi $U/U_{min} = 10 : 1$ (sünkroonmasina erguti — vt. 5. osa). Sel juhul tühijooksukarakteristik peab juba oma algosas kõverduma. Selleks tehakse magnetahelasse vähendatud ristlõikega osad («magnetilised küllastussillad»). Need tehakse kas «aknana» pooluse südamiku keskele (joon. 9-13, *a*) või ülaserva (joon. 9-13, *b*). Sellistes sillakestes on voo kontsentratsioon suur ja küllastus tekib juba magnetvoo väikeste väärtuste korral.

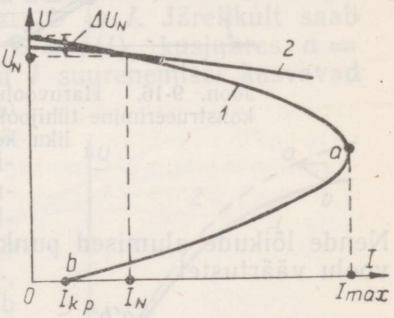
Tühijooksukarakteristik $U = f(i_e)$, kusjuures $I = 0$ ja $n = \text{const}$, on haruvoolugeneraatori juures üles võetav ainult ühe ergutusvoolu suuna korral (joon. 9-14), reguleerides ergutusvoolu ergutusahelas oleva reostaadi abil (vt. joon. 9-1, *b*). Et ergutusvool i_e on väike, siis $U = E_a$ ja seega on haruvoolugeneraatori tühijooksukarakteristik täiesti analoogiline sõltumatu ergutusega generaatori vastava karakteristikuga.

Lühisekarakteristik $I = f(i_e)$, kusjuures $U = 0$ ja $n = \text{const}$, on haruvoolugeneraatori puhul üles võetav ainult siis, kui ergutusmähist toidetakse välisest vooluallikast nagu sõltumatu ergutusega generaatori korral (kui endaergutusel $U = 0$, siis ka $i_e = 0$).

Väliskarakteristik $U = f(I)$ võetakse üles $R_e = \text{const}$ ja $n = \text{const}$ puhul, s. t. generaatori loomulikus tööolukorras ilma ergutust reguleerimata. Seetõttu lisandub sõltumatu ergutusega generaatori puhul esinevale kahele pingelangu põhjusele (vt. § 9-3) veel kolmas — ergutusvoolu i_e vähenemine pinge U vähenemisel, mistõttu haruvoolugeneraatori väliskarakteristik (joon.

9-15, kõver *1*) langeb järsemalt kui sõltumatu ergutusega generaatoril (kõver *2*). Seega on haruvoolugeneraatori nimipingelang (vaata määrangut § 9-3) ka suurem, moodustades nimipingest 10...20%.

Haruvoolugeneraatori väliskarakteristikule on iseloomulik see, et voolu teatava maksimaalväärtuse $I = I_{max}$ (punkt *a* joon. 9-15) juures ta teeb silmuse, tulles tagasi abstsissteljel asuvasse punkti *b*, mis vastab lühise püsivoolule. Vool I_{kp} on suhteliselt väike ning on määratud ainult jääkvoo suurusega, sest $U = 0$ puhul on ka $i_e = 0$. Karakteristiku selline kulg on seletatav järgmise aruteluga. Voolu I suurenemisel pinge U langeb algul aeglaselt. Hiljem koos U, i_e ja Φ_δ vähenemisega väheneb magnetahela küllastus ning väike voolu i_e vähenemine põhjustab järjest suurenevat Φ_δ ja U langu (vt. joon. 9-14). Punkt *a* joonisel 9-15 vastab üleminekule tühijooksukarakteristiku põlvelt ta alumisele sirgjoonelisele, küllastumata osale. Edasine välisahela takistuse R_v vähendamine alates punktist *a* ei põhjusta enam voolu I suurenemist, vaid vastupidi, ta vähenemist, sest U väheneb kiiremini kui R_v.

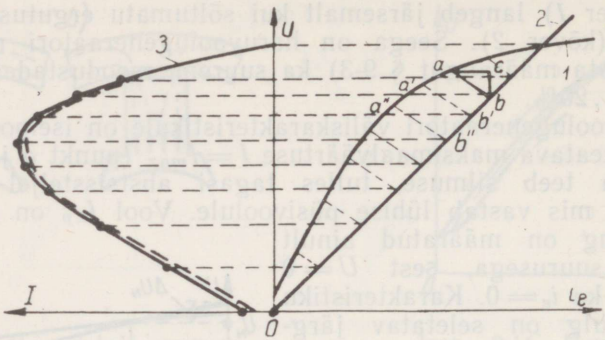


Joon. 9-15. Haruvoolugeneraatori väliskarakteristik (*1*) ja sõltumatu ergutusega generaatori väliskarakteristik (*2*)

Töö karakteristiku osal *ab* on üldiselt ebastabiilne ja vool I kaldub vabalt muutuma. Vool I_{kp} on mõningal juhul nimivoolust I_N mitu korda suurem.

Haruvoolugeneraatori väliskarakteristiku konstrueerimine tühijooksukarakteristiku ja karakteristliku kolmnurga abil on toodud joonisel 9-16. Kõver *1* on tühijooksukarakteristik, sirge *2* — ergutusahela karakteristik $U_e = R_e i_e$ — antud $R_e = \text{const}$ korral ja kõver *3* — konstrueeritud väliskarakteristik.

Kui $I = 0$, on pinge U määratud kõvera *1* ja sirge *2* lõikepunktiga. Et leida pinget U voolu $I = I_N$ korral, paigutame nimivoolu jaoks ehitatud karakteristliku kolmnurga nii, et ta tipud *a* ja *b* paikneksid vastavalt kõveral *1* ja sirgel *2*. Siis määrab punkt *b* otsitava pinge U väärtuse, mida on võimalik tõestada nii, nagu seda tehti sõltumatu ergutusega generaatori vastava karakteristiku konstrueerimisel § 9-3. Voolude teiste väärtuste jaoks võib *1* ja *2* vahele tõmmata sirglõigud paralleelselt *ab*-ga, mis kujutavad endast uute karakteristlike kolmnurkade hüpotenuuse.



Joon. 9-16. Haruvoolugeneraatori väliskarakteristiku konstrueerimine tühijooksukarakteristiku ja karakteristliku kolmnurga abil

Nende lõikude alumised punktid b', b'' jne. määravadki pinge U voolu väärtustel

$$I' = \frac{a'b'}{ab} I_N, \quad I'' = \frac{a''b''}{ab} I_N \quad \text{jne.}$$

Kandes kõik need punktid ordinaatteljest vasakule kuni vastavate voolude väärtusteni ning ühendades nad omavahel sujuva kõveraga, saamegi otsitava väliskarakteristiku (joon. 9-16, kõver *3*). Et karakteristliku kolmnurga kaatet *ac* ei sõltu voolust lineaarselt, erineb katseliselt saadud karakteristik $U = f(I)$ mõnevõrra konstrueeritud kõverast (kriipsjoonega kõver joon. 9-16).

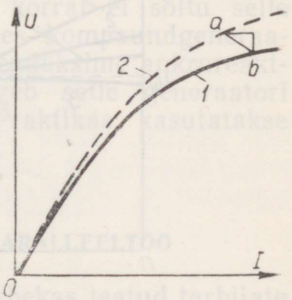
Olgugi et haruvoolugeneraatori lühise püsivool pole eriti suur, on järsk lühis talle praktiliselt niisama ohtlik kui sõltumatu ergutusega generaatori puhulgi. See on seletatav ergutusmähise suure induktiivsuse ja magnetahela massiivosades indutseeritavate pöörisvooludega, mistõttu masina magnetvoog väheneb küllaltki aeglaselt. Kiirelt kasvav vool võib saavutada väärtusi $I_k = (5 \ldots 15) I_N$.

Reguleerimiskarakteristik $i_e = f(I)$, kusjuures $U = \text{const}$ ja $n = \text{const}$, võetakse üles samuti nagu sõltumatu ergutusega generaatori puhul. Et i_e ja $R_a i_e$ on väikesed, siis ergutusvoolust tekkiv ankru pingelang praktiliselt U väärtust ei mõjuta. Seetõttu on nimetatud karakteristiku kuju samasugune nagu sõltumatu ergutusega generaatori korral. Selle karakteristiku konstrueerimine tühijooksukarakteristiku ja karakteristliku kolmnurga abil toimub samuti analoogiliselt sõltumatu ergutusega generaatori karakteristiku konstrueerimisega.

Kokku võttes võib öelda, et haruvoolu- ja sõltumatu ergutusega generaatorite omadused ja karakteristikud erinevad üksteisest vähe. Ainuke märgatav erinevus on nende väliskarakteristikutes piirides $I = 0$ kuni $I = I_N$. Nende karakteristikute suur erinevus piirkonnas $I > I_N$ ei oma praktilist tähtsust, sest sellises režiimis masin normaalses ekspluatatsioonis ei tööta.

9-5. PEAVOOLUGENERAATOR

Peavoolugeneraatoris $i_e = I_a = I$ ja seetõttu on tal $n = \text{const}$ puhul ainult kaks sõltumatut muutujat: U ja I. Järelikult saab üles võtta ainult väliskarakteristiku $U = f(I)$, kusjuures $n = \text{const}$ (joon. 9-17, kõver *1*). Voolu I suurenemisel kasvavad voog Φ_δ ja elektromotoorjõud E_a. Seetõttu vastavalt valemeile (9-11) ja (9-14) suureneb U voolu kasvamisel esialgu lineaarselt, kuid masina küllastumisel ta suurenemine aeglustub. Küllalt suurte voolude juures aga hakkab pinge hoopis vähenema. Tühijooksu-, lühise- ja teisi karakteristikuid saab üles võtta ainult sõltumatu ergutusega, milleks tuleb ergutusmähis lülitada madalpingelisele ja suure vooluga välisele vooluallikale. Nende karakteristikute andmete alusel saab ehitada karakteristliku kolmnurga ja viimase ning tühijooksukarakteristiku (joon. 9-17, kõver *1*) abil konstrueerida väliskarakteristiku (joon. 9-17, kõver *2*). Selleks nihutatakse kolmnurka endaga paralleelselt, nii et tipp *a* asub tühijooksukarakteristikul, ja muudetakse ta külgi võrdeliselt vooluga I. Tipp *b* joonistab sealjuures väliskarakteristiku *1*.



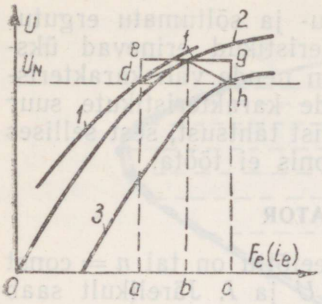
Joon. 9-17. Peavoolugeneraatori väliskarakteristik

Peavoolugeneraatori lühisel tekib väga suur vool.

Et peavoolugeneraatori pinge koormuse muutumisel tugevasti muutub, siis ei ole ta enamiku tarbijate toiteks kõlblik ja seda saab kasutada ainult spetsiaalseadmeis.

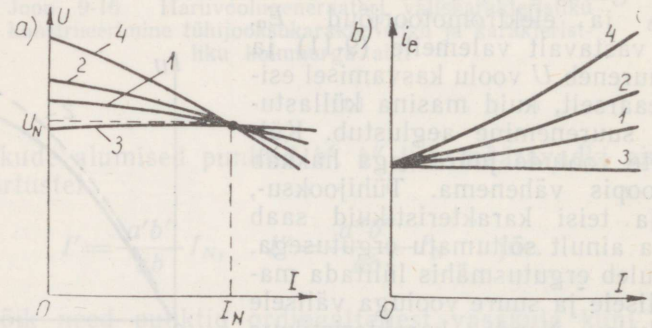
9-6. KOMPAUNDGENERAATOR

Kompaundgeneraator ergutub samuti kui haruvoolugeneraator, mistõttu nende tühijooksukarakteristikud on analoogilised. Lühisekarakteristikut saab üles võtta, toites rööpergutusmähist välisest vooluallikast ja lülitades jadaergutusmähise selliselt, et ta väli oleks suunatud vastu rööpmähise voole. Voogude samasuunalisuse korral tekib ankrus lubamatult suur lühisevool.



Joon. 9-18. Kompaundgeneraatori väliskarakteristiku konstrueerimine tühijooksukarakteristiku ja karakteristliku kolmnurga abil

Joon. 9-19. Sõltumatu ergutusega (*1*), haruvoolu- (*2*), pärikompaund- (*3*) ja vastukompaundgeneraatori (*4*) väliskarakteristikud (*a*) ja reguleerimiskarakteristikud (*b*)



Võttes üles lühisekarakteristiku ühel juhul jadaergutusmähise vastulülituses ja teisel juhul jadamähiseta, saab määrata viimase magneetimisergutuse rööpmähise ergutusvoolu mõõtkavas ning konstrueerida karakteristliku kolmnurga ka jadaergutusmähise pärilülituse jaoks.

Välis-, reguleerimis- ja koormuskarakteristikud võetakse üles samuti nagu haruvoolugeneraatori puhul.

Koormuskarakteristik kujutab endast pinge *U* sõltuvust rööpergutusmähise voolust. Seetõttu asub jadaergutusmähise pärilülituse korral kompaundgeneraatori koormuskarakteristik sõltumatu ergutusega või haruvoolugeneraatori koormuskarakteristikust kõrgemal. Joonisel 9-18 on kõver *1* kompaundgeneraatori koormuskarakteristik, kõver *2* — tühijooksukarakteristik ja kõver *3* — sõltumatu ergutusega või haruvoolugeneraatori koormuskarakteristik.

Lõik *Oc* joonisel 9-18 vastab nimipinge ja ankru nimivoolu korral vajalikule summaarsele magneetimisergutusele F_Σ. Lõik *Oa* vastab rööpergutusmähise magneetimisergutusele F_r, lõik *ac* aga jadaergutusmähise magneetimisergutusele F_j. Kaatet $fg = bc$

määrab ergutusvoolu magneetimisergutuse mõõtkavas ankrureaktsiooni demagneetiva magneetimisergutuse F_{ar}. Et magneetimisergutused F_j ja F_{ar} on võrdelised ankruvooludega, võib vaadelda nende resulteerivat mõju, s. o. määrata magneetimisergutus $F = F_j - F_{ar} = ac - bc = ab = ef$. Sel juhul öeldakse, et jadaergutusmähise pärilülituse korral on ta mõju analoogiline ankrureaktsiooni magneetiva komponendiga ja generaatori karakteristlik kolmnurk omandab kuju *def* (joon. 9-18).

Generaatori väliskarakteristiku konstrueerimine tühijooksukarakteristiku ja karakteristliku kolmnurga abil toimub põhimõtteliselt samuti nagu haruvoolugeneraatori korral.

Joonistel 9-19, *a* ja *b* on võrdluseks toodud eritüübiliste generaatorite väli- ja reguleerimiskarakteristikud. Pärilülituses kompaundgeneraatori väliskarakteristik on kõige sobivam. Sobiva magneetimisergutusega jadaergutusmähise korral ei sõltu selle pinge praktiliselt koormusest. Vastulülituses kompaundgeneraatori korral on efekt samasugune, nagu suurendaksime ankrureaktsiooni demagneetivat mõju. Seetõttu langeb selle generaatori pinge koormuse suurendamisel järsult. Praktikas kasutatakse kompaundgeneraatorit vastulülituses harva.

9-7. ALALISVOOLUGENERAATORITE PARALLEELTÖÖ

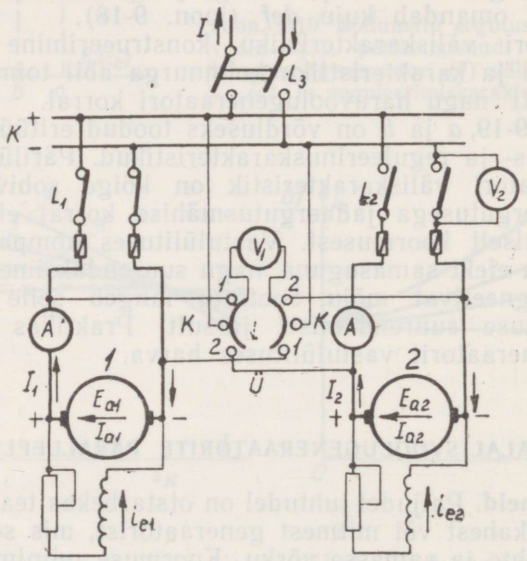
Üldmärkmeid. Paljudel juhtudel on otstarbekas teatud tarbijate gruppi toita kahest või mitmest generaatorist, mis sel juhul töötavad koos ühte ja samasse võrku. Koormuse miinimumi ajal on võimalik üks või mitu generaatorit välja lülitada, mis vähendab ekspluatatsioonikulusid. Katkematu toite tagamiseks tarbijatele (kui see on vajalik) peab üks generaator olema reservis. Reservgeneraatori võimsus on mitme generaatori koostöö korral väiksem. Sellise koostöö korral on võimalik läbi viia ka generaatorite plaanilist või avariiremonti tarbijate toidet katkestamata.

Sellisele koostööle lülitatakse sõltumatu ergutusega, haruvoolu- ja kompaundgeneraatoreid, kusjuures need lülitatakse võrku tavaliselt paralleelselt. Jadalülitust kasutatakse harva.

Generaatorite paralleeltöö korral on vaja täita järgmisi tingimusi: 1) generaatori lülitamisel teiste generaatoritega paralleelselt ei tohi esineda suurt voolutõuget, mis rikuks generaatorite ja tarbijate töörežiimi; 2) generaatorid peavad võtma koormust peale võrdeliselt nende nimivõimsustega. Teise nõude mittetäitmisel ei ole võimalik kõiki generaatoreid nimivõimsuseni koormata. Kui üks generaatoreist on koormatud juba nimivõimsuseni, võivad teised olla koormatud ainult osaliselt. Edasine üldkoormuse tõstmine on aga lubamatu, sest siis koormatakse üht generaa-

torit üle. Peale selle väheneb ebaühtlase koormatuse korral kogu seadme kasutegur summaarse kao suurenemise tõttu.

Sõltumatu ergutusega ja haruvoolugeneraatorite paralleeltöös ei ole mingit olulist erinevust. Seetõttu vaatleme algul haruvoolugeneraatorite paralleeltööd ja hiljem peatume kompaundgeneraatorite paralleeltöö erinevustel.



Joon. 9-20. Haruvoolugeneraatorite paralleeltöö lülitusskeem

Lülitamine paralleeltööle. Joonisel 9-20 on toodud haruvoolugeneraatorite paralleeltöö lülitusskeem.

Töötagu generaator *1* kogumislattidele *K*, kuhu tahame lülitada ka generaatori *2*. Selleks on vaja täita järgmisi tingimusi: 1) generaatori *2* polaarsus olgu sama mis generaatoril *1* või lattidel *K*, s. t. generaatori *2* positiivne (+) ja negatiivne (—) klemm tuleb lüliti L_2 abil ühendada kogumislattide sama polaarsusega klemmiga; 2) generaatori *2* elektromotoorjõud võrdugu kogumislattide pingega. Nende nõuete täitmisel ei teki generaatori lattidele lülitamisel mingit voolutõuget ja generaator jääb pärast võrku lülitamist tööle koormuseta, s. o. tühijooksul. Et tagada ja ühtlasi ka kontrollida eelnimetatud tingimuste täitmist lülitamisel, toimitakse järgmiselt. Generaator *2* viiakse nimipöörlemiskiirusele ja ergutatakse vajaliku pingeni. Pinget mõõdetakse

ümberlülitatava voltmeetriga V_1 ümberlüliti $Ü$ asendis *2-2*. Lattide pinget mõõdetakse sama voltmeetriga, kusjuures ümberlüliti on asendis *K-K*. Et samaaegselt kontrollida ka polaarsuste vastavust, peab voltmeeter V_1 olema magnetelektrilise mõõtesüsteemiga. Kui selline voltmeeter on lülitatud vastavalt skeemile joon. 9-20, siis on näit generaatori *2* ja kogumislattide õige polaarsuse korral samasuunaline. Kui generaatori *2* polaarsus on vale, tuleb ta ankrumähise otsad ümber vahetada. Vajalik generaatori pinge saadakse selle ergutusvoolu i_{e2} reguleerimisega ergutusreostaadi abil.

Lülitustingimuste õigsust saab kontrollida ka teisiti. Selleks kasutatakse lüliti L_2 ühe pooluse vahele ühendatud voltmeetrit V_2. Kui lülitada L_2 teine poolus (nuga) kogumislattidele, siis pinge õige suuruse ja polaarsuse korral voltmeetri V_2 näit võrdub nulliga.

Generaatori *2* vale polaarsuse korral mõjuvad mõlema generaatori elektromotoorjõud generaatorite ankrumähistest ja lattidest moodustuvas kinnises ahelas järjestikku.

Et selle ahela takistus on väike, siis on tekkiv olukord ekvivalentne lühisega, mis tekitab seadme avarii. Õige polaarsuse, kuid ebavõrdsete pingete korral tekib generaatoris *2* ühtlustusvool

$$I_ü = \frac{U_1 - E_{a2}}{R_{a2}} = \frac{E_{a1} - I_{a1}R_{a1} - E_{a2}}{R_{a2}},$$

mille väärtus võib samuti osutuda küllaltki suureks.

Haruvoolugeneraatorite paralleeltöö. Kahe või enama generaatori paralleeltöö puhul on nende pinged U alati omavahel võrdsed, sest nad on lülitatud samadele kogumislattidele. Seetõttu saab kahe generaatori korral nende pingete võrrandid avaldada kujul

$$U = E_{a1} - I_{a1}R_{a1} = E_{a2} - I_{a2}R_{a2}, \qquad (9\text{-}16)$$

kus $E_{a1} = C_{E1}\Phi_{\delta 1}n_1$; $E_{a2} = C_{E2}\Phi_{\delta 2}n_2$.

Pärast generaatori *2* lülitamist kogumislattidele (joon. 9-20) võib teda vooluga koormata. Selleks on vaja generaatori elektromotoorjõudu E_{a2} tõsta lattide pingest U suuremaks, mille tagajärjel generaatori *2* ankrumähises tekib I_{a2}, vt. võrrand (9-16). Muutumatu üldkoormusvoolu korral väheneb vool I_{a1} selle võrra. Kui elektromotoorjõud E_{a1} jääb samaks, peab lattide pinge $U = E_{a1} - I_{a1}R_{a1}$ tõusma. Järelikult, soovides kogumislattide pinget hoida konstantsena ($U = \text{const}$), tuleb samaaegselt E_{a2} suurendamisega vähendada E_{a1}. Elektromotoorjõude E_{a1} ja E_{a2} on võimalik muuta kas ergutusvoolu i_e või kiiruse n muutmisega. Mõlemal juhul muutub generaatori ja teda käitava jõumasina võimsus. Tavaliselt muudetakse ekspluatatsioonitingimustes generaa-

torite ergutusvoole. Sel juhul töötab primaarjõumasin oma loomuliku karakteristikuga $n = f(P)$. Mootori koormuse muutumisel muutub ka ta kiirus, auru- või hüdraulilise mootori korral muudab kiirusregulaator mootorisse antava kütuse, auru või vee hulka.

Seega, soovides näiteks generaatori *1* koormust üle kanda generaatorile *2*, toimitakse järgmiselt: vähendatakse i_{e1} (või n_1), suurendades samal ajal i_{e2} (või n_2) seni, kuni $I_1 = 0$. Pärast seda võib generaatori *1* välja lülitada. Kui reguleerimisel i_{e1} liiga palju vähendada, saabub olukord, kus $E_{a1} < U$. Sel juhul voolud I_{a1} ja I_1 muudavad märki, vt. võrrand (9-16), s. o. muudavad oma suunda. Generaator *1* hakkab tööle mootorina, tarbides generaatori *2* poolt toodetavat energiat. Primaarse soojus- või hüdromootori korral on generaatori üleminek mootorirežiimi lubamatu, sest see võib esile kutsuda mootori avarii.

Tingimata on vaja arvestada, et R_{a1} ja R_{a2} väiksuse tõttu kutsuvad juba väikesed i_{e1} ja i_{e2} muutused esile suuri generaatorite koormusvoolude kõikumisi. Vastavalt võrrandile (9-16) tasakaalustatakse E_{a1} ja E_{a2} muutused konstantse pinge U korral $I_{a1}R_{a1}$ ja $I_{a2}R_{a2}$ muutumistega. Seetõttu toimugu ergutusvoolude reguleerimine sujuvalt ja ettevaatlikult. Ekspluatatsioonitingimustes reguleeritakse pinget U tihti generaatorite ergutusvoolude automaatregulaatoritega, mille karakteristikud valitakse niisugused, et need tagavad koormuse õige jaotumise generaatorite vahel.

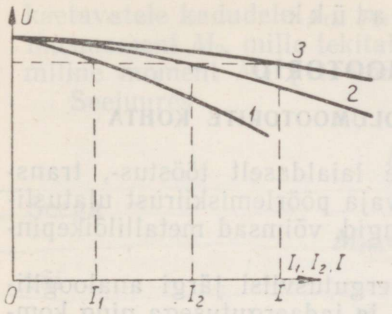
Kui generaatorid töötavad paralleelselt ergutuse järelreguleerimiseta, siis koormuse jaotus nende vahel sõltub väliskarakteristikutest. Olgu joonisel 9-21 kujutatud kõverad *1* ja *2* kahe võrdse võimsusega generaatori *1* ja *2* väliskarakteristikud. Generaatorite töötamisel tühijooksul $I_1 = I_2 = 0$ on nende pinged võrdsed $U = U_0$. Lülitades nüüd lattidele mingi koormuse, väheneb pinge väärtuseni U, mis on ühine mõlemale generaatorile. Seejuures koormatakse «pehmema» väliskarakteristikuga generaatorit *1* väiksema vooluga (I_1) kui generaatorit *2* (I_2), millel on «jäigem» väliskarakteristik. Sõltuvus $U = f(I = I_1 + I_2)$ on toodud joonisel 9-21 (kõver *3*).

Erineva võimsuse generaatorite korral annavad parema ettekujutuse koormuse jagunemisest nende vahel suhtelistes suurustes väljajoonistatud väliskarakteristikud:

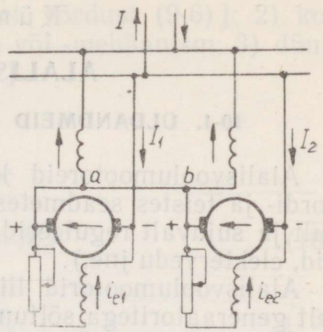
$$U_* = f(I_{1*}) = f\left(\frac{I_1}{I_{1N}}\right),$$

$$U_* = f(I_{2*}) = f\left(\frac{I_2}{I_{2N}}\right).$$

Kui need karakteristikud ühtivad, siis jaguneb koormus generaato-



Joon. 9-21. Generaatorite paralleeltöö väliskarakteristikute režiimis



Joon. 9-22. Pärikompaundgeneraatorite paralleeltöö lülitusskeem

rite vahel võrdeliselt nende nimivõimsusega, mis on muidugi sobivaim.

Kolme või enama generaatori paralleeltöö korral esinevad kõik ülalkirjeldatud nähtused ja nende tööd saab analüüsida analoogiliselt eelkirjeldatuga.

Kompaundgeneraatorite paralleeltöö. Kahe pärilülituses kompaundgeneraatori paralleeltöö lihtsustatud skeem on toodud joonisel 9-22. Kui joonisel 9-22 näidatud ühtlustusühendus *ab* puuduks, oleks stabiilne paralleeltöö võimatu. Tõepoolest — suurenegu vool I_1 mingil juhuslikul põhjusel (näiteks pöörlemiskiiruse ajutise suurenemise tõttu), siis jadamähise mõju tõttu suureneb elektromotoorjõud E_{a1}, mis põhjustab voolu I_1 edasist suurenemist jne. Samaaegselt vähenevad I_2 ja E_{a2} pidevalt. Tulemuseks on generaatori *1* ülekoormamine ja generaatori *2* tühijooks või isegi üleminek mootorirežiimi.

Ühtlustusühenduse *ab* olemasolul on aga paralleeltöö normaalne, sest juhuslik voolukasv ühes generaatoris jaguneb ühtlaselt mõlema generaatori jadaergutusmähiste vahel, põhjustades mõlema generaatori elektromotoorjõu tõusu. Generaatorite jadamähised võib ka ristata — generaatori *1* jadaergutusmähis lülitada generaatori *2* ankruga järjestikku ja vastupidi.

Vastulülituses kompaundgeneraatorid ühtlustusühendusi paralleeltöö juures ei vaja.

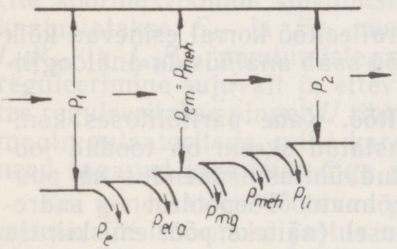
Kümnes peatükk

ALALISVOOLUMOOTORID

10-1. ÜLDANDMEID ALALISVOOLUMOOTORITE KOHTA

Alalisvoolumootoreid kasutatakse laialdaselt tööstus-, transpordi- ja teistes seadmetes, kus on vaja pöörlemiskiirust ulatuslikult ja sujuvalt reguleerida (valtspingid, võimsad metallilõikepingid, elektervedu jne.).

Alalisvoolumootorid liigitatakse ergutusviisi järgi analoogiliselt generaatoritega sõltumatu, rööp- ja jadaergutusega ning kompaundmootoriteks. Ühesuguse ergutusviisiga mootorite ja generaatorite skeemid on sarnased (joon. 9-1). Sõltumatu ergutusega mootorites on ankruvool I_a ja koormusvool I võrdsed: $I = I_a$, rööpergutusega mootorites $I = I_a + i_e$ ja jadaergutusega mootorites $I = I_a = i_e$.



Joon. 10-1. Haruvoolumootori energeetiline diagramm

Võimsad mootorid valmistatakse tavaliselt sõltumatu ergutusega, et ergutusvoolu saaks mugavamalt ja ökonoomsemalt reguleerida. Oma omadustelt on sõltumatu ja rööpergutusega mootorid peaaegu ühesugused ja seetõttu esimesi eraldi ei vaadelda.

Haruvoolumootori (rööpergutusmootori) energeetiline diagramm on kujutatud joonisel 10-1. Võrgust võetavast elektrilisest primaarvõimsusest kulutatakse osa ergutuskao p_e ja ankruahela elektrilise kao $p_{el\,a} = I_a^2 R_a$ katteks, ülejäänud osa kujutab endast ankru elektromagnetilist võimsust $P_{em} = E_a I_a$, mis muundatakse mehaaniliseks võimsuseks P_{meh}. Teraseskadu p_{te}, lisakadu p_{li} ja mehaaniline kadu P_{meh} kaetakse mehaanilise võimsuse arvel ning ülejäänud osa sellest võimsusest kujutab endast kasulikku mehaanilist võimsust P_2 võllil.

Analoogilisi energeetilisi diagramme, mis illustreerivad energia muundumist mootoris, võib konstrueerida ka teiste mootoritüüpide kohta.

Pöördemomendi võrrand. Mootori elektromagnetiline moment

$$M_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega}$$

kulutatakse pidurdavate momentide tasakaalustamiseks. Need on: 1) tühijooksumoment M_0, mis vastab mehaanilise võimsuse arvelt

kaetavatele kadudele p_{te}, p_{li} ja p_{meh} [vt. võrdust (9-6)]; 2) koormusmoment M_2, mille tekitab töömasin või -mehhanism; 3) dünaamiline moment M_d [vt. võrdust (9-7)].

Seejuures

$$M_2=\frac{P_2}{\Omega}.$$

Seega

$$M_{em}=M_0+M_2+M_d \tag{10-1}$$

või

$$M_{em}=M_{st}+M_d, \tag{10-2}$$

kus $M_{st}=M_0+M_2$ on staatiline takistusmoment.

Töötamisel püsirežiimis, kui $n=$ const ja seetõttu $M_d=0$,

$$M_{em}=M_{st}. \tag{10-3}$$

Edaspidi jätame indeksi «*em*» M_{em} juures ära. Tavaliselt on M_0 võrreldes M_2-ga väike ja seetõttu võib püsirežiimis ligikaudu võtta $M_{em}=M\approx M_2$.

Pinge- ja vooluvõrrandid. Mootorites mõjub ankru elektromotoorjõud E_a ankruvooluga I_a vastassuunaliselt (vt. § 1-1) ja kannab seetõttu ka ankru vastu-elektromotoorjõu nime. Ankruahela pinge võrrandi võib kirjutada järgmiselt:

$$U=E_a+R_aI_a. \tag{10-4}$$

Siin R_a on ankruahela kogutakistus [vt. võrrandit (9-15)]. Mootorirežiimis on alati $U>E_a$.

Võrdusest (10-4) järeldub, et

$$I_a=\frac{U-E_a}{R_a}, \tag{10-5}$$

kus vastavalt avaldisele (4-3)

$$E_a=C_e\Phi_\delta n. \tag{10-6}$$

Pöörlemiskiirus ja mehaanilised karakteristikud. Lahendades võrrandi (10-4) koos võrrandiga (10-6) pöörlemiskiiruse n suhtes, leiame mootori kiiruskarakteristiku $n=f(I_a)$ võrrandi kujul:

$$n=\frac{U-R_aI_a}{C_e\Phi_\delta}. \tag{10-7}$$

Vastavalt avaldisele (4-8)

$$M=C_M\Phi_\delta I_a. \tag{10-8}$$

Määrates siit I_a ja paigutades selle väärtuse võrrandisse (10-7), saame mootori mehaanilise karakteristiku $n = f(M)$ võrrandi:

$$n = \frac{U}{C_e \Phi_\delta} - \frac{R_a M}{C_e C_M \Phi_\delta^2}, \qquad (10\text{-}9)$$

mis määrab mootori pöörlemiskiiruse sõltuvuse arendatavast pöördemomendist.

Mehaanilise karakteristiku $n = f(M)$ või $M = f(n)$ kuju $U =$ $=$ const puhul oleneb sellest, kuidas koormuse või M muutumisega muutub masina voog Φ_δ, ja sõltub seega mootori ergutusviisist (vt. § 10-4, 10-5, 10-6).

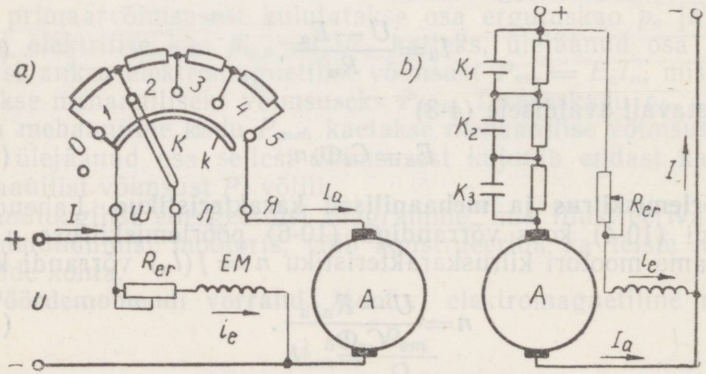
10-2. ALALISVOOLUMOOTORITE KÄIVITAMINE

Mootorite käivitamisel on vaja: 1) tagada sobiv käivitusmomendi suurus ja tingimused vajaliku pöörlemiskiiruse saavutamiseks; 2) vältida mootorile ohtliku suurusega käivitusvoolu tekkimist.

Mootorit võib käivitada kolmel viisil: 1) otsekäivitus, kus ankruahel lülitatakse vahetult täiele võrgupingele; 2) käivitamine käivitusreostaadi või käivitustakistite abil, mis lülitatakse ankruahelasse järjestikku; 3) käivitamine madaldatud ankruahela pingega.

Kui $n = 0$, siis ka $E_a = 0$ ja kooskõlas avaldisega (10-5)

$$I_a = \frac{U_a}{R_a}. \qquad (10\text{-}10)$$



Joon. 10-2. Haruvoolumootori käivitusskeem käivitusreostaadi (*a*) ja käivitustakistite (*b*) abil

Normaalmasinate puhul $R_{a*} = 0{,}02 \ldots 0{,}10$ ja seetõttu otsekäivitusel pingega $U = U_N$ on ankruvool lubamatult suur:

$$I_a = (50 \ldots 10) I_N.$$

Seetõttu kasutatakse otsekäivitust ainult kuni mõnesaja vatiste mootorite puhul, mille R_a on suhteliselt suur ja seetõttu käivitusel $I_a < (4 \ldots 6)\ I_N$ ning käivitusprotsess ei kesta üle $1 \ldots 2$ sekundi. Erijuhtumitel kasutatakse otsekäivitust ka mootorite puhul võimsusega kuni mõni kilovatt.

Levinum on käivitusreostaadi või -takistiga käivitamine (joon. 10-2). Sel juhul saame avaldise (10-5) asemel

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a + R_r} \tag{10-11}$$

ja käivituse alghetkel, kui $n = 0$,

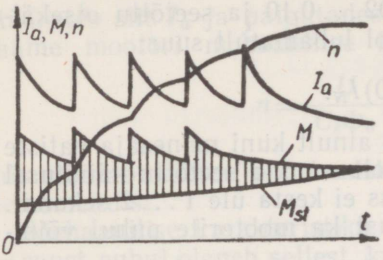
$$I_a = \frac{U}{R_a + R_r}, \tag{10-12}$$

kus R_r on käivitusreostaadi või -takisti takistus. R_r suurus valitakse nii, et käivituse alghetkel oleks $I_a = (1{,}4 \ldots 1{,}7) I_N$ (väikestes masinates kuni $2{,}5 I_N$).

Vaatleme üksikasjalikumalt haruvoolumootori reostaadiga käivitust (joon. 10-2, *a*).

Enne käivitust ($t < 0$) asetseb liikuv kontakt K tühiasendis 0 ja mootori ahel on lahutatud. Käivituse alghetkel ($t = 0$) viiakse kontakthoob K käepideme abil kontaktklemmile *1* ja ankrut läbib vool I_a, mis määratakse võrdusega (10-12). Ergutusmähise *EM* ahel ühendatakse liikumatu kontaktkaare *e* külge, mida mööda libiseb kontakthoob K. Seetõttu on kogu käivituse kestel ergutusahel täispinge all, mis on vajalik selleks, et käivituse ajal oleksid i_e ja Φ_δ maksimaalsed ja konstantsed. Sel puhul, vastavalt avaldisele (10-8), arendatakse antud I_a väärtusel suurimat momenti M. Samal eesmärgil asetatakse käivitusel ergutuse reguleerreostaat asendisse $R_{er} = 0$.

Kui käivitusreostaadi kontakthoob K asetseb kontaktklemmil *1* ($t = 0$), tekivad voolud I_a ja i_e, samuti moment M, ning kui $M > M_{st}$, siis hakkab mootor pöörlema ja kiirus n suureneb alates väärtusest $n = 0$ (joon. 10-3). Seejuures indutseeritakse ankrus elektromotoorjõud $E \sim n$ ja vastavalt avaldistele (10-11) ning (10-8) I_a ja M, aga samuti ka n muutumise kiirus väheneb. Nende suuruste muutumine $M_{st} = \text{const}$ korral toimub eksponentfunktsiooni järgi. Kui I_a saavutab väärtuse $I_{a\,min} = (1{,}1 \ldots 1{,}3) I_N$, viiakse käivitusreostaadi kontakthoob K asendisse *2*. Seejuures suureneb vool I_a R_r vähenemise tagajärjel ankruahela väikese



Joon. 10-3. I_a, M ja n sõltuvus ajast mootori käivitamisel

induktiivsuse tõttu peaaegu hetkeliselt, samuti suureneb ka M, pöörlemiskiirus n kasvab kiiremini ja E_a suurenemise tagajärjel hakkavad suurused I_a ja M uuesti vähenema (joon. 10-3). Samal viisil areneb käivitusprotsess reostaadi ümberlülitamisel asenditesse *3*, *4* ja *5*, mille järel mootor saavutab püsirežiimi niisuguste I_a ja n väärtustega, mis määratakse tingimusega $M = M_{st}$ [vt. võrdusi (10-7) ja (10-8)].

Tühijooksul käivitamisel $M_{st} = M_0$. Vool $I_a = I_{a0}$ on sel juhtumil väike ning moodustab tavaliselt 3 ... 5% nimivoolust I_N.

Viirutatud ordinaadid joonisel 10-3 kujutavad endast dünaamilise või liigmomendi väärtusi kooskõlas avaldisega (10-2)

$$M_d = M - M_{st},$$

mille mõjul pöörlemiskiirus n suureneb.

Käivitusreostaadi astmete arv ja nende takistuste suurused arvutatakse sellest lähtudes, et sobivate ajavahemike järel astmete ümberlülitamisel suurimad ja vähimad I_a väärtused kõikidel astmetel kujuneksid ühesugusteks. Lähtudes soojenemistingimustest, arvutatakse reostaadi astmete takistused lühiajalisele koormusele.

Mootor seisatakse kas väljalülitamisega võrgust vinnak- või muud tüüpi lüliti abil või siis käivitusreostaadi hoova viimisega asendisse 0 (joon. 10-2, *a*). Joonisel 10-2 esitatud skeem on koostatud nii, et mootori väljalülitamisel selle ergutusahel ei katkeks, vaid jääks läbi ankru suletuks. Sel juhtumil ei vähene pärast mootori väljalülitamist vool ergutusmähises nullini hetkeliselt, vaid aeglaselt, küllalt suure ajakonstandiga. Sellega väldi takse ergutusmähises suure endainduktsiooni elektromotoorjõu teket, mis võiks vigastada selle mähise isolatsiooni.

Võrreldes joon. 10-2 tooduga, kasutatakse ka teistsuguse kujundusega, näiteks kontaktkaareta *k* käivitusreostaatide skeeme. Ergutusahela otsa võib seejuures ühendada näiteks kontaktklemmi *2* külge. Sellise skeemi puhul on mootori töötamisel käivitusreostaadi viimased astmed lülitatud ergutusmähisega järjestikku. Et nende takistus ergutusahela takistusega $R_e = r_e + R_{re}$ võrreldes on väike, ei avalda see mootori töötamisele suurt mõju.

Käivitusreostaadi ümberlülitamist on raske automatiseerida. Seetõttu kasutatakse automatiseeritud seadmetes käivitusreostaadi asemel käivitustakisteid (joon. 10-2, *b*), mis šunteeritakse automaatselt töötavate kontaktorite kontaktidega K_1, K_2 ja K_3. Skeemi liht-

sustamiseks ja kontaktorite arvu vähendamiseks võetakse astmete arv minimaalne (väikese võimsusega mootoritel sageli 1...2 astet).

Mingil juhul ei tohi rööpergutusahelat katkestada, sest sel puhul Φ_δ väheneb kiiresti ja väikese koormuse korral võllil pöörlemiskiirus n suureneb vastavalt avaldisele (10-7) ülemäära (mootori «puruksjooks»). Tagajärjeks on ka ankruvoolu liigne suurenemine, mille tõttu tekib ringtuli, mis võib masinat vigastada. Seetõttu ei paigaldata ergutusahelatesse kaitsmeid ega lüliteid. Suure koormuse puhul võllil on vool I_a suur ja ergutusahela katkemise korral suureneb pöörlemiskiirus n vähem.

Käivitusvoolu võib piirata ka nii, et käivitusel toidetakse mootori ankruahelat autonoomsest reguleeritava pingega vooluallikast (üksik alalisvoolugeneraator, tüüritav alaldi). Haruvoolu ergutusmähist on seejuures vaja toita teisest täispingega allikast, et tagada käivitamisel nimiergutusvool i_{eN}. Sellist käivitusviisi rakendatakse kõige sagedamini võimsate mootorite puhul koos pöörlemiskiiruse reguleerimisega (vt. § 10-4).

Peavoolu- ja kompaundmootoreid käivitatakse analoogiliselt. Kompaundmootori käivitusskeem ei erine millegi poolest haruvoolumootori käivitusskeemist (joon. 10-2). Peavoolumootori käivitusskeem on lihtsam, sest puudub rööpergutusahel.

Mootori pöörlemissuuna muutmiseks (reverseerimiseks) on vaja muuta voolu suunda ankruahelas (koos lisapooluste- ja kompensatsioonimähisega) või ergutusmähises (mähistes).

10-3. MOOTORI PÖÖRLEMISKIIRUSE REGULEERIMINE JA TÖÖ STABIILSUS

Alalisvoolumootorite kiiruse reguleerimise viisid selguvad seostest (10-7) ja (10-9). Kiirust võib reguleerida kolmel viisil.

1. Kõige mugavamaks, levinumaks ja ökonoomsemaks osutub kiiruse reguleerimine voo Φ_δ, s. o. ergutusvoolu i_e muutmise abil. Vastavalt avaldisele (10-7) suureneb kiirus voo Φ_δ vähenemisega. Mootorid arvutatakse töötamisele nimirežiimis suurima Φ_δ väärtusega, s. o. vähima n väärtusega. Seetõttu on praktiliselt võimalik ainult Φ_δ vähendada ja järelikult võimaldab vaadeldav viis kiirust reguleerida ainult üle nimikiiruse. Sellisel reguleerimisel jääb mootori kasutegur suureks, sest ergutusvõimsus on väike, mistõttu on väike ka ergutusvoolu reguleerreostaatide võimsus. Lisaks võib märkida, et i_e vähenemisel väheneb ergutusvõimsus Ui_e.

Pöörlemiskiiruse reguleerimise ülemine piir on määratud masina mehaanilise vastupidavuse ja kommutatsioonitingimustega.

Suurtel kiirustel kommutatsioon halveneb harjaseadise vibratsiooni suurenemise, harikontakti halvenemise ja reaktiiv-elektromotoorjõu suurenemise tõttu. Samuti halvendab kommutatsiooni kommutaatorilestade-vahelise maksimaalpinge suurenemine põhivälja nõrgenemise ja sellest tingitud ankru ristreaktsiooni moonutava mõju suurenemise tõttu (vt. § 5-3).

Lainemähist omava ankruga väikese ja keskmise võimsusega masinates kasutatakse mõnikord pöörlemiskiiruse n reguleerimisulatuse suurendamiseks välja nõrgendamise abil üksikute pooluste ergutusmähiste eralditoidet. Seejuures säilitatakse ühes pooluste grupis $i_e = \text{const}$ ja suur voog koos magnetvälja osade suure küllastusega, teises grupis vähendatakse ergutusvoolu i_e ja voogu. Seejuures avaldub ankru ristreaktsiooni moonutav mõju esimese pooluste grupi all märgatavalt nõrgemini. Et lainemähise puhul pinge kommutaatori naaberlestade vahel moodustub kõigi pooluste all paiknevate p sektsiooni elektromotoorjõududest (vt § 3-5), siis pooluste voo sellise reguleerimise tagajärjel kujuneb pinge jaotus lestade vahel ühtlasemaks.

2. Teine kiiruse reguleerimisviis seisneb reostaadi või reguleertakisti R_r järjestikku ankruahelasse lülitamises. Avaldise (10-7) asemel saame sel juhtumil

$$n = \frac{U - (R_a + R_r) I_a}{C_e \Phi_\delta}. \qquad (10\text{-}13)$$

Niimoodi saab reguleerida kiirust allapoole nimikiirust ning see on seotud märgatavate kadudega takistis R_r ja kasuteguri vähenemisega.

Tõepoolest, ankru nimivoolu $I_a = I_{aN}$ korral on avaldise (10-7) lugeja keskmine suurus

$$U_* - R_{a*} I_{aN*} = 1 - 0{,}05 = 0{,}95.$$

Kui $\Phi_\delta = \text{const}$ puhul on vaja kiirust kaks korda vähendada, siis on seda lugejat samuti vaja kaks korda vähendada, s. t.

$$U_* - (R_{a*} + R_{r*}) I_{aN*} = 0{,}475.$$

Et $I_{aN*} = 1$, siis $R_{r*} = 0{,}95 - 0{,}475 = 0{,}475$, s. t. reostaadis kaob 47,5% rakendatud pingest ja sama palju ka ankruahelasse antavast võimsusest. Sel põhjusel kasutatakse seda reguleerimisviisi põhiliselt ainult väikese võimsusega mootorite puhul; suure võimsusega mootorite juures kasutatakse aga harva ja ainult lühiajaliselt (käivitus-seadistusrežiimid jne.).

3. Kiirust reguleeritakse ka ankruahela pinge muutmisega. Et mootori töötamine pingega $U > U_N$ ei ole lubatud, siis võimaldab kirjeldatav reguleerimisviis kooskõlas avaldistega (10-7) ja (10-9) kiirust reguleerida samuti ainult nimikiirusest allapoole.

Seejuures jääb mootori kasutegur suureks, sest mingisuguseid lisakao allikaid mootori skeemi sisse ei viida. Kuid sel juhtumil on vajalik reguleeritava pingega autonoomne vooluallikas, mis muudab seadme kallimaks.

Tuleb märkida, et kiiruse reguleerimine ankruvoolu I_a muutmise teel on võimatu, kuigi esimesel pilgul niisugune võimalus näib tulenevat võrdusest (10-7). Asi on selles, et kooskõlas võrdusega (10-3) peab mootor igal pöörlemiskiirusel arendama kindlat momenti M, mis on võrdne käitatava mehhanismi takistusmomendiga M_{st} antud pöörlemiskiirusel n. Vastavalt avaldisele (10-8) on sel juhul etteantud Φ_δ väärtuste puhul mootori ankruvool I_a igal momendi M väärtusel samuti üheselt määratud.

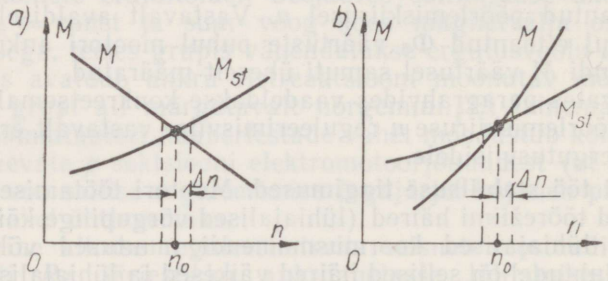
Järgnevates paragrahvides vaadeldakse konkreetsemalt mitmesuguseid pöörlemiskiiruse n reguleerimisviise vastavalt erinevatele mootorite ergutusviisidele.

Mootori töö stabiilsuse tingimused. Mootori töötamisel tekivad alati teatud tööreŽiimi häired (lühiajalised võrgupinge kõikumised, juhuslikud lühiajalised koormusmomendi muutused võllil jne.). Enamikul juhtudel on sellised häired väikesed ja lühiajalised, siiski rikutakse seejuures püsitööreŽiimi momentide tasakaalu [vt. avaldist (10-3)], mistõttu tekib dünaamiline moment M_d ja pöörlemiskiirus muutub.

Mootori töö stabiilsuse all mõistetakse selle võimet väikeste tööreŽiimi häirete korral alg-püsitööreŽiimi tagasi pöörduda, kui nende häirete mõju lakkab. Teiste sõnadega, mootori töötamist nimetatakse stabiilseks, kui lõpmatult väikesed häired selle töötamisel kutsuvad esile sama väikesed tööreŽiimi iseloomustavate suuruste (näiteks pöörlemiskiirus, ankruvool jne.) muutused. Mootor töötab ebastabiilselt, kui taolised väikesed häired kutsuvad esile suuri tööreŽiimi muutusi. Ebastabiilsel töötamisel kutsuvad väikesed lühiajalised häired esile kas reŽiimi (n, I_a jne.) pideva muutumise mingis kindlas suunas või põhjustavad võnkumisi suuruste n, I_a jne. võnkeamplituudide kasvamisega. On loomulik, et ekspluatatsioonitingimustes on vaja kindlustada mootori stabiilne töötamine, ebastabiilse töö korral on selle normaalne töötamine võimatu ja tavaliselt toimub siis avarii.

Võimalik on ka generaatorite ebastabiilne töötamine. Paragrahvis 9-7 vaadeldi liitergutusega generaatorite paralleeltöö ebastabiilsust ühtlustusühenduse puudumisel. Alalisvoolugeneraatorite endaergutusreŽiim (vt. § 9-4) kujutab endast sisuliselt samuti ebastabiilset tööreŽiimi, sest nii i_e kui ka U muutuvad pidevalt. Haruvoolugeneraatori töötamine, kui $R_e = R_{e\,kr}$, on samuti ebastabiilne, sest kui pisut muuta R_e suurust, siis pinge U kas muutub märgatavalt, s. o. kasvab mingi lõpliku väärtuseni, või langeb peaaegu nullini.

Mootori töö stabiilsus sõltub selle mehaanilise karakteristiku $M = f(n)$ kujust ja samuti ka sellest, missugune on võllil oleva takistusmomendi sõltuvus pöörlemiskiirusest $M_{st} = f(n)$. Viimase sõltuvuse kuju on määratud mootori poolt käitatava töömasina omadustega. Näiteks metallilõikepinkide puhul, kui lõiketera ülesseade ei muutu, on $M_{st} \approx \text{const}$, s. o. M_{st} ei sõltu pöörlemiskiirusest, ventilaatoritel ja pumpadel aga $M_{st} \sim n^2$.



Joon. 10-4. Mootori stabiilne (*a*) ja mittestabiilne (*b*) tööreżiim

Joonisel 10-4, *a* ja *b* on kujutatud mootori töötamise kaks iseloomulikku juhtumit. Püsitööreżiimile pöörlemiskiirusega n_p vastab kahe nimetatud karakteristiku lõikepunkt.

Kui sõltuvustel $M = f(n)$ ja $M_{st} = f(n)$ on joon. 10-4, *a* esitatud kuju, siis *n* juhuslikul suurenemisel Δn võrra häire tagajärjel muutub pidurdav moment M_{st} suuremaks liikumist tekitavast momendist M ($M_{st} > M$). Seetõttu mootor pidurdub, mis sunnib rootorit uuesti pöörlema lähtepöörlemiskiirusega n_0. Täpselt samuti, kui mootori kiirus häire tagajärjel väheneb Δn võrra, siis $M_{st} < M$ ja rootor kiireneb uuesti $n = n_0$. Seega on vaadeldaval juhtumil mootori töötamine stabiilne. Nagu jooniselt 10-4, *a* selgub, on sel juhtumil

$$\frac{dM}{dn} < \frac{dM_{st}}{dn}, \tag{10-14}$$

mis ongi mootori töö stabiilsuse tunnuseks või kriteeriumiks.

Kui sõltuvustel $M = f(n)$ ja $M_{st} = f(n)$ on joon. 10-4, *b* toodud kuju, töötab mootor ebastabiilselt. Tõepoolest, pöörlemiskiiruse *n* suurenemisel väärtuselt $n = n_0$ väärtuseni $n = n_0 + \Delta n$ on $M > M_{st}$ ning tekib positiivne dünaamiline moment. Pöörlemiskiirus *n* hakkab kasvama, kusjuures dünaamiline moment $M - M_{st}$ veelgi suureneb, *n* jällegi kasvab jne. Kui häire tagajärjel $n =$

$= n_0 - \Delta n$, siis $M < M_{st}$ ja n hakkab pidevalt vähenema. Seetõttu on töötamine punktis $M = M_{st}$ ja $n = n_0$ võimatu. Nagu jooniselt 40-4, *b* selgub, on sel juhtumil

$$\frac{dM}{dn} > \frac{dM_{st}}{dn} \qquad (10\text{-}15)$$

mis ongi mootori ebastabiilse töö tunnuseks.

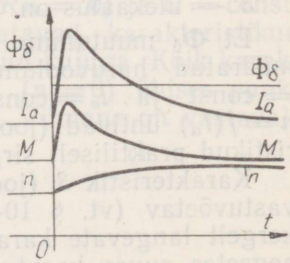
Vaadeldust selgub, et antud mehaanilise karakteristikuga $M = f(n)$ mootor võib töötada stabiilselt või ebastabiilselt sõltuvalt töömasina karakteristikust $M_{st} = f(n)$. Ebastabiilsuse tekkimine on tõenäolisem mootori sellise mehaanilise karakteristiku $M = f(n)$ või $n = f(M)$ korral, kus M ja n suurenevad või vähenevad üheaegselt (joon. 10-4, *b*). Siis on töö ebastabiilne ka juhtumil, kui $M_{st} = f(n) = \text{const}$ (näiteks metallilõikepingid). Seepärast taoliste mehaaniliste karakteristikutega mootoreid ei ehitata.

Ülaltoodu iseloomustab võrdsel määral nii alalisvoolu-, vahelduvvoolu- kui ka mistahes teist liiki mootorite stabiilsust.

Tööreţiimi muutmine. Alalisvoolu- nagu ka vahelduvvoolumootoritel on stabiilsustingimuste tagamisel tähelepanuväärne võime automaatselt, välise reguleeriva mõjuta kohanduda muutuvate töötingimustega, s. t. elektrimootorid on isereguleeruvad. Illustreerime öeldut haruvoolumootori näite abil.

Töötagu selline mootor režiimis $U = \text{const}$, $i_e = \text{const}$ ja järelikult ka $\Phi_\delta \approx \text{const}$ ning töömasina poolt tekitatav koormusmoment M_{st} suureneb. Siis $M < M_{st}$ puhul tekib $M_d < 0$ [vt. avaldist (10-2)] ja n hakkab vähenema. Seejuures väheneb ka E_a, vool I_a [vt. avaldist (10-5)] ja moment M [vt. avaldist (10-8)] aga hakkavad suurenema, kusjuures see toimub senikaua, kuni momendid uuesti tasakaalustuvad, s. t. $M = M_{st}$. Analoogiliselt muutub režiim, kui M_{st} väheneb, kusjuures sel juhtumil n ja E_a hakkavad suurenema ning I_a ja M vähenevad seni, kuni $M = M_{st}$ ja $M_d = 0$.

Vaatleme nüüd olukorda, kus reostaadi R_{er} (vt. joon. 10-2) abil vähendatakse ergutusvoolu i_e. Seejuures väheneb Φ_δ, kuid rootori mehaanilise inertsi tõttu kiirus n esimesel hetkel ei muutu. Siis, kooskõlas avaldisega (10-6), E_a väheneb ning selle tagajärjel I_a ja M suurenevad [vt. avaldisi (10-5) ja (10-8)]. Seejuures $M > M_{st}$ ja vastavalt võrdusele (10-2) $M_d > 0$ ning kiirus n hakkab kasvama. See kutsub kooskõlas samade seostega esile E_a suurenemise ja I_a ning M-i vähene-



Joon. 10-5. Haruvoolumootori üleminek uude tööreţiimi voo muutumisel

mise seni, kuni momendid uuesti tasakaalustuvad, s. t. $M = M_{st}$ ja $M_d = 0$ (joon. 10-5). Ergutusvoolu i_e suurendamisel arenevad nähtused vastupidises suunas. Siinjuures on vaja märkida, et kiiruse reguleerimisel ei tohi lubada suuri ergutusvoolu i_e muutusi, sest U ja E_a on lähedased suurused [vt. avaldist (10-5)] ning väike Φ_δ ja E_a muutus põhjustab suure I_a ja M muutuse.

Analoogiliselt toimub üleminek uuele režiimile teiste väliste tingimuste muutumisel (näiteks takistuse suurendamine ankruahelas jne.) ja ka teistsuguse ergutusviisiga mootorite korral.

Toodud arutelust selgub, et mootori käitumine püsitöörežiimis ja üleminekul uuele tööreżiimile on täielikult määratud ankruahela pinge (10-4) ja momentide tasakaalu võrranditega (10-2).

10-4. HARUVOOLUMOOTORID

Loomulik kiirus- ja mehaaniline karakteristik. Tutvume üksikasjalikumalt haruvoolumootori karakteristikutega, mis määravad ta töötamisomadused.

Mootori kiirus- ja mehaaniline karakteristik on määratud võrdustega (10-7) ja (10-9) $U = \text{const}$ ja $i_e = \text{const}$ juures. Kui ankruahelas ei ole lisatakistust, siis nimetatakse neid karakteristikuid l o o m u l i k e k s.

Kui harjad asetsevad geomeetrilisel neutraalil, siis voolu I_a suurenemisel voog Φ_δ ankru ristreaktsiooni mõjul pisut väheneb. Selle tagajärjel püüab kiirus n, kooskõlas avaldisega (10-7), suureneda. Teisest küljest kutsub pingelangu $R_a I_a$ suurenemine esile kiiruse vähenemise. Seega on võimalikud kiiruskarakteristiku kolm kuju, mis on toodud joon. 10-6:

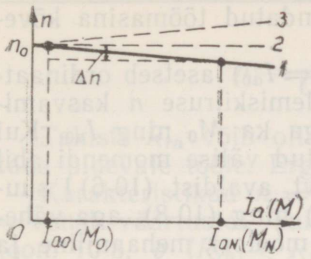
1 — ülekaalus on $R_a I_a$ suurenemise mõju;

2 — Φ_δ vähenemine ja $R_a I_a$ suurenemise mõju on vastastikku kompenseeritud;

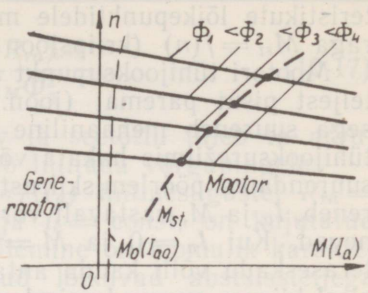
3 — ülekaalus on Φ_δ vähenemise mõju.

Et Φ_δ muutumine on suhteliselt väike, on võrdusega (10-9) määratud haruvoolumootori mehaanilised karakteristikud $U = \text{const}$ ja $i_e = \text{const}$ korral oma kujult karakteristikutega $n = f(I_a)$ ühtivad (joon. 10-6). Samal põhjusel on need karakteristikud praktiliselt sirgjoonelised.

Karakteristik *3* (joon. 10-6) ei ole töö stabiilsuse seisukohalt vastuvõetav (vt. § 10-3), mistõttu haruvoolumootorid ehitatakse kergelt langevate karakteristikutega (kuju *1*, joon. 10-6). Kaasaegsetes suure kasutusastmega masinates võib ankru ristreaktsiooni mõju ankru hammaste küllalt tugeva küllastatuse tõttu olla niivõrd suur, et karakteristikut *1* (joon. 10-6) on võimatu



Joon. 10-6. Haruvoolumootori loomulike kiirus- ja mehaaniliste karakteristikute liigid



Joon. 10-7. Haruvoolumootori mehaanilised ja kiiruskarakteristikud mitmesugustel ergutusvoogudel

saada. Sel puhul paigutatakse soovitava kujuga karakteristiku saamiseks poolustele nõrk pärilülituses jadaergutusmähis, mille magneetimisergutus moodustab kuni 10% rööpergutusmähise magneetimisergutusest. Sellega kompenseeritakse osaliselt või täielikult ankru ristreaktsiooni mõjul tekkiv Φ_δ vähenemine. Sellist jadaergutusmähist nimetatakse stabiliseerivaks mähiseks, aga niisuguse mähisega varustatud mootorit nimetatakse endiselt haruvoolumootoriks.

Pöörlemiskiiruse muutus Δn (joon. 10-6) üleminekul tühijooksult ($I_a = I_{a0}$) nimikoormusele ($I_a = I_{aN}$) haruvoolumootori töötamisel loomuliku karakteristikuga on väike ja moodustab 2...8% nimikiirusest n_N. Selliseid nõrgalt langevaid karakteristikuid nimetatakse jäikadeks. Jäiga karakteristikuga haruvoolumootoreid kasutatakse seadmetes, mille puhul nõutakse, et koormuse muutumisel pöörlemiskiirus säiliks ligikaudu konstantsena (metallilõikepingid, ventilaatorid jt.).

Kiiruse reguleerimine magnetvoo muutmisega toimub tavaliselt ergutusahelasse lülitatud reostaadi R_{re} abil (vt. joon. 9-1, *b*; 10-2). Kui ankruahelas puudub lisatakistus ($R_{ra} = 0$) ja $U = \text{const}$, siis võrdustega (10-7) ja (10-9) määratavad karakteristikud $n = f(I_a)$ ja $n = f(M)$ on joon. 10-7 näidatud kujuga. Kõik karakteristikud $n = f(I_a)$ lõikuvad abstsissteljel ($n = 0$) ühises punktis, mis vastab küllaltki suurele voolule I_a. Viimane on vastavalt avaldisele (10-5)

$$I_a = \frac{U}{R_a}.$$

Alumine karakteristik joon. 10-7 vastab nimivoole. Pöörlemiskiiruse *n* väärtused püsirežiimis vastavad vaadeldavate karak-

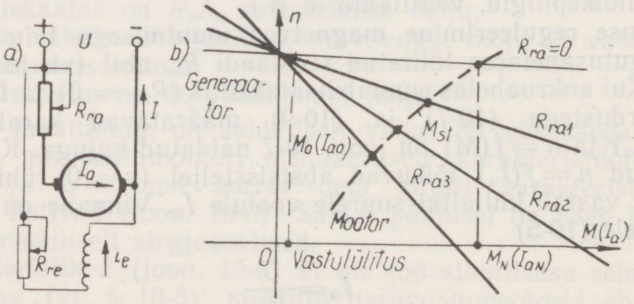
teristikute lõikepunktidele mootoriga ühendatud töömasina kõveraga $M_{st} = f(n)$ (kriipsjoon joon. 10-7).

Mootori tühijooksupunkt ($M = M_0$, $I_a = I_{a0}$) asetseb ordinaatteljest pisut paremal (joon. 10-7). Pöörlemiskiiruse n kasvamisega suureneb mehaaniline kadu ja seega ka M_0 ning I_{a0}. Kui tühijooksurežiimis hakata võllile rakendatud välise momendi abil suurendama pöörlemiskiirust n, siis E_a [vt. avaldist (10-6)] suureneb, I_a ja M, vastavalt võrdustele (10-5) ning (10-8), aga vähenevad. Kui $I_a = 0$ ja $M = 0$, kaetakse mootori mehaaniline ja teraseskadu võlli kaudu antava mehaanilise võimsuse arvel, edasisel kiiruse suurendamisel muudavad I_a ja M märki ning mootor läheb üle generaatorirežiimi (vasakul pool ordinaattelge asetsevad karakteristikute osad, joon. 10-7).

Lähtudes kommutatsioonitingimustest, võib normaalkonstruktsiooniga mootorite kiirust välja nõrgendamisega reguleerida piirides 1 : 2. Valmistatakse ka mootoreid, mis võimaldavad sel viisil kiirust reguleerida piirides 1 : 5 või isegi 1 : 8, kuid siis tuleb kommutaatorilestadevahelise maksimaalpinge (vt. § 5-3) vähendamiseks suurendada õhupilu, reguleerida voogu üksikute pooluste gruppide kaupa (vt. § 10-3) või kasutada kompensatsioonimähist. Mootori maksumus sel juhul suureneb.

Kiiruse reguleerimine takistiga ankruahelas, tehis-mehaanilised ja tehis-kiiruskarakteristikud. Kui lülitada ankruahelasse järjestikku lisatakisti R_{ra} (joon. 10-8, *a*), saame avaldiste (10-7) ja (10-9) asemele

$$n = \frac{U - (R_a + R_{ra}) I_a}{C_e \Phi_\delta}, \qquad (10\text{-}16)$$



Joon. 10-8. Haruvoolumootori pöörlemiskiiruse reguleerimisskeem takisti abil ankruahelas (*a*) ja vastavad mehaanilised ja kiiruskarakteristikud (*b*)

$$n=\frac{U}{C_e\Phi_\delta}=\frac{(R_a+R_{ra})M}{C_eC_M\Phi_\delta^2}. \qquad (10\text{-}17)$$

Takisti R_{ra} võib olla reguleeritav ja seetõttu tuleb ta arvutada pidevale tööle. Ergutusahel tuleb lülitada võrgupingele.

Karakteristikud $n=f(M)$ ja $n=f(I_a)$ mitmesugustel $R_{ra}=$ $=$ const väärtustel, kui $U=$ const ja $i_e=$ const, on kujutatud joon. 10-8, *b* ($R_{ra1}<R_{ra2}<R_{ra3}$). Ülemine on loomulik karakteristik ($R_{ra}=0$). Kõik karakteristikud lõikuvad abstsissteljega ($n=0$) punktis, kus

$$I_a=\frac{U}{R_a+R_{ra}}$$

ja

$$M=\frac{C_M\Phi_\delta U}{R_a+R_{ra}}.$$

Nende karakteristikute pikendused allpool abstsisstelge joon. 10-8 vastavad mootori pidurdamisele vastulülitusega. Sel puhul $n<0$, E_a on vastupidise märgiga ja liitub võrgupingega U, mistõttu

$$I_a=\frac{U+E_a}{R_a+R_{ra}},$$

mootori moment M mõjub aga pöörlemissuunale vastu ning on seega pidurdava toimega.

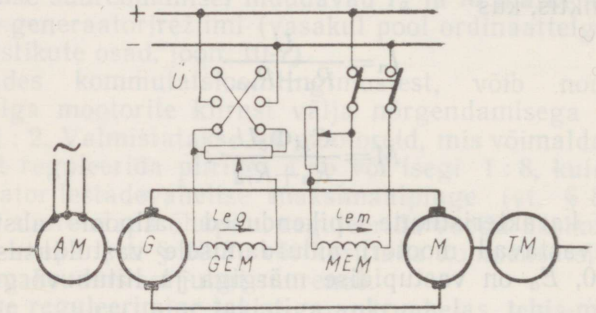
Kui tühijooksul ($I_a=I_{a0}$) suurendada väljastpoolt rakendatud momendi abil pöörlemiskiirust, siis esialgu saavutatakse režiim, kus $I_a=0$; edasi muutub I_a suund ja masin läheb üle generaatorirežiimi (karakteristikute osad vasakul pool ordinaattelge joon. 10-8, *b*).

Nagu nähtub joon. 10-8, *b*, muutuvad R_{ra} sisselülitamisel karakteristikud vähem jäigaks ja suurtel R_{ra} väärtustel isegi järsult langevateks ehk pehmeteks.

Kui takistusmomendi kõveral $M_{st}=f(n)$ on joon. 10-8, *b* kriipsjoonega esitatud kuju, siis on igale R_{ra} väärtusele vastav püsirežiimi pöörlemiskiirus n määratud vastavate kõverate lõikepunktidega. Mida suurem on R_{ra}, seda väiksem on n ja samuti ka kasutegur.

Ankrupinge muutmisega võib kiirust reguleerida agregaadiga «generaator-mootor» (*G-M*), mida nimetatakse ka leonardajamiks (joon. 10-9). Selle agregaadi ajammootor *AM* (vahelduvvoolumootor, sisepõlemismootor jms.) paneb alalisvoolugeneraatori *G* pöörlema püsiva kiirusega. Töömasinat *TM* käitava alalisvoolumootori *M* ankur on vahetult ühendatud generaatori ankruga.

Generaatori ergutusmähist *GEM* ja mootori ergutusmähist *MEM* toidetakse sõltumatust vooluallikast: alalisvooluvõrgust (joon. 10-9) või ajammootori *AM* võllil asuvaist ergutitest (väikestest alalisvoolugeneraatoritest). Generaatori ergutusvoolu i_{eg} tuleb reguleerida praktiliselt nullist alates (joon. 10-9 potentsiomeetri skeemi järgi ühendatud reostaadi abil). Mootori reverseerimiseks tuleb muuta generaatori polaarsust (joon. 10-9 ümberlüliti *Ü* abil).



Joon. 10-9. Agregaadi «generaator-mootor» skeem sõltumatu ergutusega mootori kiiruse reguleerimiseks

Mootori käivitamine ja kiiruse reguleerimine toimub järgmiselt. Mootori maksimaalse ergutusvoolu i_{em} ja generaatori ergutusvoolu $i_{eg} = 0$ juures käivitatakse ajammootor *AM*. Seejärel suurendatakse sujuvalt generaatori ergutusvoolu i_{eg} ja generaatori mingi väikese pinge *U* juures hakkabki mootor *M* pöörlema.

Edasi, reguleerides pinget *U* kuni $U = U_N$, võib saada kõik mootori pöörlemiskiirused vahemikus $n = 0$ kuni $n = n_N$. Edasine pöörlemiskiiruse *n* suurendamine on võimalik mootori ergutusvoolu i_{em} vähendamise teel. Mootori reverseerimiseks vähendatakse i_{eg} nullini, siis ühendatakse generaatori ergutusmähise *GEM* otsad ümber ja suurendatakse uuesti i_{eg} alates väärtusest $i_{eg} = 0$.

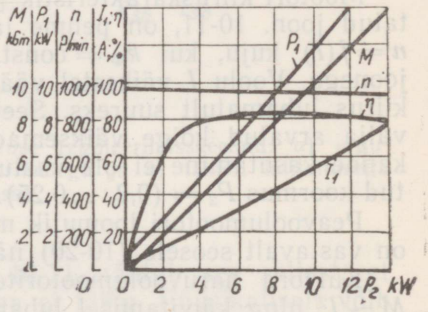
Kui töömasina poolt tekitatav koormus on järsult pulseeruv (näiteks mõned valtspingid) ja ei ole soovitav, et koormuse tipud täielikult kanduksid üle ajammootorile või vahelduvvooluvõrku, siis võib mootori varustada hoorattaga (agregaat *G-M-H*, või Leonard-Ilgneri ajam). Pöörlemiskiiruse *n* vähenemisel koormuse tipu ajal kaetakse sel juhul osa koormusmomendist hooratta kineetilise energia arvel. Hooratta mõju on seda suurem, mida pehmem on ajammootori *AM* või mootori *M* karakteristik.

Viimasel ajal asendatakse järjest sagedamini ajammootor *AM*

ja generaator G reguleeritava pingega elavhõbealaldiga. Sel juhtumil nimetatakse vaadeldavat agregaati ka ioonajamiks. Samuti kasutatakse, seni veel piiratud ulatuses, tüüritavaid pooljuhtalaldeid.

Vaadeldud agregaate kasutatakse siis, kui mootori pöörlemiskiirust on vaja reguleerida suure kasuteguriga ja laiades piirides, kuni 1 : 10 ja rohkem (suured metallilõikepingid, valtspingid jne.).

Tuleb märkida, et pinge U muutmine pöörlemiskiiruse n reguleerimise eesmärgil skeemide joon. 9-1, *b* ja 10-8, *a* järgi ei anna soovitud tulemusi, sest üheaegselt ankruahela pinge muutumisega muutub võrdeliselt U-ga ka ergutusvool. Seetõttu, et pinget U saab reguleerida ainult väärtuselt $U = U_N$ madalamale, siis üsna varsti osutub magnetahel mitteküllastatuks ja Φ_δ, i_e ning U hakkavad üksteisega võrdeliselt muutuma. Pöörlemiskiirus n seejuures aga oluliselt ei muutu.



Joon. 10-10. Haruvoolumootori $P_N = 10$ kW, $U_N = 220$ V, $n_N = 950$ p/min töökarakteristikud

Mootori töökarakteristikud kujutavad endast tarbitava võimsuse P_1, tarbitava voolu I, pöörlemiskiiruse n, momendi M ja kasuteguri η sõltuvust kasulikust võimsusest P_2, kui $U = \text{const}$ ja reguleerreostaatide asendid on muutumatud. Väikese võimsusega haruvoolumootori töökarakteristikud lisatakisti puudumisel ankruahelas on esitatud joon. 10-10. Nende karakteristikute kuju tuleneb mootori üldistest omadustest ja vastab eespool toodule.

10-5. PEAVOOLUMOOTORID

Loomulik kiirus- ja mehaaniline karakteristik, kasutusala. Peavoolumootorites on ankruvool samaaegselt ka ergutusvooluks: $i_e = I_a = I$. Seetõttu muutub voog Φ_δ suures ulatuses ja võib kirjutada, et

$$\Phi_\delta = k_\Phi I. \qquad (10\text{-}18)$$

Võrdetegur k_Φ on suures koormuste piirkonnas, kui $I < I_N$, praktiliselt konstantne ja alles siis, kui $I > (0{,}8 \ldots 0{,}9) I_N$, hakkab k_Φ magnetahela küllastumise tõttu mõnevõrra vähenema.

Kasutades peavoolumootori kohta seost (10-18), saame avaldiste (10-7), (10-9) ja (10-8) asemele

$$n=\frac{U-R_aI}{C_ek_\Phi I}; \tag{10-19}$$

$$n=\frac{\sqrt{C_M}U}{C_e\sqrt{k_\Phi}\sqrt{M}}-\frac{R_a}{C_ek_\Phi}; \tag{10-20}$$

$$M=C_Mk_\Phi I^2=\frac{C_M\Phi_\delta^2}{k_\Phi}. \tag{10-21}$$

Mootori kiiruskarakteristik [vt. avaldist (10-19)], mis on kujutatud joon. 10-11, on pehme ja hüperboolse iseloomuga. Kõvera $n=f(I)$ kuju, kui $k_\Phi=\text{const}$, on näidatud joon. 10-11 kriipsjoonega. Voolu I väikestel väärtustel muutub mootori pöörlemiskiirus lubamatult suureks. Seetõttu ei lubata peavoolumootoreid, välja arvatud kõige väiksemad, tühijooksul töötada ja rihmülekande kasutamine ei ole vastuvõetav. Tavaliselt on vähim lubatud koormus $P_2=(0{,}2\ldots0{,}25)P_N$.

Peavoolumootori loomulik mehaaniline karakteristik $n=f(M)$ on vastavalt seosele (10-20) näidatud joon. 10-13 (kõver 1).

Kuivõrd haruvoolumootoritel $M\sim I$, peavoolumootoritel aga $M\sim I^2$ ning käivitamisel lubatav $I=(1{,}5\ldots2{,}0)I_N$, siis arendavad peavoolumootorid, võrreldes haruvoolumootoritega, märgatavalt suuremat käivitusmomenti. Peale selle on haruvoolumootoritel $n\approx\text{const}$, peavoolumootoritel aga, kooskõlas avaldistega (10-19) ja (10-20), ligikaudu (kui $R_a=0$)

$$n\sim\frac{U}{I}\sim\frac{U}{\sqrt{M}}.$$

Seetõttu haruvoolumootoritel

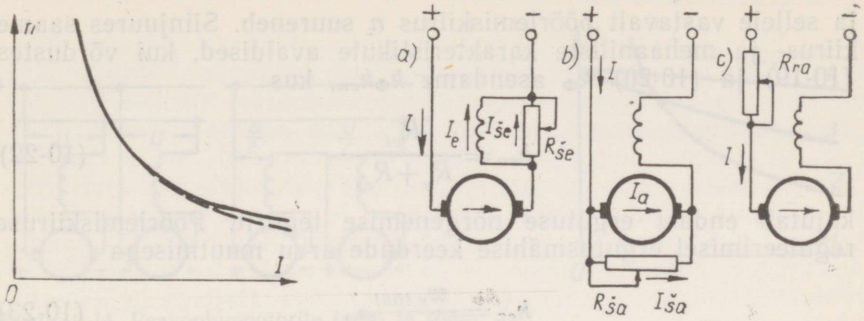
$$P_2=\Omega M=2\pi nM\sim M,$$

peavoolumootoritel aga

$$P_2=2\pi nM\sim\sqrt{M}.$$

Seega muutub peavoolumootorite võimsus koormusmomendi suures ulatuses muutumisel vähem kui haruvoolumootoritel ja momendiga ülekoormus on neile vähem ohtlik, mistõttu peavoolumootoritel on olulisi eeliseid siis, kui käivitustingimused on rasked või koormusmoment muutub suures ulatuses. Seepärast kasutatakse neid laialdaselt elekterveol (tramm, metroo, trollibuss, elektrivedur ja diiselelektrivedur raudteel) ning tõste-transpordiseadmetes.

Tuleb märkida, et pöörlemiskiiruse suurenemisel üleminekut



Joon. 10-11. Peavoolumootori loomulik kiiruskarakteristik.

Joon. 10-12. Peavoolumootori pöörlemiskiiruse reguleerimisskeemid: *a*) ergutusmähise šunteerimisega, *b*) ankru šunteerimisega ja *c*) takisti lülitamisega ankruahelasse

generaatorirežiimi ei toimu. Joon. 10-11 nähtub see sellest, et karakteristik $n = f(I)$ ordinaatteljega ei lõiku. Füüsikaliselt võib seda selgitada järgmiselt: üleminekul generaatorirežiimi etteantud pöörlemissuuna ja pinge polaarsuse korral peab voolu suund muutuma vastupidiseks, samal ajal aga E_a suund ja pooluste polaarsus ei tohi muutuda. Viimati märgitu on aga ergutusvoolu suuna muutumisel võimatu. Seetõttu on vaja peavoolumootori üleviimiseks generaatorirežiimi ergutusmähise otsad ümber lülitada.

Pöörlemiskiiruse reguleerimine voo muutmise abil. Pöörlemiskiiruse n reguleerimine välja nõrgendamisega toimub ergutusmähise šunteerimise teel mingi takistiga $R_{eš}$ (joon. 10-12, *a*) või ergutusmähise sisselülitatud keerdude arvu vähendamisega. Viimasel korral peavad olema ette nähtud vastavad väljastused ergutusmähisest.

Kuivõrd ergutusmähise takistus R_e ja pingelang sellel on väike, peab $R_{eš}$ olema samuti väike. Seetõttu on ka kaod takistil $R_{eš}$ väikesed ja summaarne ergutuskadu šunteerimisel isegi väheneb. Selle tagajärjel jääb mootori kasutegur suureks, mistõttu niisugust reguleerimisviisi praktikas laialdaselt ka kasutatakse.

Ergutusmähise šunteerimisel väheneb ergutusvool väärtuselt I väärtuseni

$$I_e = \frac{R_{eš}}{R_e + R_{eš}} I$$

ja sellele vastavalt pöörlemiskiirus n suureneb. Siinjuures saame kiirus- ja mehaaniliste karakteristikute avaldised, kui võrdustes (10-19) ja (10-20) k_Φ asendame $k_\Phi k_{en}$, kus

$$k_{en}=\frac{R_{eš}}{R_e+R_{eš}} \qquad (10\text{-}22)$$

kujutab endast ergutuse nõrgenemise tegurit. Pöörlemiskiiruse reguleerimisel ergutusmähise keerdude arvu muutmisega

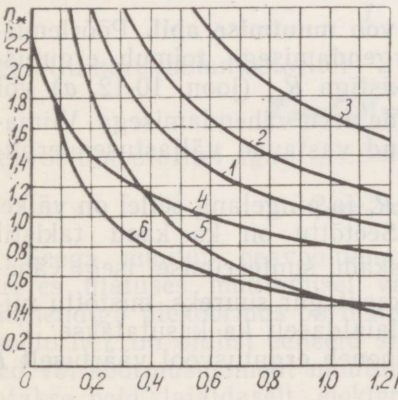
$$k_{en}=\frac{w_{e\,tööt}}{w_{e\,kogu}}. \qquad (10\text{-}23)$$

Joon. 10-13 on näidatud pöörlemiskiiruse reguleerimise karakteristikud $n=f(M)$ (kõverad *1*, *2* ja *3*) kolmel k_{en} väärtusel (väärtusele $k_{en}=1$ vastab loomulik karakteristik *1*, $k_{en}=0{,}6$ — kõver *2* ja $k_{en}=0{,}3$ — kõver *3*). Karakteristikud on esitatud suhtelistes suurustes ja vastavad juhtumile, kui $k_\Phi=\text{const}$ ja $R_{a*}=0{,}1$.

Pöörlemiskiiruse reguleerimine ankru šunteerimisega. Ankru šunteerimisel (joon. 10-12, *b*) vool ja ergutusvoog suurenevad ning pöörlemiskiirus väheneb. Et $R_e\approx 0$, siis takisti $R_{aš}$ on praktiliselt kogu võrgupinge all ja peab olema küllalt suur. Kaod selles takistis on samuti suured ning kasutegur väheneb märgatavalt.

Peale selle on ankru šunteerimine efektiivne ainult siis, kui magnetahel ei küllastu. Seoses sellega kasutatakse ankru šunteerimist praktikas harva. Joon. 10-13 kõver *4* kujutab endast karakteristikut $n=f(M)$, kui

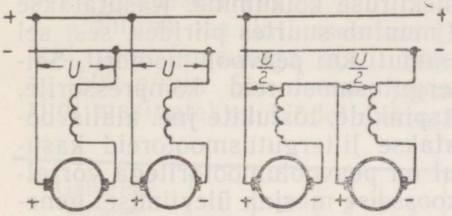
$$I_{ša}\approx\frac{U}{R_{aš}}=0{,}5I_N.$$

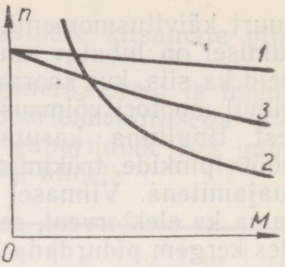


Joon. 10-13. Peavoolumootori mehaanilised karakteristikud mitmesugustel pöörlemiskiiruse reguleerimisviisidel

Pöörlemiskiiruse reguleerimine jadalülituses takistiga ankruahelas (joon. 10-12, *c*). See võimaldab kiirust reguleerida nimiväärtusest allapoole, et aga kasutegur seejuures märgatavalt väheneb, rakendatakse niisugust reguleerimisviisi piiratult.

Kiirus- ja mehaanilise karakteristiku avaldised saame sel juhtumil, kui võrdustes (10-19) ja (10-20) R_a asendame (R_a+R_{ra})-ga. Karakteristik $n=f(M)$ pöörlemiskiiruse niisu-





Joon. 10-14. Peavoolumootorite jada- ja rööplülitus pöörlemiskiiruse muutmiseks

Joon. 10-15. Haruvoolumootorite (*1*), peavoolumootorite (*2*) ja pärilülituses liitergutusmootorite (*3*) loomulikud mehaanilised karakteristikud

guse reguleerimise jaoks, kui $R_{ra} = 0{,}5$, on kujutatud joon. 10-13 kõverana *5*.

Pöörlemiskiiruse reguleerimine pinge muutmisega. Sel viisil saab pöörlemiskiirust reguleerida nimiväärtusest allapoole, säilitades suure kasuteguri. Vaadeldavat reguleerimisviisi rakendatakse ulatuslikult transpordiseadmetes, kus igale vedavale teljele on paigaldatud eraldi mootor ja reguleeritakse mootorite ümberlülitamisega rööpühendusest järjestikku (joon. 10-14). Joon. 10-13 kujutab kõver *6* karakteristikut $n = f(M)$ sel juhtumil, kui $U = 0{,}5\ U_N$.

10-6. KOMPAUNDMOOTORID

Kompaund- ehk liitergutusmootori peavoolumähise vastulülituse puhul voog Φ_δ koormuse suurenemisel väheneb. Seetõttu on karakteristikud $n = f(I)$ ja $n = f(M)$ niisugused, nagu joon. 10-6 toodud kõver *3*. Et sellise karakteristikuga töötamine on tavaliselt ebastabiilne, ei kasutata mootorites peavoolumähise vastulülitust. Peavoolumähise pärilülituse korral kasvab koormuse suurenemisel ka voog, mistõttu sellisel liitergutusega mootoril on pehmem mehaaniline karakteristik kui haruvoolumootoril, kuid jäigem kui peavoolumootoril (joon. 10-15). Sõltuvalt sellest, missugust ülesannet mootor täidab, võib peavoolumähise osatähtsus kogu magneetimisergutuse loomisel laiades piirides muutuda.

Liitergutusmootorite pöörlemiskiirust reguleeritakse tavaliselt samuti kui haruvoolumootoritel, kuigi põhimõtteliselt võib kasutada ka neid viise, mida rakendatakse peavoolumootorite puhul.

Liitergutusmootoreid kasutatakse juhtudel, kui on vaja saada

suurt käivitusmomenti, kiirendust käivitusel ning koormuse muutumisel on lubatav suur pöörlemiskiiruse kõikumine. Kasutatakse neid ka siis, kui koormusmoment muutub suurtes piirides, sest sel puhul mootori võimsus väheneb samuti kui peavoolumootoril. Sellest tingituna kasutatakse liitergutusmootoreid kompressorite, höövelpinkide, trükimasinate, valtspinkide, tõstukite jne. alalisvooluajamitena. Viimasel ajal hakatakse liitergutusmootoreid kasutama ka elekterveol, sest sel juhul on peavoolumootoritega võrreldes kergem pidurdada liikuvaid koosseise masina üleviimisel generaatorirežiimi tekkiva energia tagastamisega alalisvoolu kontaktvõrku.

10-7. NSV LIIDU ELEKTRIMASINATEHASTES VALMISTATAVAD NORMAALKONSTRUKTSIOONIGA ALALISVOOLUMASINAD

NSV Liidu rahvamajanduses valitseb suur nõudmine eelmises ja käesolevas peatükis vaadeldud normaalkonstruktsiooniga alalisvoolugeneraatorite ja -mootorite järele. Kõige rohkem nõutakse väikese võimsusega masinaid (kuni 30 kW). Selliseid masinaid valmistatakse masstootmises vooltootmisviisil. Võimsamaid masinaid lastakse välja suur- või väikeseerialiselt. Kõige suuremaid masinaid, võimsusega tuhandetes kilovattides, valmistatakse tavaliselt üksiktootmises, s. o. iga antud tehniliste andmetega masinatüüpi lastakse välja väikesearvuliselt.

Mass- või seeriatootmise masinad projekteeritakse ühtlusseeriatena, mis haaravad teatud võimsuste, pöörlemiskiiruste ja pingete piirkonda. Antud ühtlusseeria masinatele on omane ühesugune konstruktiivne lahendus, ühesugune tootmistehnoloogia, samad kasutatavad materjalid jne. Ühtlusseeria piires püütakse masinate detaile ja sõlmi võimalikult rohkem unifitseerida. See võimaldab tõsta tööviljakust ja vähendada tootmiskulusid. Peale antud ühtlusseeria masinate põhiehitusviisi võivad ette nähtud olla ka teatud modifikatsioonid: väliskeskkonna mõjutuste vastu kaitsmise astme järgi (vt. § 8-5), masinate kinnitusviisi järgi (käppadel, äärikuga) jne. Tavaliselt valmistavad ühtlusseeria eri lõike eri tehased. Aeg-ajalt, tootmisviiside täiustamise järgi, kõrgema kvaliteediga materjalide ilmumisel, uute vajaduste tekkimisel rahvamajanduses jne., viiakse läbi antud ühtlusseeria masinate täiustamine ehk moderniseerimine või töötatakse välja uus, vana asendav kõrgemate tehnilis-majanduslike näitajatega masinate ühtlusseeria.

Käesoleval ajal valmistatakse NSV Liidus elektrimasinatehastes mitut ühtlusseeriat alalisvoolumasinaid. Põhiliseks neist on normaalkonstruktsiooniga alalisvoolumasinate ühtlusseeria tähi-

sega II, mis asendab varem toodetud masinate kitsamate piiridega ühtlusseeriaid.

Põhiline osa ühtlusseeriast II haarab generaatoreid ja mootoreid nimivõimsusega 0,3 .. 200 kW ja pöörlemiskiirusega $n =$ $= 1500$ p/min. See osa on jaotatud 11-ks gabariidiks. Iga gabariidi masinatel on kindel ankru läbimõõt D_a, nimelt:

Gabariidi number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
D_a, mm	83	106	120	138	162	195	210	245	294	327	368

Iga gabariit sisaldab endas kahe erineva ankrusüdamiku pikkusega masinaid. See võimaldab kasutada antud gabariidi tehnoloogilisi rakiseid (pooluse- ja ankruplekkide stantse jt.) erinevate võimsustega ja ühesuguse pöörlemiskiirusega masinate valmistamiseks. Näiteks tüüp II 81 tähistab ühtlusseeria II lühema, II 82 aga pikema ankruga *8.* gabariidi masinat.

Põhiline osa ühtlusseeria üheteistkümne gabariidi masinatest on pritsmekindla ehitusviisiga. On ette nähtud ka kinnise ehitusviisiga modifikatsioon. Kõik masinad ehitatakse kompensatsioonimähiseta. Mootoritel on nõrk stabiliseeriv peavoolu-ergutusmähis, generaatorid on liitergutusega. Mootorite pinge — 110 või 220 V (seeria võimsamatel — ainult 220 V). Generaatorite pinge 115 või 230 V (seeria võimsamatel — ainult 230 V). On ette nähtud ka generaatorid akude laadimiseks nimipingega $U_N =$ $= 135$ V ja $U_N = 270$ V, pinge reguleerimisega piirides 110 ... ... 160 V ja 220 ... 320 V. Generaatorite nimipöörlemiskiirused on 1450 ja 2850 p/min, põhiehitusviisiga mootorite nimipöörlemiskiirused (täisergutusega) on 600, 750, 1000, 1500 ja 3000 p/min. 1 ... 6 gabariidi masinate kommutaatorite valmistamisel kasutatakse plastmasse.

Kuivõrd iga gabariit sisaldab kahe ankrusüdamiku pikkusega masinaid ja antud gabariidi mõlema pikkusega masinaid valmistatakse mitmesuguse pöörlemiskiirusega, siis on erinevate masinate hulk küllaltki suur.

Kõik antud tingtähisega masinad (näiteks II 72) on ühesuguste mõõtmetega ja valmistatakse ühesugustest detailidest (välja arvatud mähised). Tabelis 10-1 on ühtlusseeria näitajate illustreerimiseks toodud mõningaid andmeid mootorite kohta, mille nimipöörlemiskiirus on 1500 p/min. Sama tingtähisega, kuid väiksema nimipöörlemiskiirusega mootorid on väiksema võimsusega P_N ja pisut väiksema kasuteguriga, suurema nimipöörlemiskiirusega n_N

Tabel 10-1

Ühtlusseeria П pritsmekindla ehitusviisiga mootorite tehnilised andmed pingel $U_N = 220$ V ja nimipöörlemiskiirusel $n_N = 1500$ p/min

Tüüp	P_N kW	η %	Mass kg	Tüüp	P_N kW	η %	Mass kg
П11	0,30	65,0	18	П62	14	86,5	195
П12	0,45	70,5	23	П71	19	84,5	260
П21	0,7	73,5	35	П72	25	86,0	300
П22	1,0	77,0	41	П81	32	86,0	340
П31	1,5	78,5	53	П82	42	88,0	405
П32	2,2	83,5	62	П91	55	87,0	560
П41	3,2	79,0	72	П92	75	89,5	660
П42	4,5	80,5	88	П101	100	89,5	830
П51	6	82,5	105	П102	125	90,0	950
П52	8	84,5	127	П111	160	90,0	1150
П61	11	84,0	163	П112	200	91,0	1340

mootorid aga vastupidi. Generaatoritel, mille nimipöörlemiskiirus $n_N = 1450$ p/min, on võimsus ja kasutegur peaaegu samasugune kui mootoritel nimipöörlemiskiirusega $n_N = 1500$ p/min. Alalisvoolumootorite hinnas orienteerumiseks märgime, et mootor, mille $P_N = 1{,}0$ kW ja $n_N = 1500$ p/min, maksab ligikaudu 100 rbl., mootor, mille $P_N = 100$ kW ja $n_N = 1500$ p/min, aga ligikaudu 800 rbl.

Ühtlusseerias П (gabariidid 1 ... 11) on ka mootorite modifikatsioon, mille pöörlemiskiirust on ergutusvälja nõrgendamise teel võimalik reguleerida suures ulatuses: 1 : 2,25; 1 : 3; 1 : 4; 1 : 6 ja 1 : 8. Nimipöörlemiskiirused (vähimad antud mootoril) on seejuures piirides 200 ... 1500 p/min ja suurimad pöörlemiskiirused 3000 ... 3450 p/min.

Mootoritel pöörlemiskiiruse reguleerimisulatusega 1 : 6 ja 1 : 8 on ette nähtud ergutusmähise poolide eraldi toitmine, et oleks võimalik sõltumatult reguleerida üksikute pooluste vooge (vt. § 10-3).

Alalisvoolumasinate ühtlusseeria П sisaldab ka võimsamaid masinaid. Selle osa moodustavad gabariidid 12-st kuni 17-ni, kusjuures iga gabariit sisaldab samuti kaks ankru pikkust. Mootoreid valmistatakse pingetele $U_N = 220$, 330, 440 ja 660 V, võimsusega 55 kW pöörlemiskiirusel $n_N = 300$ p/min kuni 1400 kW pöörlemiskiirusel 1000 p/min. Kõigil mootoreil on kompensatsioonimähis ja neid võib kasutada ventilaatorite, pumpade, väikeste ja keskmiste valtspinkide jne. käivitamiseks. Iga gabariit sisaldab ka generaatoreid.

Peale ühtlusseeria П on olemas palju eriotstarbelisi alalis-

voolumasinate ühtlusseeriaid (metallurgia-, kraana-, veomootorid jt.). Ekspluatatsioonis on ka palju vanade ühtlusseeriate masinaid, mille tootmine on lõpetatud. Kuni ühtlusseeria П tootmisse juurutamiseni toodeti paljude aastate jooksul seeria ПН masinaid.

Käesoleval ajal ehitatakse alalisvoolumasinaid pingega kommutaatoril tavaliselt mitte üle $U_N = 1500$ V (magistraalielektrivedurite alalisvoolu-veomootorid). Kõige sagedamini valmistatakse siiski alalisvoolumasinaid pingele kuni 750 ... 900 V, sest pinge suurenemisel muutuvad kommutaatori ja harjade töötingimused raskemaks ning masina hind tõuseb.

Võimsamaid masinaid valmistatakse ka suurema nimipingega, et piirata ankruvoolu. Mõnel juhul ehitatakse suuri masinaid ka kahe ankruga ühel võllil.

Alalisvoolumasina mähiste väljaviigud, vastavalt ГОСТ 183-66, tähistatakse järgmiselt: Я1—Я2 — ankur, К1—К2 — kompensatsioonimähis, Д1—Д2 — lisapooluste mähis, С1—С2 — jadaergutusmähis, Ш1—Ш2 — rööpergutusmähis.

Üksikasjalikumad andmed elektrimasinate ühtlusseeriate kohta on toodud spetsiaalkataloogides.

Üheteistkümnes peatükk

ERITÜÜPI ALALISVOOLUMASINAD

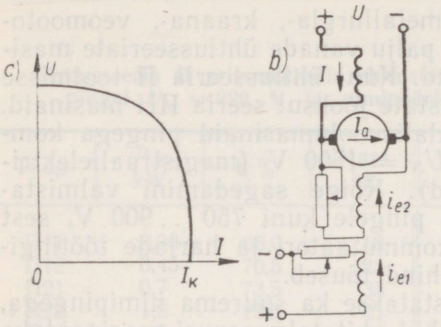
11-1. ERITÜÜPI ALALISVOOLUGENERAATORID JA -MUUNDURID

Alalisvoolumasinatele esitatakse paljudel juhtumitel niisuguseid nõudeid, mida normaalkonstruktsiooniga masinad ei rahulda. See on tinginud rea eritüüpi alalisvoolumasinate loomise. Käesolevas peatükis vaadeldakse lühidalt mõningaid taolisi levinud masinaid ja neid, millel on selleks eeldusi.

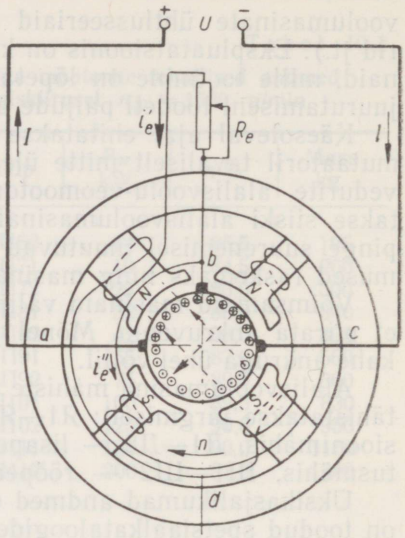
Kolme ergutusmähisega generaator. Paljudel juhtumitel nõutakse, et generaatori väliskarakteristikul oleks joon. 11-1, *a* esitatud kuju. Seda tüüpi karakteristikul muutub vool I vähe pinge U muutumisel laiades piirides ning on lähedane lühisvoolule I_k. Niisugune järsult langev väliskarakteristik on soovitav näiteks elektrikeevitusel, sest sel puhul kaare vool kaare pikkusest praktiliselt ei sõltu ning lühis (elektroodi kokkupuutumine keevitatava esemega) ei ole ohtlik. Niisuguse karakteristikuga generaatoreid on otstarbekas kasutada ka süsteemi *G-M* mootori toiteks, mille võlliga sidurdatud mehhanismi koormusmoment on praktiliselt piiramatu (töötamine vastu tõket) (näiteks ekskavaator). Sel juhul on mehhanismi kinnijäämisel ja peatamisel mootori vool ja moment piiratud, mille tulemusena välistatakse mehhanismi või masina vigastumist.

Joon. 11-1, *a* toodud karakteristiku võib saada kolme: 1) sõltumatu, 2) rööp- ja 3) jadaergutusmähisega generaatori abil (joon. 11-1, *b*). Kolmanda mähise magneetimisergutus on suunatud vastu kahe esimese mähise magneetimisergutusele $F_1 + F_2$. Niisuguseid generaatoreid soovitas insener T. Kraemer 1909. a.

Kolme ergutusmähisega generaatoreid kasutatakse tänapäeval võimsates



Joon. 11-1. Kolme ergutusmähisega generaatori väliskarakteristik (*a*) ja skeem (*b*)



Joon. 11-2. Lõhispoolustega keevitusgeneraator

elektriajamiga ekskavaatorites, soojusvedurite veomootorite toiteks, aga ka paljudel teistel juhtumitel.

Lõhispoolustega generaatoreil on samuti järsult langev väliskarakteristik. Joon. 11-2 on kujutatud kahepooluseline keevitusgeneraator, milles iga *N*- ja *S*-poolus on lõhestatud kaheks osaks: normaal- ja väiksema ristlõikega südamikuks. Masinal on kaks ergutusmähist, millest üks on paigutatud laiadele ja teine — kitsastele südamikele. Kitsad südamikud on tugevasti küllastunud, laiad — nõrgalt.

Generaatori ankru (joon. 11-2) võib jagada neljaks sektoriks. Sektorid *ad* ja *bc* loovad ankrureaktsiooni magneetimisergutuse, mis on suunatud piki pooluste laiade südamike telge ning demagneedib need (vt. joon. 11-2, kus kriipsjooned kujutavad ankrureaktsioonivoo jõujooni). Et need südamikud on nõrgalt küllastunud, siis väheneb nende voog I_a suurenemisega tunduvalt, suure I_a puhul võib isegi suunda muuta. Sektorid *ab* ja *dc* loovad ankrureaktsiooni magneetimisergutuse, mis on suunatud piki kitsaste südamike telge ning magneedib neid. Südamike tugeva küllastatuse tõttu jääb voog seal praktiliselt konstantseks. Selle tulemusena väheneb pooluste $N-N$ ja $S-S$ südamike summaarne voog I_a suurenemisega kiiresti, millega koos langeb järsult ka masina põhiharjadelt *a* ja *c* võetav pinge *U*.

Pinge põhi- (*c*) ja abi- (ehk «kolmanda») harja (*b*) vahel jääb praktiliselt konstantseks, sest selle indutseerib kitsaste poolusesüdamike voog ning seda pinget kasutatakse ergutusmähiste toiteks. Laiade südamike mähiste voolu reguleeritakse takistiga R_e, reostaadi mitmesugustes asendites saadud väliskarakteristikud on näidatud joon. 11-3.

NSV Liidus valmistatakse lõhispoolustega keevitusgeneraatoreid ПС pingega $U_N = 35$ V (tühijooksupingega kuni 80 V) ja vooluga I_a kuni 500 A. Generaatoreil on samuti lisapoolused, mis on paigutatud peapooluste *N* ja *S* vahele.

Ristväljageneraatori ehitas esimesena saksa insener E. Rosenberg (1904. a.).

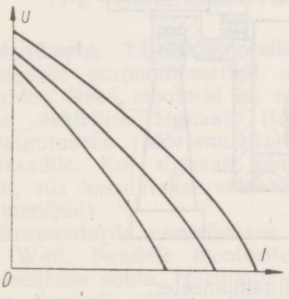
Käesoleval ajal kasutatakse seda peamiselt reisirongide vagunite elektrivarustuse toiteks, rööplülituses akupatareiga. Need generaatorid pannakse pöörlema vaguni telje abil ning annavad pöörlemiskiiruse n laiades piirides muutumisel konstantset pinget U.

Kahepooluselise ristväljageneraatori ehitus on skemaatiliselt näidatud joon. 11-4. Peale pooluste geomeetrilisel neutraalil paiknevate harjade *1-1* on masinal veel harjad *2-2*, mis on esimeste suhtes 90° nihutatud. Harjad *1-1* on lühistatud, harjad *2-2* ühendatakse aga väljastusklemmidega.

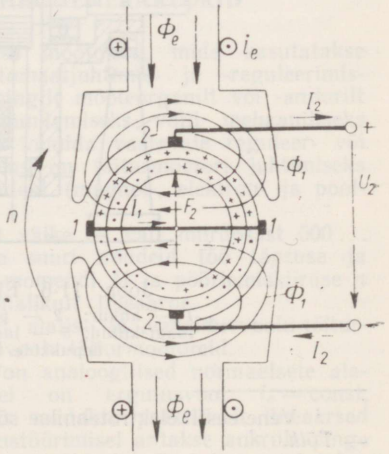
Pooluste ergutusvoog Φ_e indutseerib lühistatud harjade *1-1* ahelas elektromotoorjõu E_1, kuid ei indutseeri elektromotoorjõudu harjade *2-2* ahelas. Vool I_1 tekitab ankrureaktsiooni ristvoo Φ_1, mis sulgub läbi laiade poolusekingade. See voog indutseerib harjade *2-2* ahelas elektromotoorjõu E_2, mis põhjustab koormusahelas voolu I_2. Samaaegselt tekitab vool I_2 mööda pooluste pikitelge suunatud ja ergutusvoo vähenemist põhjustava ankrureaktsiooni magneetimisergutuse F_2, mille toime põhjustabki $U \approx \text{const}$ saamise pöörlemiskiiruse n muutumisel. Ankru välisrõngal joon. 11-4 on näidatud voolu I_1 suund, siserõngal aga voolu I_2 suund. Ankru sektorite juhtmetes esinevad voolud $I_1 + I_2$, teiste sektorite juhtmetes aga voolud $I_1 - I_2$.

I_1, I_2 ja U_2 sõltuvus pöörlemiskiirusest n on kujutatud joon. 11-5. Generaator ergutub akupatareiga ja alates pöörlemiskiirusest $n = 0$ kuni $n = n_1$ töötab tühijooksul ($I_2 = 0$). Seejuures kasvavad I_1 ja $U_2 = E_2$ võrdeliselt n-ga. Pöörlemiskiiruse $n = n_1$ korral võrreldakse pinget $U_2 = E_2$ akupatarei pingega ning automaat lülitab generaatori patareiga paralleeltöösse. Edasisel E_2 suurenemisel, kui $n > n_1$, tekivad koormusvool I_2 ja ankrureaktsiooni magneetimisergutus F_2. Viimase toimel hakkab Φ_e vähenema, mille tagajärjel vähenevad ka E_1, I_1 ja Φ_1. Kuid harjadel *2-2* $E_2 = C_e \Phi_1 n$, aga samuti pinge $U_2 = E_2 - R_a I_2$ algul veidi veel suurenevadki. Alates teatavast kindlast kiirusest jäävad U_2 ja I_2 praktiliselt konstantseks.

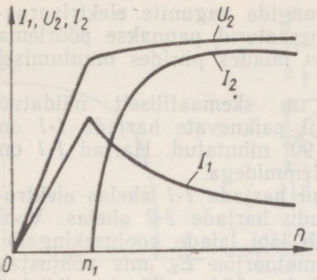
Nõukogude insener L. Raškovski soovitas paigutada ristväljageneraatori poolustele jadaergutusmähise, mis lülitatakse voolu I_2 ahelasse ja kompenseerib sellest voolust tingitud ankrureaktsiooni põhilise osa. Niisugune kompensatsioonimähis võimaldab ergutusmähist kergemaks muuta ning selle võimsust vähendada, kuid samuti parandada ka generaatori karakteristikuid.



Joon. 11-3. Joonisel 11-2 toodud generaatori väliskarakteristikud



Joon. 11-4. Ristväljageneraatori ehitus

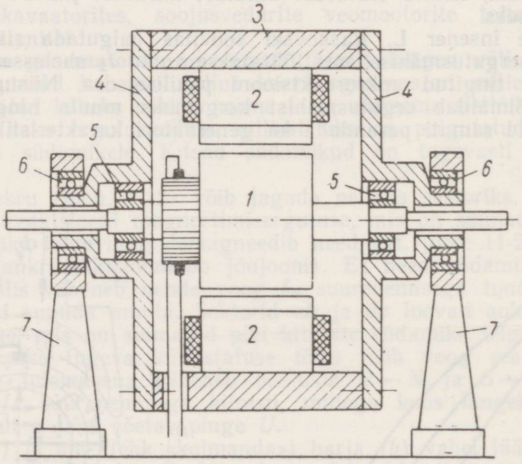


Joon. 11-5. Ristväljageneraatori karakteristikud

Ei ole raske näha, et generaatori polaarsus ei sõltu pöörlemissuunast, mis patareiga paralleeltöö korral osutub generaatori väärtuslikuks omaduseks.

Vaadeldavat liiki vagunigeneraatoreid ehitatakse pingele $U_2 = 50$ V ja võimsusele kuni $P = 5$ kW. Kuid viimasel ajal hakatakse niisuguste vagunigeneraatorite asemel kasutama vahelduvvoolugeneraatoreid pooljuhtalalditega, mille eeliseks on kommutaatori puudumine.

Elektrimasin-dünamomeetrid (balanssiir- ehk pendeldünamod)[1] on ette nähtud sisepõlemismootorite, samuti ka elektri- ja teiste masinate pöördemomendi mõõtmiseks nende katsetamisel. Elektrimasin-dünamomeetril on kaks paari laagreid, millele toetuvad ankur ja induktor (joon. 11-6). Induktor võib seetõttu vabalt pöörduda mingi nurga võrra, mille suurus on piiratud liikumatute tugedega. Masin võib töötada nii generaatorina kui ka mootorina. Seejuures mõjuvad induktorile needsamad pöördemomendid, mis toimivad ankrule (elektromagnetiline moment, mehaanilise ja teraseskao moment). Induktorile mõjuvat momenti, mis on võrdne ankrule toimivaga, mõõdetakse induktori külge kinnitatud kangi ja spetsiaalkaalude või kaaluvihtidega. Niimoodi määratakse dünamomeetri võllile mõjuv moment. Seejuures tekib ainult väike viga, mille põhjustavad hõõrdumine ühes laagripaaris ja



Joon. 11-6. Elektrimasin-dünamomeeter:
1 — ankur; *2* — poolused; *3* — induktoriike; *4* — laagrikilbid; *5* — laagrid «induktor-ankur»; *6* — kandepukkide laagrid; *7* — kandepukid

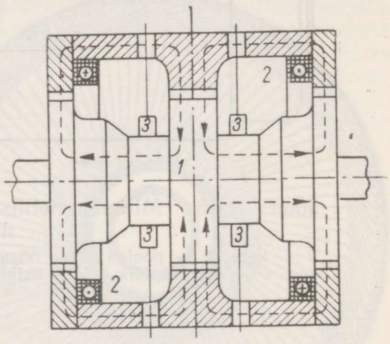
[1] Vene-eesti elektrotehnika sõnastikus soovitatakse terminit *pendeldünamo*. — *Tõlk.*

jõud, mis vastavad osale ventilatsioonikaole. Seda viga võib eraldi arvestada.

NSV Liidus ehitatakse elektrimasin-dünamomeetreid seeriast МПБ võimsusega kuni 800 kW. Neid võib valmistada ka mistahes tüüpi vahelduvvoolumasina baasil.

Unipolaargeneraatorid võimaldavad saada suurt alalisvoolu (kuni 500 000 A) madalal pingel (1 ... 50 V).

Unipolaargeneraatori ehituse üks variant on näidatud joon. 11-7. Massiivne terasrootor *1* pöörleb magnetväljas, mille tekitavad ergutusmähise *2* liikumatud rõngaspoolid. Töövoog Φ on masina keskmises aktiivosas piki kogu ümbermõõtu ühesuguse polaarsusega, millest tulenebki masina nimetus. Rootori mähiseks on rootori massiivne kere ise. Rootori pöörlemisel indutseeritakse rootori keskmises aktiivosas elektromotoorjõud $E = Blv$, mille suund kogu ümbermõõdul on samuti ühesugune. Rootorist võetakse voolu liikumatute harjadega *3*.



Joon. 11-7. Unipolaargeneraator

Unipolaargeneraatorite kasutamist piiravad voolu ärajuhtimise raskused. Suurtel vooludel on harikontakti pind ja harjade arv väga suur. Harjaseadis osutub kohmakaks ning harikontaktis tekib suur mehaaniline ning elektriline võimsuskadu.

Viimasel ajal on seoses elektromagnetiliste pumpade arenguga (vt. § 11-4) uuesti kasvanud huvi unipolaargeneraatorite vastu. Seejuures on hakatud rootorist voolu ära juhtima vedelmetallide (elavhõbe, naatrium, naatriumi ja kaaliumi sulam) abil. Seoses sellega räägitakse «vedelmetallharjadest». Käesoleval ajal on ehitatud unipolaargeneraatoreid võimsusega kuni 1000 kW.

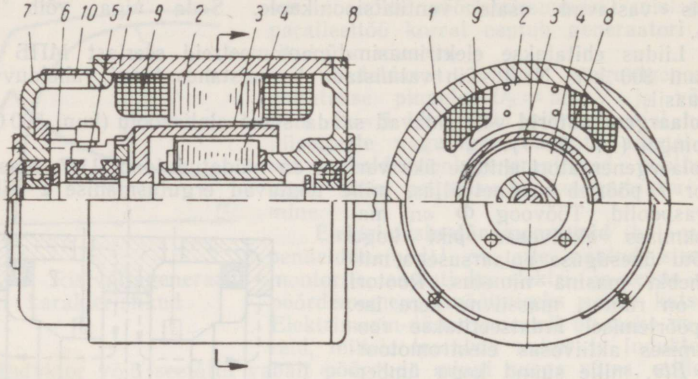
11-2. TÄITURMOOTORID JA TAHHOGENERAATORID

Üldandmeid. Täiturmootoreiks nimetatakse mootoreid, mida kasutatakse mitmesuguste automatiseeritud seadmete automaatjuhtimis- ja -reguleerimissüsteemides. Need mootorid on ette nähtud mingilt mõõteorganilt või -andurilt saadava elektrilise signaali (tüürpinge) muundamiseks võlli mehaaniliseks ümberpaigutuseks (pöörlemiseks) eesmärgiga toimida vastavale reguleer- või juhtaparaadile. Kui signaali pinge ja võimsus on täiturmootori juhtimiseks väikesed, siis kasutatakse vahe-võimsusvõimendeid (magnet-, elektron- ja pooljuhtvõimendeid).

Täiturmootorite nimivõimsus on harilikult väike — vati murdosast 500 ... ... 600 W-ni. Nendele mootoritele esitatakse suuri nõudeid töö täpsuse ja kiiretoimelisuse kohta. Harilikult nõutakse, et momendi M ja pöörlemiskiiruse n sõltuvus signaali- (tüür-) pingest oleks võimalikult lineaarne.

Ehitatakse ja kasutatakse mitmesuguseid alalis- ja vahelduvvoolu-täiturmootoreid. Allpool vaadeldakse lühidalt alalisvoolu-täiturmootoreid.

Normaalkonstruktsiooniga täiturmootorid on analoogilised normaalsete alalisvoolumasinate ehitusega. Ankurtüürimisel on ergutusvool $i_e = \text{const}$, ankrule aga antakse tüürpinge U_t. Seejuures saadakse praktiliselt lineaarsed karakteristikud $M = f(U_t)$ ja $n = f(U_t)$. Poolustüürimisel antakse ankrule pinge $U_a = \text{const}$, tüürpinge U_t antakse aga ergutusmähisele. Seejuures vajatakse



Joon. 11-8. Mittemagnetilise õõsankruga alalisvoolu-täiturmootor:

1 — kere; *2* — poolus; *3* — õõsankur; *4* — sisestaator; *5* — kommutaator; *6* — harjahoidik, *7* — esikilp; *8* — tagakilp; *9* — ergutusmähis; *10* — vaateava kaas

tüürimiseks väiksemat võimsust, kuid karakteristik $n = f(U_t)$ ei ole lineaarne. Seepärast kasutatakse harilikult ankurtüürimist.

Püsimagnetitega mootorid. Seoses alumiiniumi ja nikli (Al—Ni), alumiiniumi, nikli ja koobalti (Al—Ni—Co) ning ka paljude teiste suurepäraste magnetiliste omadustega sulamite väljatöötamisega sai võimalikuks ergutusmähiseta püsimagnetitega induktoritega masinate valmistamine. Peale selle valmistatakse püsimagnetitega ka ankurtüürimisega täiturmootoreid võimsusega kuni 100 W.

Püsimagnetitega võib ehitada ka üldotstarbelisi generaatoreid ja mootoreid võimsusega kuni 10 kW. Nimetatud sulamite kalliduse tõttu ei ole niisugused masinad senini levinud.

Mittemagnetilise õõsankruga täiturmootorid (joon. 11-8) on ankru väikese inertsi tõttu eriti kiiretoimelised. Õõssilinderankur valmistatakse plastmassist ja sellele kinnitatakse kommutaatoriga ühendatud harilik ankrumähis. Sisemine liikumatu ferromagnetiline südamik (sisestaator) võib ankurtüürimise korral olla massiivne.

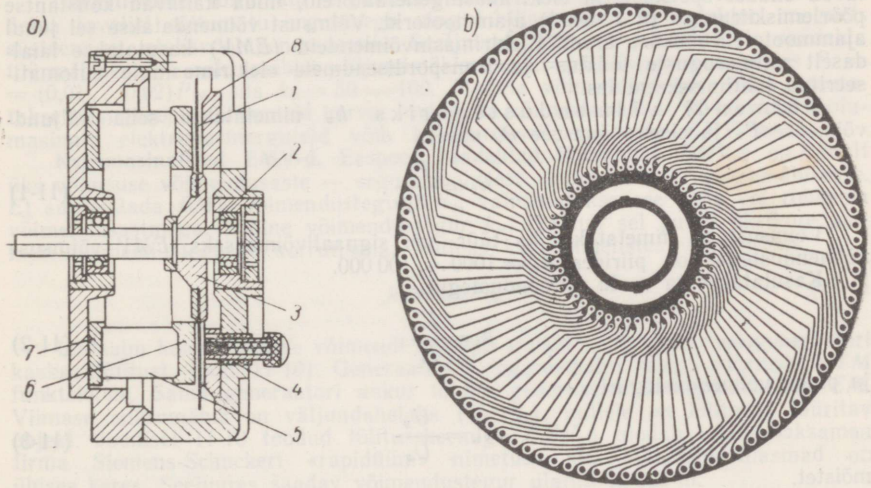
Suure mittemagnetilise õhupilu tõttu väli- ja sisestaatori vahel vajatakse tugevat ergutusmähist, masina gabariidid suurenevad, kasutegur aga väheneb. Taolisi mootoreid toodetakse võimsusega kuni 15 W.

Trükimähisankruga täiturmootoril (joon. 11-9) on samuti väike inerts. Selle mootori ankur on mittemagnetilisest materjalist (tekstoliit, klaas jne.) õhukene ketas, mille mõlemale küljele on paigutatud vasktraadist ankrumähis. Viimane valmistatakse ankrukettale kleebitud vaskfooliumi lehtede galvaanilise söövitamisega või siis galvaanilise sadestamise ehk vase ülekandmisega. Niisugune mähis sai trükimähise nimetuse. Ankrumähise skeem on harilik, mähis kahekihiline, kusjuures üksikute kihtide traadid on paigutatud ketta kummalegi küljele ning ühendatakse omavahel elektriliselt kettas olevate avade kaudu. Hõbegrafiitharjad libisevad mööda ankrumähise elementide isoleerimata pinda nagu mööda kommutaatorit.

Mootorit ergutatakse püsimagnetite või ergutusmähisega. Niisuguste masinate pinge on 6...50 V. Heade jahutustingimuste tõttu lubatakse ankrumähises

suurt voolutihedust (kuni $40\frac{A}{mm^2} = 40\frac{MA}{m^2}$ kestval töötamisel). Kui peale signaalipinge väljalülitamist on vaja mootorit kiiresti pidurdada, valmistatakse selle ankruketas alumiiniumist. Ankrumähise valmistamine galvaanilisel teel muudab masina masstootmisel odavamaks.

Trükimähisankruga masinaid toodetakse võimsusega kuni 5 kW, kuid sagedamini võimsusega kuni 200 W.



Joon. 11-9. Trükimähisankruga alalisvoolu-täiturmootor:

a) mootori lõige; *b*) ankrumähis. *1* — mähisega ankruketas; *2* — võll; *3* — puks; *4* — harjad ja harjahoidik; *5* — püsimagnetid (poolused); *6* — poolusekingad; *7* ja *8* — pehmest magnetterasest kettad.

Tahhogeneraatorid on väikese võimsusega elektrigeneraatorid (harilikult võimsusteni $P_N = 10 \ldots 50$ W), mida kasutatakse automaatikasüsteemides pöörlemiskiiruse muundamiseks elektriliseks signaaliks (pinge U_s). Tahhogeneraatorilt nõutakse lineaarsõltuvust $U_s = f(n)$ täpsusega kuni 0,5%, aga mõnikord täpsusega kuni 0,01%. Väikese võimsusega tahhogeneraatorites on $n = 1000$ p/min korral pinge $U_s = 3 \ldots 5$ V, palju võimsamates harilikuks otstarbeks kasutatavates tahhogeneraatorites on aga samal pöörlemiskiirusel $U_s = 50 \ldots 100$ V.

Enamikul tahhogeneraatoreil on harilik sõltumatu ergutusega konstantse ergutusvooluga $i_e = \text{const}$ või püsimagnetitega alalisvoolumasina konstruktsioon. Mehaanilise inertsi vähendamise ja pinge hammaspulsatsiooni kõrvaldamise vajadusel kasutatakse õõsankruga konstruktsiooni (vt. joon. 11-8). Viimasel ajal on välja töötatud ka elektromagnetilise ergutuse või püsimagnetitega unipolaar-tahhogeneraatoreid (vt. joon. 11-7). Seejuures puudub pinge kommutaatorpulsatsioon, kuid U_s on väike.

Normaalkonstruktsiooni ja püsimagnetitega täiturmootoreid ja tahhogeneraatoreid toodetakse NSV Liidus seeriaviisiliselt. Laialdaselt kasutatakse ka vahelduvvoolu-täiturmootoreid ja -tahhogeneraatoreid.

11-3. ELEKTRIMASINVÕIMENDID

Üldandmeid. Automatiseeritud seadmeis on sageli vaja võimendada mitmesugustest väikese võimsusega mõõteelementidest või anduritest (temperatuuri-, surve-, niiskuse-, keskkonna keemiliste omaduste jne.) saadavat võimsust. Pöörlemiskiiruse andur näiteks on eespool vaadeldud tahhogeneraator. Selleks kasutatavaid seadmeid nimetataksegi *võimendeiks*.

Tehnikas kasutatakse väga mitmesuguseid elektrivõimsuse võimendeid: elektron- (lamp-), pooljuht-, magnet- ja elektrimasinvõimendeid. Viimased kujutavad endast spetsiaalseid elektrimasingeneraatoreid, mida käitavad konstantse pöörlemiskiirusega ($n = \text{const}$) ajammootorid. Võimsust võimendatakse sel juhul ajammootori võimsuse arvel. Elektrimasinvõimendeid (*EMV*) kasutatakse laialdaselt mitmesuguste tööstus- ja transpordiseadmete elektrimasinate automatiseeritud juhtimisskeemides.

Võimendi võimendusteguriks k_v nimetatakse selle väljundvõimsuse P_v ja sisendvõimsuse P_s suhet:

$$k_v = \frac{P_v}{P_s}. \tag{11-1}$$

Võimsust P_s nimetatakse ka tüür- või signaalivõimsuseks. *EMV* võimsuse võimendustegur on piirides $k_v = 1000 \ldots 100\,000$.

Kasutatakse ka voolu võimendusteguri-

$$k_i = \frac{I_v}{I_s} \tag{11-2}$$

ja pinge võimendusteguri

$$k_u = \frac{U_v}{U_s} \tag{11-3}$$

mõistet.

Järelikult võimsuse võimendustegur

$$k_v = k_i k_u. \tag{11-4}$$

Harilikult nõutakse, et *EMV* võimendustegur k_v oleks konstantne. Selle tagamiseks ei tohi *EMV* magnetsüsteem olla küllastunud. *EMV*-lt nõutakse samuti kiiretoimelisust, s. t. väljundvõimsuse P_v kiiret muutumist sisendvõimsuse P_s muutumisel. Kiiretoimelisuse määrab *EMV* mähiste elektromagnetiline ajakonstant

$$T = \frac{L}{r}.$$

EMV kiiretoimelisust võib hinnata teatava ekvivalentse ajakonstandi T_e-ga, mis arvestab siirdeprotsesside kulgemise kiirust masinas tervikuna. Harilikult $T_e = 0{,}05 \ldots 0{,}3$ s.

Et magnetvoo Φ muutumisel vähendada magnetsüsteemis indutseeritavate pöörisvoolude aeglustavat mõju, valmistatakse kogu *EMV* magnetsüsteem kvaliteetsest elektrotehnilisest lehterasest. Vastava terasemargi kasutamisega ja spetsiaalsete lisavõtetega vähendatakse magnetahela hüstereesi mõju miinimumini.

EMV kvaliteedi hindamisel kasutatakse ka nn. *hüveteguri* mõistet, mis avaldub suhtena

$$k_h = \frac{k_v}{T_e}. \tag{11-5}$$

On soovitav, et k_h oleks võimalikult suur, mis nõuab järelikult suurt k_v-d ja väikest T_e-d. Kahjuks suureneb aga ajakonstant T_e võimendusteguri k_v suurendamisel ja vastupidi. Kui näiteks suurendada *EMV* magnetahela ristlõiget, siis magnetvoog, väljundpinge ja -võimsus ning võimsuse võimendustegur suurenevad. Koos sellega suureneb ka mähiste induktiivsus ja ajakonstant T_e. Seetõttu tuleb k_v ja T_e valikul leida kompromisslahendus.

Kaasaegsete *EMV*-de nimiväljundvõimsus ulatub 100 kW-ni. Tüürvõimsus kõigub vati murdosast mõne vatini. Esimesed *EMV*-d ehitati 1937. a.

Üheastmeline sõltumatu ergutusega EMV. Lihtsaima *EMV*-na võib vaadelda tavalist sõltumatu ergutusega ning kihilise ankru ja induktori magnetsüsteemiga alalisvoolugeneraatorit. Sealjuures võib ergutusmähist vaadelda tüürmähisena ja ankrumähist väljundmähisena. Et sellistes generaatorites $P_e = (0{,}01 \ldots 0{,}02) P_N$, siis $k_v = 50 \ldots 100$. Madala võimendusteguri tõttu kasutatakse niisuguseid võimendeid harva. Muide, ka võimsate alalis- ja vahelduvvoolumasinate elektrimasinerguteid võib kvalitatiivselt vaadelda *EMV*-dena.

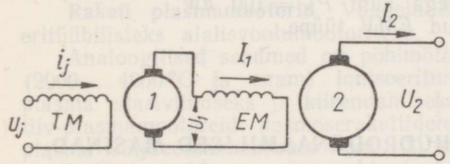
Kahemasinalised EMV-d. Eespool vaadeldud lihtsaimas *EMV*-s on ainult üks võimsuse võimendusaste — ergutusmähisest (tüürmähisest) ankrumähisesse. Et suurendada *EMV* võimendustegurit k_v, valmistatakse see kahe või rohkema võimendusastmega. Üldine võimendustegur k_v avaldub sel puhul üksikute astmete võimendustegurite korrutisena. Näiteks kaheastmelistes võimendites

$$k_v = k_{v1} k_{v2}. \tag{11-6}$$

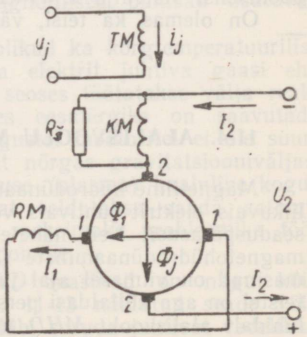
Lihtsaim kaheastmeline võimendi kujutab endast kahe alalisvoolugeneraatori kaskaadlülitust (joon. 11-10). Generaatori *1* ergutusmähis täidab tüürmähise *TM* funktsioone. Sama generaatori ankur toidab generaatori *2* ergutusmähist *EM*. Viimase ankrumähis on väljundahelaks (U_2; I_2), millele on lülitatud tüüritav objekt. Joonisel 11-10 toodud lülitusskeemiga *EMV*-d toodab Lääne-Saksamaa firma Siemens-Schuckert «rapidüüni» nimetuse all. Mõlemad masinad on ühises keres. Seejuures saadav võimendustegur ulatub 10 000-ni.

Harilikult on igal *EMV*-l mitu tüürmähist, mis paigutatakse kõrvuti ühise magnetahela osadele (poolustele). See võimaldab masinat tüürida mitme, üksteisest sõltumatu suurusega (näiteks valtspingi ajammootorit ankruvoolust ja pöörlemiskiirusest sõltuvalt jne.).

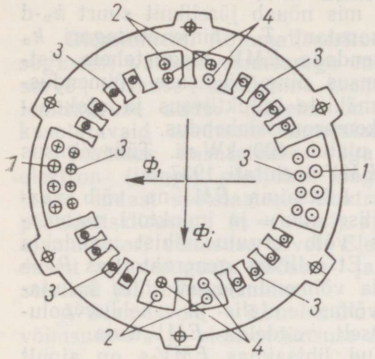
Kaheastmeline ristvälja elektrimasinvõimendi on levinuim *EMV* tüüp. See töötati 1937. a. välja «General Motors'i» tehastes (USA) «amplidüüni» nimetuse all. Sellel *EMV* tüübil on harilikult peitpoolused ja $2p = 2$. NSV Liidus toodetakse neid võimendeid seeriaviisiliselt.



Joon. 11-10. Kahemasinalise võimendi skeem



Joon. 11-11. Ristvälja *EMV* skeem



Joon. 11-12. Ristvälja *EMV* staator koos mähistega:

1 — tüürmähised; *2* — ristteljeline eelmagneetimismähis; *3* — kompensatsioonimähis; *4* — lisapooluste mähis

Vaadeldav *EMV* on välja arenenud ristväljageneraatorist (vt. § 11-1) ning on sama töötamispõhimõttega.

Tüürmähised *TM* (joon. 11-11) tekitavad esialgse pikiteljelise voo Φ_T. See voog indutseerib harjadega *1-1* lühistatud ankruahelas elektromotoorjõu, mille tagajärjel tekib vool $I_1 = k_1\Phi_T$. Läbides ankrumähist ja ristteljes asuvat eelmagneetimismähist *RM*, tekitab see vool ristteljelise voo $\Phi_1 = kI_1$. See voog indutseerib harjade *2-2* vahel asuvas väljundahelas elektromotoorjõu, mille tagajärjel tekib koormusahelas vool $I_2 = I_v$, ning sama ahela klemmidel pinge $U_2 = U_v$. Tüürvõimsuse vähendamiseks ja võimendusteguri k_v suurendamiseks kompenseeritakse voolu I_2 poolt tekitatavat pikiteljelist lahtimagneetimisergutust võimalikult täielikult kompensatsioonimähisega *KM*. Kui kompensatsioonimähis *KM* on liiga tugevatoimeline, tekib endaergutuse oht. *EMV* ergutub peavoolugeneraatorina ja normaalne töö võimendina on rikutud. Harilikult tehakse *KM* teatava varuga (ülekompensatsioon) ja selle reguleerimine (nõrgendamine) toimub rööbiti lülitatud šunteeriva takistiga $R_š$ (vt. joon. 11-11).

Joon. 11-12 on näidatud *EMV* staatorileht koos mähiste paiknemisega. Et kompensatsioonimähise väli ühtiks ankrureaktsiooniväljaga mitte ainult suuruselt, vaid ka kujult, tehakse see jaotatud mähisena. Ankrumähis on harilikult veidi lühendatud sammuga. Ristteljelise eelmagneetimismähise kasutamine võimaldab vähendada voolu I_1 ja parandada sellega harjade *1-1* kommutatsiooni (vt. joon. 11-11). Seetõttu lisapooluseid tavaliselt ristteljele ei panda. Harjade *2-2* kommutatsiooni parandatakse lisapooluste abil (vt. joon. 11-12).

Hüstereesi mõju vähendamiseks paigutatakse staatori südamiku ikke ümber vahelduvvooluga toidetav demagneetimismähis. Selle mähise poolt tekitatav voog kulgeb piki staatori südamikku ega tungi ankrusse. Niisuguse demagneetumise tõttu terase hüstereesisilmus aheneb. Joonisel 11-12 ei ole seda mähist näidatud.

Kaheastmelist ristvälja *EMV* ehitatakse võimsustele kuni 20 kW ja võimendusteguriga kuni $k_v = 10\,000$. On ehitatud ka tugeva ristväljaga mitmepooluselisi ristvälja *EMV*-eid võimsusega kuni $P_N = 100$ *kW*.

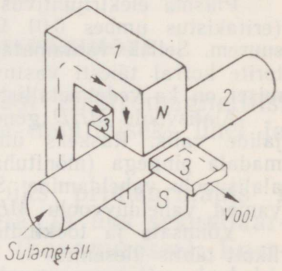
On olemas ka teisi, vähem levinud *EMV* tüüpe.

11-4. ALALISVOOLU MAGNETOHÜDRODÜNAAMILISED MASINAD

Magnetiline hüdrodünaamika (*MHD*) on teadusharu, mis uurib magnetväljas liikuvais elektrit juhtivais vedelikes ja gaasides esinevate füüsikaliste nähtuste seaduspärasusi. Neil nähetel baseerub mitmesuguste alalis- ja vahelduvvoolu magnetohüdrodünaamiliste (*MHD*) masinate töötamispõhimõte. Mõningad *MHD* masinad on viimasel ajal juba mitmetes tehnikaharudes praktikasse juurutatud, teistel on aga küllaldasi perspektiive tulevikus kasutamiseks. Allpool vaadeldakse lühidalt alalisvoolu *MHD* masinate töötamispõhimõtet.

Elektromagnetilised pumbad sulametallide jaoks. Alalisvoolupumbas (joon. 11-13) paigutatakse sulametalli kanal *2* elektromagneti *1* pooluste vahele ja elektroodide *3* kaudu, mis on keevitatud kanali seinte külge, juhitakse sulametalli välisest vooluallikast vool. Et antud juhtumil juhitakse vool sulametalli konduktiivselt, nimetatakse selliseid pumpi ka konduktsioonpumpadeks.

Pooluste välja ja sulametallis voolava voolu koosmõjul tekivad metalliosakestele mõjuvad elektromagnetilised jõud, mis panevad sulametalli liikuma. Voolud sulametallis moonutavad pooluste välja (ankrureaktsioon), mis vähendab pumba efektiivsust. Selle vältimiseks paigutatakse võimsate pumpade poolusekingade ja kanali vahele viimase vooluahelaga järjestikku lülitatud latid («kompensatsioonimähis»), mille vool on kanalivooluga vastassuunaline. Elektromagneti mähis lülitatakse tavaliselt ka elektroodidega järjestikku (ei ole joonisel 11-13 näidatud) ja koosneb sel juhul ainult 1...2 keerust.



Joon. 11-13. Alalisvoolu-elektromagnetilise pumba ehituspõhimõte

Konduktsioonpumpi saab kasutada ainult väheagressiivsete sulametallide korral ja sellistel temperatuuridel, et kanalit saaks valmistada kuumuskindlaist metallidest (mittemagnetiline roostevaba teras jne.). Vastasel juhul on sobivamad vahelduvvoolu-induktsioonpumbad (vt. 2. köide, § 11-5).

Konduktsioonpumpi hakati kasutama 1950. a. paiku uurimisotstarbel ja aatomireaktoreis, kus soojusvahendina kasutatakse sulametalle — naatriumi, kaaliumi ning nende sulameid, vismutit jne. Sulametalli temperatuur on neil juhtumeil tavaliselt 200...600 °C piirides, kuid mõningail juhtumeil isegi kuni 800 °C. Ühe, naatriumi jaoks valmistatud pumba tehnilised andmed on järgmised: temperatuur 800 °C, rõhk $3{,}83 \cdot 10^5$ N/m², tootlikkus 1,02 m³/s., hüdrauliline kasulik võimsus 390 kW, tarbitav vool 250 000 A, pinge 2,5 V, tarbitav võimsus 625 kW ja kasutegur 62,5%. Selle pumba teised, iseloomulikud andmed: kanali ristlõige $53 \times 15{,}2$ cm², voolamiskiirus kanalis 12,4 m/s., kanali aktiivosa pikkus 76 cm.

Elektromagnetiliste pumpade eelis on selles, et neil pole liikuvaid osi ja metallitrakti saab hermetiseerida.

Alalisvoolupumbad nõuavad suure voolu ja madala pingega toiteallikaid. Võimsate pumpade korral osutuvad alaldusseadmed selleks otstarbeks ebasobivaiks, sest need oleksid väga suured ja madala kasuteguriga. Sobivamad on sel juhtumil unipolaargeneraatorid (vt. § 11-1).

Raketi plasmamootorid. Vaadeldud elektromagnetilised pumbad osutuvad eritüübilisteks alalisvoolumootoriteks.

Analoogilised seadmed on põhimõtteliselt kõlblikud ka kõrgtemperatuurilise (2000...4000 °C ja enam) ioniseeritud ja seega elektrit juhtiva gaasi ehk plasma edasiviimiseks ja kiirendamiseks. Sellega seoses töötatakse välja reaktiiv-plasmamootoreid kosmoserakettidele, kusjuures eesmärgiks on saavutada plasma väljavoolamiskiirust kuni 100 km/s. Niisugustel mootoritel ei ole suurt veojõudu ja neid on seega sobiv kasutada ainult nõrgas gravitatsiooniväljas, kaugel planeetidest. Neil on aga see eelis, et kütuse (plasma) kaaluline kogus on väike. Nende toiteks vajalikku elektrienergiat eeldatakse saada aatomireaktoritest. Alalisvoolu-plasmamootori korral on raskeimaks probleemiks töökindlate, voolu plasmasse juhtivate elektroodide loomine.

Magnetohüdrodünaamilised generaatorid. *MHD* masinad on nagu kõik teisedki elektrimasinad pööratavad. Näiteks joon. 11-13 näidatud seade võib töötada samuti ka generaatorirežiimis, kui sellest läbi suruda juhtivat vedelikku

või gaasi. Seejuures on otstarbekas kasutada sõltumatut ergutust. Genereeritud vool juhitakse elektroodide abil välja.

Sellel põhimõttel ehitatakse vee, leeliste ja hapete lahuste, sulametallide jne. kulumõõtureid. Elektroodidel mõõdetav elektromotoorjõud on seejuures vedeliku liikumiskiirusega või kuluga võrdeline.

Suurimat huvi pakuvad *MHD* generaatorid aga soojusenergiat vahetult elektrienergiaks muutvate võimsate elektrigeneraatoritena. Selleks on vaja joon. 11-13 kujutatud seadmest läbi juhtida juhtivat plasmat kiirusega umbes 1000 m/s. Niisugust plasmat võib saada kas hariliku kütuse põletamisel või siis gaasi kuumutamisel aatomireaktoris. Plasma juhtivuse suurendamiseks võib sellesse juhtida kergesti ioniseeritavaid leelismetallide lisandeid.

Plasma elektrijuhtivus temperatuuridel 2000...4000 °C on suhteliselt väike (eritakistus umbes 0,01 Ωm), s. t. umbes 500 000 korda vase eritakistusest suurem. Sellele vaatamata saadakse võimsate (suurusjärgus 10^6 kW) generaatorite korral täiesti vastuvõetavad tehnilis-majanduslikud näitajad. Väljatöötamisel on ka vedelmetallist töökehaga *MHD* generaatorid.

Alalisvoolu *MHD* generaatorite loomisel tekitab raskusi elektroodide materjalide valik. Raskeks ülesandeks on samuti ka tööstusseadmeis suhteliselt madala pingega (mõnikuhat volti) ja suure vooluga (sajad tuhanded amprid) alalisvoolu vaheldamine. Seetõttu on ka sellest seisukohast lähtudes eelistatavamad vahelduvvoolu *MHD* generaatorid (vt. 2. köide, § 11-5).

Võimsate ja töökindlate *MHD* generaatorite loomine on rahvamajanduslikult tähtis ülesanne.

TRAFOD

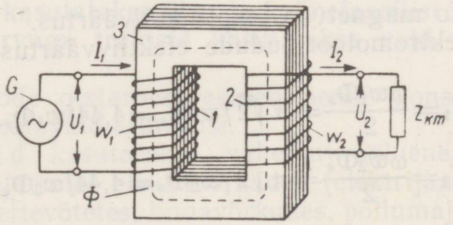
Kaheteistkümnes peatükk

ÜLDANDMEID TRAFODEST

12-1. TRAFODE TÜÜBID JA TÖÖTAMISPÕHIMÕTE

Töötamispõhimõte. Trafo kujutab endast elektromagnetilist aparaati, mis on ette nähtud vahelduvpinge muutmiseks ühel ja samal sagedusel.

Lihtsamal juhtumil on trafol ainult üks primaarmähis *1* (joon. 12-1), millesse juhitakse elektrienergia, ja üks sekundaarmähis *2*, millest energia juhitakse tarbijasse (koormusesse). Energia kantakse üle ühest mähisest teise elektromagnetilise induktsiooni teel. Mähistevahelise elektromagnetilise sidestuse tugevdamiseks paigutatakse need tavaliselt suletud ferromagnetilisele südamikule *3*. Sagedustel $f < 150$ Hz valmistatakse südamik 0,35 . . . 0,50 mm paksustest elektrotehnilise terase lehtedest. Suuremate sagedustel kasutatakse veelgi õhemat lehtterast. Sagedustel 100 000 Hz ja enam muutub hüstereesi- ja pöörisvoolukadu sellistes südamikes juba lubamatult suureks, mistõttu neil juhtumitel trafos ferromagnetilist südamikku enam ei kasutata (nn. õhktrafod). Arvutusmasinates, raadiotehnika- ja teistes seadmetes kasutatavad väikese võimsusega trafod varustatakse ferriitsüda-



Joon. 12-1. Trafo põhimõtteline ehitus:
G — vahelduvvoolugeneraator; Z_{km} — koormustakisti

mikega, mis kujutavad endast erilisi väikese magnetilise kaoga (teraseskaoga) magnetdielektrikuid.

Trafo primaarmähise lülitamisel siinuspingega U_1 võrku tekib mähises vool I_1, mis omakorda tekitab piki südamikku kulgeva siinuseliselt muutuva magnetvoo Φ. Voog Φ indutseerib nii primaar- kui ka sekundaarmähises elektromotoorjõu. Kui lülitada sekundaarmähisele koormus, tekib selles mähises sekundaarvool I_2 ja klemmidel pinge U_2. Resulteeriva magnetvoo südamikus Φ_s tekitavad mõlema mähise voolud.

Elektrilised seosed ideaalses trafos. Ideaalseks nimetatakse niisugust trafot, kus: 1) puudub aktiivenergia kadu (mähiste aktiivtakistus ja teraseskadu võrdub nulliga); 2) terassüdamiku magnetiline läbitavus $\mu_{te} = \infty$ ning lehtede vahel ei ole õhupilusid ega ühenduskohti; 3) kõik magnetvälja jõujooned kulgevad ainult piki terassüdamikku ja ahelduvad kõikide primaarmähise keerdudega (w_1) ning sekundaarmähise keerdudega (w_2). Tuleb märkida, et viimase eelduse korral loeme primaar- ja sekundaarmähise vahelise elektromagnetilise sidestuse täielikuks ja trafomähiste elektromagnetiline sidestustegur

$$c = \frac{M}{\sqrt{L_{11}L_{22}}} = 1, \qquad (12\text{-}1)$$

kus L_{11} ja L_{22} on omainduktiivsused ja M — mähiste vastastikune induktiivsus.

Primaar- ja sekundaarmähiste elektromotoorjõud avalduvad siinuseliste vahelduvvoolude korral järgmiselt:

$$e_1 = -\frac{d\Psi_1}{dt} = -w_1 \frac{d}{dt}(\Phi_s \sin \omega t) = -\omega w_1 \Phi_s \cos \omega$$

$$e_2 = -\frac{d\Psi_2}{dt} = -w_2 \frac{d}{dt}(\Phi_s \sin \omega t) = -\omega w_2 \Phi_s \cos \omega$$

kus Φ_s on trafo magnetvoo amplituudiväärtus.

Samade elektromotoorjõudude efektiivväärtus

$$\left.\begin{aligned} E_1 &= \frac{\omega w_1 \Phi_s}{2} = \pi \sqrt{2}\, f w_1 \Phi_s = 4{,}44 f w_1 \Phi_s, \\ E_2 &= \frac{\omega w_2 \Phi_s}{2} = \pi \sqrt{2}\, f w_2 \Phi_s = 4{,}44 f w_2 \Phi_s. \end{aligned}\right\}$$

Et ideaalses trafos pingelangu ei esine, siis

$$U_1 = E_1; \quad U_2 = E_2.$$

Võrrandite (12-3) ja (12-4) alusel saame:

$$\frac{U_1}{U_2}=\frac{E_1}{E_2}=\frac{w_1}{w_2} \tag{12-5}$$

või

$$\frac{U_1}{U_2}=k; \quad U_2=\frac{U_1}{k}, \tag{12-6}$$

kus

$$k=\frac{w_1}{w_2} \tag{12-7}$$

nimetatakse trafo ülekandesuhteks.

Et ideaalses trafos aktiiv- ja reaktiivenergia kadu puudub, siis

$$U_1 I_1 = U_2 I_2,$$

millest

$$\frac{I_2}{I_1}=\frac{U_1}{U_2}=\frac{w_1}{w_2} \tag{12-8}$$

või

$$\frac{I_2}{I_1}=k; \quad I_2=kI_1. \tag{12-9}$$

Seega on siis ideaalse trafo primaar- ja sekundaarpinged võrdelised, voolud aga pöördvõrdelised vastavate mähiste keerdude arvuga. Reaalses trafos need seosed mõnevõrra muutuvad, kuid võimsates ferromagnetilise südamikuga trafodes on need kõrvalekalded nimikoormusele lähedastel koormustel suhteliselt väikesed.

Trafode tüübid. Ühe primaar- ja ühe sekundaarmähisega trafosid nimetatakse kahe mähisega trafodeks. Paljudel juhtudel kasutatakse ühe primaar- ja mitme sekundaarmähisega trafosid. Selliseid nimetatakse mitme mähisega trafodeks. Allpool vaadeldakse esmalt just kahe mähisega trafosid.

Kõige rohkem kasutatakse ühe- ja kolmefaasilisi trafosid, teistsuguse faaside arvuga trafosid kasutatakse vaid spetsiaalseadmeis.

Sõltuvalt trafode otstarbest esineb nende konstruktsioonides ja tööreŽiimides teatavaid erinevusi.

Jõutrafosid kasutatakse vahelduvvooluenergia muundamiseks energiasüsteemide elektrivõrkudes (elektrijaamades ja alajaamades, tööstusettevõtetes, linnavõrkudes, põllumajanduses jne.). Jõutrafode nimisagedus NSV Liidus on 50 Hz, USA-s ja mõnes teises välisriigis ka 60 Hz. Jõutrafo on levinum ja kõige tähtsam trafotüüp. Peale nende on palju eri tüüpi trafosid, nagu alaldi-, keevitus-, mõõte- jne. trafod.

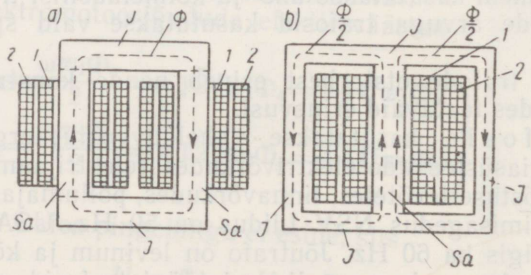
Jõutrafod on kas õli- või kuivtrafod. Õlitrafodes on magnetsüdamik koos mähistega paigutatud trafoõliga täidetud paaki. Õli on samaaegselt nii elektriliseks lisaisolatsiooniks kui ka jahutusagendiks, kahjuks on ta aga tuleohtlik, mistõttu selliste trafode avarii korral võib tekkida tulekahju. Seetõttu tarvitatakse üldkasutatavais hoonetes, elamutes ja real teistel juhtumeil õhkjahutusega, s. o. kuivtrafosid. Trafo nimisildil tuuakse järgmised andmed: 1) niminäivvõimsus S_N (kVA); 2) mähiste nimiliinipinged U_{lN}(V, kV); 3) nimiliinivoolud I_{lN}(A); 4) nimisagedus f(Hz); 5) faaside arv m; 6) mähiste ühendusskeem ja lülitusrühm (vt. § 12-4); 7) lühisepinge u_k (vt. § 14-5); 8) tööreežiim (pidev, lühiajaline); 9) jahutusviis (vt. § 12-5).

Käesolevaks ajaks on ehitatud jõutrafosid võimsusega kuni 400 MVA ja pingega kuni 500 kV.

Teooria põhiküsimused on kõigi trafotüüpide osas ühed ja samad. Järgnevais peatükkides vaadeldavad küsimused trafode konstruktsiooni, teooria ja ekspluatatsiooni kohta puudutavad siiski põhiliselt jõutrafosid. Teiste trafotüüpide erinevusi vaadeldakse lühidalt eripeatükkides.

12-2. TRAFODE MAGNETSÜDAMIKUD

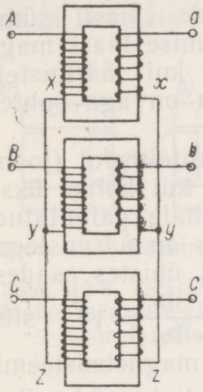
Magnetsüdamike tüübid. Magnetsüdamike konstruktsioonist sõltuvalt jaotatakse trafod sammas- ja manteltrafodeks. Ühefaasilise sammastrafo magnetsüdamik (joon. 12-2, *a*) koosneb kahest sambast *S*, millele paigutatakse mähis, ja kahest ikkest *I*, mille abil saadakse kinnine magnetahel. Kumbki mähis koosneb kahest osast, mis on paigutatud kahele sambale ja ühendatakse omavahel järjestikku või rööbiti. Primaar- ja sekundaarmähise selline



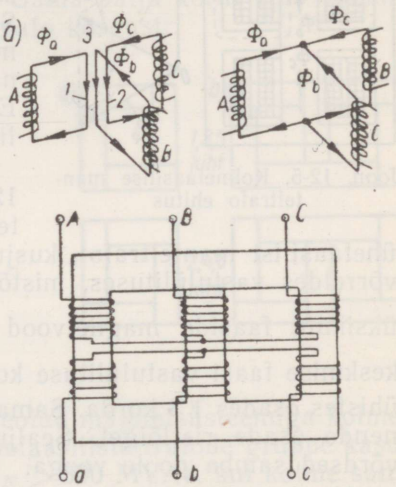
Joon. 12-2. Ühefaasilise sammastrafo (*a*) ja manteltrafo (*b*) ehitus

paigutus lähendab neid teineteisele, suurendades nende elektromagnetilist sidestust [vt. võrrandit (12-1)].

Ühefaasilisel manteltrafol (joon. 12-2, *b*) on üks mähistega sammas ja hargnev ike, mis osaliselt katab mähist (nagu «mantel»).



Joon. 12-3. Kolmefaasiline trafogrupp



Joon. 12-4. Kolmefaasilise sammastrafo moodustamine

Kolmefaasilise voolu transformeerimiseks võib kasutada kolme ühefaasilist trafot (joon. 12-3), mis lülitatakse üksikult kolmefaasilise võrgu eri faasidesse. Sellist seadet nimetatakse kolmefaasiliseks trafogrupiks. Sagedamini kasutatakse siiski kolmefaasilist trafot, mille kõigi faaside magnetsüdamik on ühine. Niisugused trafod on kompaktsemad ja odavamad.

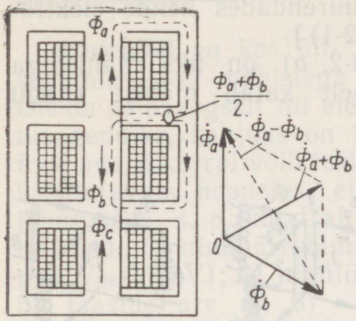
Kolmefaasilise sammastrafo moodustamisidee on toodud joonisel 12-4. Kui kolmefaasiliste siinusvoolude puhul on täidetud tingimus

$$i_a+i_b+i_c=0,$$

siis on joonisel 12-4, *a* kujutatud kolme trafo siinusvoogude jaoks täidetud ka tingimus

$$\Phi_a+\Phi_b+\Phi_c=0.$$

Järelikult, kui ühendada sambad *1*, *2* ja *3* (joon. 12-4, *a*) ühiseks, siis voog selles sambas puudub ja viimase võib eemaldada. Saame kolmefaasilise kolme sambaga trafo, mis on toodud joonisel 12-4, *b*.



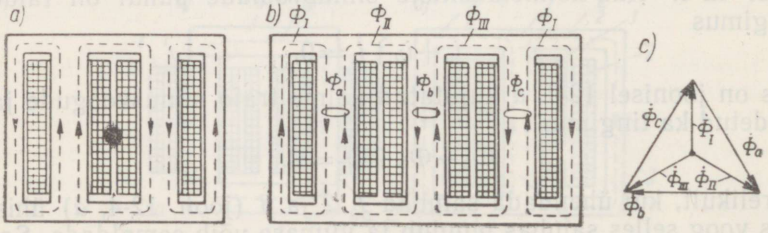
Joon. 12-5. Kolmefaasilise manteltrafo ehitus

Selle trafo konstruktsiooni võib lihtsustada, paigutades kõik kolm sammast ühele tasapinnale (joon. 12-4, *c*). Niisuguse konstruktsiooni esitas M. O. Dolivo-Dobrovolski 1889. a. ja see võeti hiljem üldiselt kasutusele. Selline südamik pole täiesti sümmeetriline, sest keskmise faasi magnetahel on lühem kui äärmistel. Ebasümmeetria mõju on aga suhteliselt tähtsusetu.

Kolmefaasilist manteltrafot (joon. 12-5) võib vaadelda kui kolme üksteise kõrvale või kohale paigutatud ühefaasilist manteltrafot, kusjuures keskmine faas on äärmistega võrreldes vastulülituses, mistõttu magnetsüsteemi ühistes osades üksikute faaside magnetvood liituvad. Et $\frac{\Phi_a - \Phi_b}{\Phi_a + \Phi_b} = \sqrt{3}$, siis keskmise faasi vastulülituse korral väheneb voog magnetsüsteemi ühistes osades $\sqrt{3}$ korda. Samavõrra võib vähendada ka südamiku nende osade ristlõiget. Sealjuures on vood ikke kõigis osades võrdsed ,samba poole vooga.

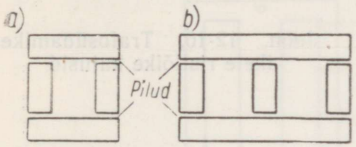
Manteltrafode elektromagnetiline sidestustegur mähiste vahel on sammastrafo omast mõnevõrra suurem ja seega on manteltrafod elektromagnetiliselt täiuslikumad. See eelis ei oma aga erilist tähtsust, ning et manteltrafod on konstruktsioonilt keerukamad, siis NSV Liidus manteltüüpi jõutrafosid ei ehitata.

Koos trafode võimsuse kasvuga kasvavad nende kaal ja gabariitmõõtmed ning neid on raudteel raskem transportida. Seetõttu kasutatakse faasi võimsusel $S_f > (80 \ldots 100) \cdot 10^3$ kVA ja faasipingetel 220...500 kV sammas-mantel- või mitmesambalist konst-

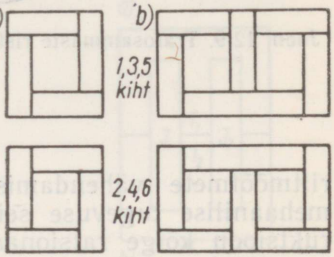


Joon. 12-6. Sammas-manteltrafo ehitus

ruktsiooni. Niisuguse konstruktsiooni saame, kui joonistel 12-2, *a* ja 12-4, *b* toodud trafodele lisada vasakule ja paremale veel üks sammas (joon. 12-6). Seejuures ikete magnetvoog hargneb, vähenedes joon. 12-6, *a* toodud konstruktsiooni puhul kaks korda, joon. 12-6, *b* puhul aga $\sqrt{3}$ korda, võrreldes vastavate konstruktsioonidega joon. 12-2, *a* ja 12-4, *b*. Sama palju kordi võib vähendada ikete ristlõikeid ja seega ka trafo kõrgust.



Joon. 12-7. Põkktrafode skeemid

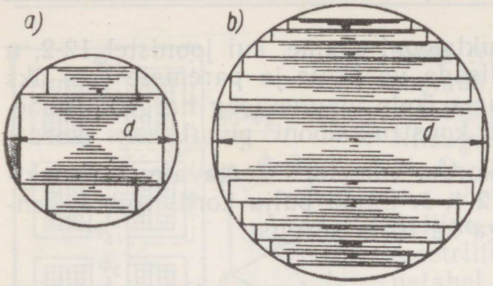


Joon. 12-8. Teraslehtede paigutus vaheliti laotud südamikega ühefaasilistes (*a*) ja kolmefaasilistes (*b*) trafodes

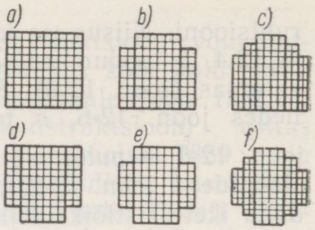
Üldiselt eelistatakse kasutada seotud magnetsüsteemiga kolmefaasilisi trafosid. Kolmefaasilisi ühefaasiliste trafode gruppe kasutatakse suurte võimsuste korral ($S_N > 300$ MVA), kui kolme sambaga trafo transport osutuks väga raskeks või isegi võimatuks, ja mõnikord ka võimsustel $S_N > 30$ MVA, kui ühefaasiliste trafode kasutamine võimaldab vähendada reservvõimsust avarii korral ja remondi otstarbeks.

Südamiku konstruktsioon. Sammaste ja ikete ühendusviisi järgi jaotatakse trafod põkk- (joon. 12-7) ja vaheliti laotud südamikega trafodeks (joon. 12-8). Esimesel juhul koostatakse sambad ja ikked eraldi ning surutakse üksteise vastu survepoltide abil. Pöörisvoolude vähendamiseks pannakse sammaste ja ikete kokkupuutepindade vahele isoleervahekud. Teisel juhul koostatakse sambad ja ikked ühtse konstruktsioonina, kusjuures sammaste ja ikete üksikud kihid on ülekattega. Põkk-konstruktsiooni korral jäävad ikete ja sammaste vahele mittemagnetilised pilud, mis suurendavad ahela magnetilist takistust ja seega ka magneetimisvoolu. Peale selle ei väldi isoleervahekud mitte alati teraslehtede omavahelist kokkupuudet. Praktikas kasutatakse seetõttu põkk-konstruktsiooni harva.

Mantelsüdamike korral on sambad nelinurkse ristlõikega, kuid sammas- ja sammas-mantelsüdamike korral ringjoone sisse joonestatud hulknurgakujulise ristlõikega (joon. 12-9). Viimasel juhul on mähis ringsilindrikujuline ning samba astmelise ristlõike tõttu on mähiseõõne terasetäitetegur kõrgem. Materjalide kulu, gaba-



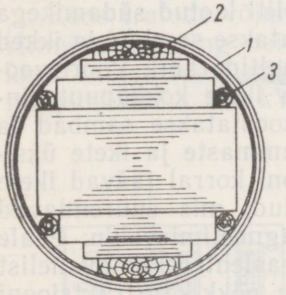
Joon. 12-9. Trafosammaste ristlõike kujusid



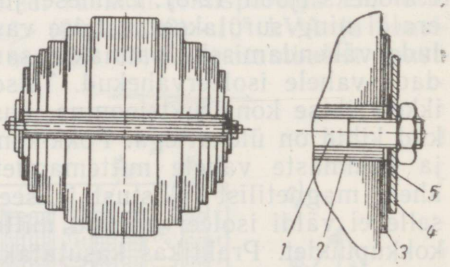
Joon. 12-10. Trafosüdamike ikete ristlõike kujusid

riitmõõtmete vähendamise, trafo valmistamise maksumuse ja mehaanilise tugevuse seisukohast lähtudes on niisugune konstruktsioon kõige ratsionaalsem. Südamiku astmete arv suureneb koos trafo võimsuse suurenemisega. Võimsates trafodes jäetakse südamikku jahutusõli tsirkulatsiooniks pikikanalid (joon. 12-9, *b*).

Ikete valmistamistehnoloogia lihtsustamiseks tehakse need kas nelinurkse ristlõikega või siis väikese astmete arvuga (joon. 12-10). Ikke ristlõikekuju ja ühendusviis sammastega valitakse selline, et südamikus oleks tagatud võimalikult ühtlane magnetvoo jaotus. Ikke ristlõike suurus peab olema niisugune, et induktsioon selles oleks 10 ... 15% väiksem kui sammastes.



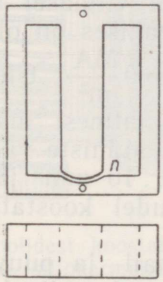
Joon. 12-11. Keskmise võimsusega trafode südamiku sammaste kokkusurumine:
1 — isoleersilinder; *2* — puitliist; *3* — puitvarras



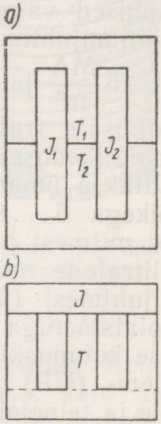
Joon. 12-12. Suure võimsusega trafode südamiku sammaste kokkusurumine:
1 — terasest tikkpolt; *2* — bakeliitlakiga immutatud paberist toru; *3*, *5* — elektrotehnilisest papist seib; *4* — terasseib

Keskmiste (kuni 800 ... 1000 kVA) ja suurte trafode sammaste kokkusurumise moodused on näidatud joonistel 12-11 ja 12-12. Ikked surutakse kokku puit- või teraslattide abil.

Väikese võimsusega (150 ... 200 VA) ühefaasilised trafod valmistatakse mantelsüdamikega. Sealjuures püütakse saavutada konstruktsiooni ja koostamistehnoloogia maksimaalset lihtsust



Joon. 12-13. Väikese võimsusega trafo südamik



Joon. 12-14. Väikese võimsusega trafo südamiku lehtede lõikeplaan (*a*) ja ladumine südamikuks (*b*)

ning minimaalset aktiivterase kadu. Harilikult kasutatakse lehtede stantsimisel joonistel 12-13 ja 12-14 toodud variante. Esimesel juhul stantsitakse leht koos lõhega *n* välja ühe löögiga. Südamiku koostamisel painutatakse keskmine liist ajutiselt välja ja juhitakse mähise pooli. Järgmise lehe keskmine liist juhitakse pooli teisest otsast jne. Teisel juhul stantsitakse välja *Ш*-kujulised lehed T_1 ja T_2 ning ikke lehed I_1 ja I_2 (joon. 12-14, *a*), millest koostatakse südamiku lehtede kaks kihti (joon. 12-14, *b*). Sealjuures paigutatakse lehed mähise pooli samuti vaheldumisi ühest ja teisest otsast.

Jõutrafode südamikud koostatakse 0,35 ja 0,5 mm paksusest elektrotehnilisest lehtterasest (margid Э41, Э42, Э43, Э310, Э320, Э330). Viimaseil aastail laieneb selleks otstarbeks järjest enam külmalt valtsitud lehtterase kasutamine.

Lehed isoleeritakse üksteisest kas 0,03 mm isoleerpaberiga või kaetakse nad mõlemalt poolt isoleer-õlilakiga.

Induktsioon 5 kVA ja suurema võimsusega õlitrafode südamike sammastes kuumalt valtsitud terase korral on 1,2 ... 1,45 T ja külmalt valtsitud terase korral 1,5 ... 1,7 T. Kuivtrafode korral on vastavad suurused 1,0 ... 1,2 T ja 1,1 ... 1,5 T.

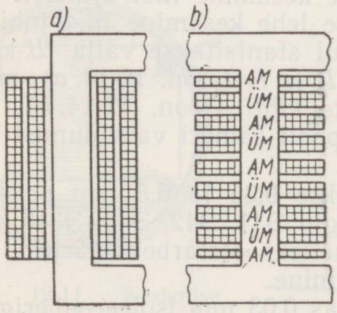
12-3. TRAFOMÄHISED

Trafomähiste konstruktsioon peab kindlustama nende elektrilise ja mehaanilise tugevuse ning temperatuurikindluse. Peale selle peab mähiste valmistamise tehnoloogia olema võimalikult lihtne ja odav ning elektriline kadu mähistes ettenähtud piires. Sõltuvalt mähiste nimivoolust ja nimipingest on nende konstruktsioonid väga mitmekesised.

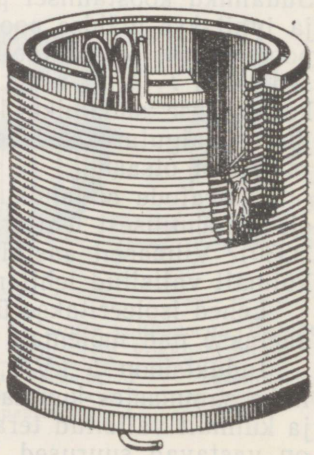
Mähised valmistatakse kas vask- või viimasel ajal tihti ka alumiiniumjuhtmest. Voolutihedus vaskmähises on õlitrafo korral $2{,}0 \ldots 4{,}5 \frac{MA}{m^2}$ ja kuivtrafo korral $1{,}2 \ldots 3{,}0 \frac{MA}{m^2}$. Ülemised piirid on võimsate trafode jaoks. Alumiiniumjuhtmest mähiste korral on voolutihedused 40 ... 45% väiksemad. Mähiste valmistamiseks kasutatakse ümarjuhet ristlõikega 0,02 ... 10 mm² ja profiiljuhet ristlõikega 6 ... 60 mm². Paljudel juhtudel koostatakse mähise poolid mitmest paralleeljuhtmest.

Õlitrafode mähised valmistatakse email- ja puuvillisolatsiooniga juhtmest (ümarjuhe) või kahekordse kaablipaberi- ja puuvillisolatsiooniga juhtmest (profiiljuhe). Kuivtrafo mähistes kasutatakse kuumuskindla klaasvillisolatsiooniga juhet.

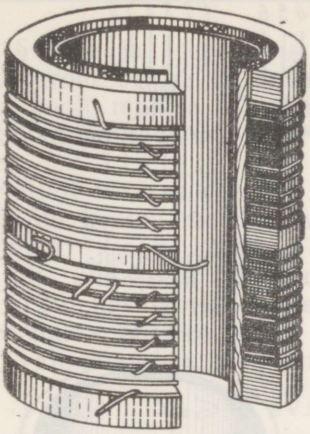
Ülem- (ÜP) ja alampingemähise (AP) paigutusviisilt südamikule ja teineteise suhtes jaotatakse mähised kontsentrilisteks (joon. 12-15, *a*) ja ketasmähisteks (joon. 12-15, *b*). Esimesel juhul asuvad *ÜP* ja *AP* mähised sambal kontsentriliselt, kusjuures alampingemähis on tavaliselt südamikule lähemal, sest südamiku isolatsioon võib sel juhul olla nõrgem. Ketasmähise



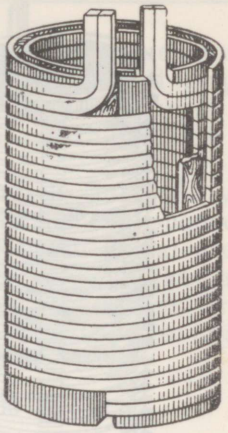
Joon. 12-15. Kontsentriline (*a*) ja ketasmähis (*b*)



Joon. 12-16. Mitmekihiline silindriline sektsioonmähis



Joon. 12-17. Poolidest koostatud mitmekihiline silindermähis



Joon. 12-18. Kahekihiline silindermähis

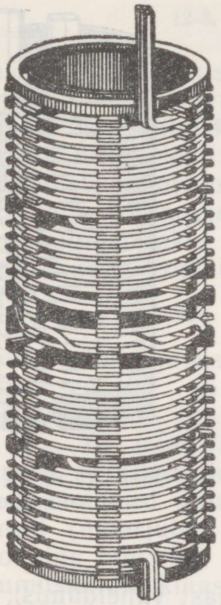
korral on *AP* ja *ÜP* poolid piki sammast vaheldumisi. Ketasmähise korral on elektromagnetiline sidestus parem, kuid mähise valmistamise tehnoloogia on keerulisem ja samuti on poolide üksteisest isoleerimine kõrgete pingete korral raskendatud. Seetõttu kasutatakse enamikus jõutrafodes kontsentrilist mähist, mille mõningaid konstruktsioone allpool lühidalt vaadeldakse.

Mitmekihilised silindrilised sektsioonmähised (joon. 12-16) valmistatakse kas ümar- või profiiljuhtmest, mis keritakse mitmekihilisena piki sammast, kusjuures üksikute kihtide vahele paigutatakse isolatsiooniks kaablipaberit. Paljude kihtide korral mähises tehakse see kahest kontsentrilisest poolist, mille vahele jääb jahutuskanal. Selliseid mähiseid kasutatakse trafodes sambavõimsusega $S_{sa} \leqslant 200$ kVA, vooluga samba mähises $I_{sa} \leqslant 135$ A ja pingega $U_{lN} \leqslant 35$ kV.

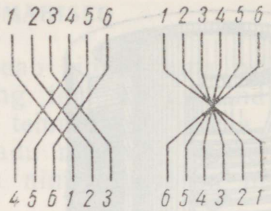
Mitmekihilised poolidest koostatud silindermähised (joon. (12-17) keritakse ümarjuhtmest ning nad koosnevad mitmekihilistest piki sammast paigutatud ketaspoolidest. Poolide vahele (iga pooli või kahe-kolme pooli tagant) jäetakse radiaalsed jahutuskanalid. Niisuguseid mähiseid kasutatakse kõrgepingepoolel $S_{sa} \leqslant$ $\leqslant 335$ kVA, $I_{sa} \leqslant 45$ A ja $U_{lN} \leqslant 35$ kV.

Ühe- ja kahekihilised silindermähised (joon. 12-18) keritakse kas ühe või mitme paralleelse (kuni neli) profiiljuhtmega ja kasutatakse trafode puhul

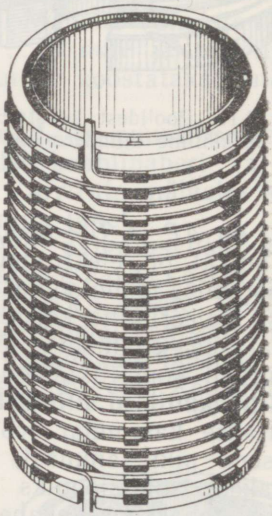
$$S_{sa} \leqslant 200 \text{ kVA}, \quad I_{sa} \leqslant 800 \text{ A} \quad \text{ja} \quad U_{lN} \leqslant 6 \text{ kV}.$$



Joon. 12-19. Kruvimähis



Joon. 12-20. Paralleeljuhtmete osalise transpositsiooni skeemid



Joon. 12-21. Poolidest koostatud katkematu spiraalmähis

Kruvimähised (joon. 12-19) mähitakse mitmest (4 ... ... 20) paralleelsest radiaalsuunas kõrvuti asuvast profiiljuhtmest. Suure arvu paralleeljuhtmete korral võib iga keerd koosneda mitmest aksiaalsuunalisest kihist või keritakse mähis mitmekihilisena, s. t. paralleeljuhtmed jagatakse 2 ... 4 gruppi, kusjuures iga grupp moodustab mähises omaette kruvikäigu.

Kui radiaalsuunas on kõrvuti paigutatud mitu paralleeljuhet, jaotub vool neis ebaühtlaselt, mis omakorda suurendab kadusid. Sel juhul põhjustab voolu ebaühtlast jaotumist asjaolu, et need paralleeljuhtmed ahelduvad erineva suurusega magnetvoogudega, mistõttu neis indutseeritakse ka erineva suurusega elektromotoorjõud. Aheldusvoogude erinevus on aga tingitud puistevoogudest

(vt. § 14-1 ja 14-4), mis kulgevad mähisest hõivatud ruumis. Teisiti võib öelda, et kadude suurenemine on tingitud magnetvälja poolt mähise juhtmetes indutseeritud pöörisvooludest, mis tekitavad pinnaefekti. Selle tagajärjel mähise aktiivtakistus suureneb.

Küllalt ühtlase voolude jaotumise tagamiseks juhtmete vahel tuleb üht keerdu moodustavad juhtmed omavahel transponeerida (põimida) (joon. 12-20). Täieliku transpositsiooni korral asetseb iga juhe ühe keeru vältel radiaalsuunas kõigis võimalikes asendeis. Tihti kasutatakse ka ainult osalist transponeerimist. Transponeeritakse mitmes kohas samba kõrguse ulatuses. Kruvimähistena valmistatakse alampingemähised trafodes, mille

$$S_{sa} \geqslant 45 \text{ kVA} \quad \text{ja} \quad I_{sa} \geqslant 300 \text{ A}.$$

Katkematu spiraalne sektsioonmähis (joon. 12-21) valmistatakse profiiljuhtmest ja koosneb kümnetest õhukestest ketaspoolidest, kusjuures poolid mähitakse spiraalina ja ühendatakse omavahel ilma jooteta. Kui keerd koosneb mitmest paralleeljuhtmest, viimased transponeeritakse. Selliseid mähiseid valmistatakse trafodele, millel

$$S_{sa} \geqslant 60 \text{ kVA}, \quad I_{sa} \geqslant 20 \text{ A}, \quad U_{lN} \geqslant 2 \text{ kV}.$$

Viimased kaks mähisetüüpi on mehaaniliste aksiaaljõudude suhtes kõige vastupidavamad, sest nende kettataolised poolid on radiaalsuunas küllalt laiad.

Elektrotehnilisest papist liimitud või pressitud vahekute ja liistude abil poolide ning mähisekihtide vahel tekitatakse vastavalt radiaalsed või aksiaalsed jahutuskanalid. Väiksema võimsusega ja madalpingetrafodes paigutatakse silindermähis otseselt südamikule ja kinnitatakse seal puitkiilude ja -liistudega, mis täidavad ühtlasi ka isolatsiooni ülesannet. Ülejäänud juhtudel paigutatakse mähis elektrotehnilisest papist pehmele isoleersilindrile või bakeliitlakiga immutatud elektrotehnilisest papist kõvale hülsile.

Sise- ja välismähis toestatakse teineteise suhtes samuti puitliistudega. Mähise ja ikete vahelise isolatsioonina kasutatakse elektrotehnilisest papist rõngaid, seibe ja vahekuid. Kõrgepingetrafodes paigutatakse vajaduse korral mähise ja õlipaagi vahele elektrotehnilisest papist barjäärid.

12-4. TRAFOMÄHISTE SKEEMID JA LÜLITUSRÜHMAD

Trafomähiste alguste ja lõppude tähistamisviisid on toodud tabelis 12-1.

Kolmefaasiliste trafode mähiste ühendusskeemid. Enamikul

Tabel 12-1

Trafomähiste alguste ja lõppude tähised

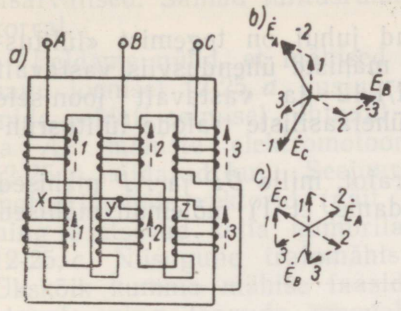
Mähise nimetus	Ühefaasilised trafod	Kolmefaasilised trafod
Ülempingemähis:		
algus	A	A, B, C
lõpp	X	X, Y, Z
Alampingemähis:		
algus	a	a, b, c
lõpp	x	x, y, z
Keskpingemähis:		
algus	A_m	A_m, B_m, C_m
lõpp	X_m	X_m, Y_m, Z_m

Tähtlülituse korral tähistatakse nullpunkt 0, 0_m, o.

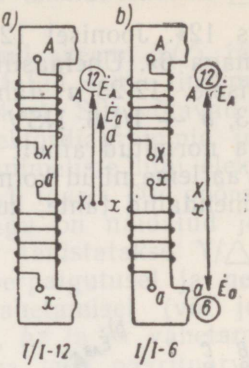
juhtudel ühendatakse kolmefaasiliste trafode mähised kas tähte (Y) või kolmnurka ($\triangle$).

Mähiste ühendusskeemi valik sõltub mitmest tegurist. Näiteks liinipingel 35 kV ja enam on sobiv ühendada mähised tähte ning nullpunkt maandada. Sel juhul pinge trafo väljaviikudel ja ülekandeliinidel on maa suhtes $\sqrt{3}$ korda madalam liinipingest, mistõttu isolatsiooni maksumus väheneb. Madalama tööpingega hõõglampide valgusviljakus on suurem, kuid valgustusvõrke on kasulikum ehitada kõrgematele pingetele. Seetõttu ühendatakse valgustusvõrke toitvate trafode sekundaarmähised tähte ning lambid lülitatakse faasipingele liini- ja nulljuhtme vahele. Mõningal juhul, kui vool mähises ei ole eriti suur, tuleb tähtlülituses trafo odavam, sest keerdude arv mähises väheneb $\sqrt{3}$ korda. Juhtme ristlõige suureneb samuti $\sqrt{3}$ korda, kuid tööjõukulu mähkimisel ning mähise juhtme maksumus vähenevad. Teisest küljest, lähtudes kõrgemate harmooniliste mõjust (vt. § 13-1) ja trafo tööst ebasümmeetrilistel koormustel (vt. § 16-2), on sobiv üks trafo mähistest ühendada kolmnurka.

Mõnel juhul kasutatakse ka mähiste siksaklülitust (joon. 12-22). Sel juhul koosneb iga faasimähis kahest omavahel järjestikku ühendatud erinevatel sammastel asuvast osast. Teine osa mähisest on esimese suhtes vastulülituses (joon. 12-22, *a*), sest elektromotoorjõud on siis $\sqrt{3}$ korda suurem (joon. 12-22, *b*) kui pärilülituses (joon. 12-22, *c*). Siiski on ka vastulülituse korral faasi elektromotoorjõud ($\sqrt{3}E_1$) $2/\sqrt{3} = 1{,}15$ korda väiksem kui mõlema faasimähise poole ühel ja samal sambal asumise korral



Joon. 12-22. Kolmefaasilise mähise siksakühendus



Joon. 12-23. Ühefaasilise trafo lülitusrühmad

($2E_1$). Seetõttu suureneb vase kulu siksaklülituse korral 15%, mistõttu seda lülitusviisi kasutatakse ainult mõnes eriotstarbelises trafos (näit. elavhõbealaldite toitetrafodes).

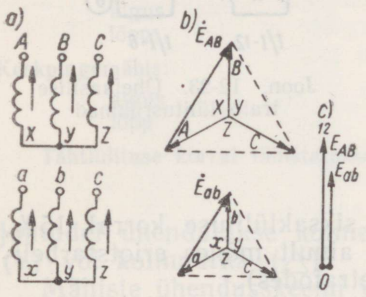
Mähiste lülitusrühmad. Trafo lülitamiseks paralleeltööle on oluline teada selle primaar- ja sekundaarmähiste elektromotoorjõudude vahelisi faasinihkeid. Nende nihete iseloomustamiseks kasutatakse mähiste lülitusrühma mõistet.

Joonisel 12-23 on näidatud ühefaasilise trafo mähised, mähituna vasakukäigulistena, kusjuures mõlema mähise algused *A* ja *a* asuvad ülal ning lõpud *X* ja *x* — all. Loeme elektromotoorjõudu siis positiivseks, kui ta mõjub lõpust alguse poole. Joonisel 12-23, *a* näidatud mähised ahelduvad ühe ja sama vooga. Seetõttu mõjuvad neis mähistes indutseeritud elektromotoorjõud igal hetkel ühes ja samas suunas — lõpust algusse või vastupidi, s. t. nad on samaaegselt kas positiivsed või negatiivsed. Järelikult elektromotoorjõud E_A ja E_a ühtivad faasis, nagu on näidatud joonisel 12-23, *a*. Kui aga ühel mähisel algus ja lõpp omavahel ümber vahetada (joon. 12-23, *b*), siis muutub elektromotoorjõu suund seal vastupidiseks ning faasinihe E_A ja E_a vahel on 180°. Sama tulemuse saame, kui trafo üks mähis, joon. 12-23, *a*, mähkida paremakäigulisena.

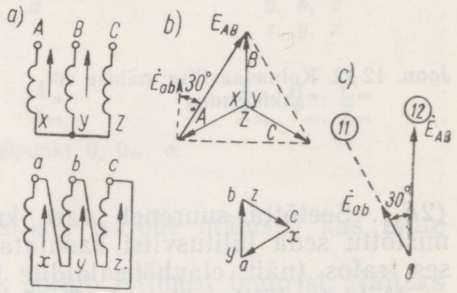
Trafomähiste liinipingete faasinihke määramisel võetakse ülempingemähise liinipinge vektor kella minutiosutiks ja paigutatakse kella numbrilaual 12. kohale. Alampingemähise vastava liinipinge vektor aga võetakse tunniosutiks. Siis joonisel 12-23, *a* toodud juhtumi korral näitab kell 12 (kuna mõlemad osutid on nr-l 12) ja sellist mähiste lülitust nimetatakse «lülitusrüh-

maks 12». Joonisel 12-23, *b* toodud juhul on tegemist «lülitusrühmaga 6». Ühefaasiliste trafode mähiste ühendusviis vastavalt joonisele 12-23, *a* tähistatakse I/I-12 ja vastavalt joonisele 12-23, *b* — I/I-6. NSV Liidus on ühefaasiliste trafode lülitusrühmana normitud ainult I/I-12.

Vaatleme nüüd kolmefaasilist trafot, mille *ÜP* ja *AP* mähised on ühendatud tähte, kusjuures eeldame, et 1) mõlemad mähised



Joon. 12-24. Kolmefaasilise trafo Y/Y-12 ühendusskeem ja lülitusrühm



Joon. 12-25. Kolmefaasilise trafo Y/Δ-11 ühendusskeem ja lülitusrühm

on keritud samasuunaliselt (näiteks paremakäigulised); 2) mähiste algused ja lõpud on paigutatud ühtemoodi (näiteks lõpud all ja algused üleval) ja 3) ühenimelised (näit. *A* ja *a*, *B* ja *b* ning *C* ja *c*) asuvad samadel sammastel (joon. 12-24, *a*). Siis faaside elektromotoorjõudude täht ja liini elektromotoorjõudude kolmnurk võtavad sellise kuju, nagu on toodud joonisel 12-24, *b*. Sealjuures samanimelised liini elektromotoorjõudude vektorid (näit. E_{AB} ja E_{ab}) on samasuunalised, s. t. faasis ühtivad ja kella numbrilauale paigutatult näitaksid kl. 12 (joon. 12-24, *c*). Järelikult tähistatakse selline ühendusskeem ja lülitusrühm Y/Y-12.

Kui joonisel 12-24, *a* alampingemähiste otste tähised ümber vahetada (faas *a* keskmisele, faas *b* parempoolsele ja faas *c* vasakpoolsele sambale), siis vektordiagrammil (joon. 12-24, *b*) nihkuvad tähed *a*, *b* ja *c* samuti kellaosuti liikumise suunas 120°. Sel juhul saadakse lülitusrühm *4*, kuid paigutades tähised ümber vastu kellaosuti liikumise suunda, saame lülitusrühma *8*. Vahetades omavahel ümber mähiste algused ja lõpud, saab veel lülitusrühmad *6*, *10* ja *2*. Tähendab, Y/Y ühendusskeemi korral on võimalik saada kuus lülitusrühma, kusjuures need kõik on paa-

risarvulised. Samad lülitusrühmad saab ka ühendusskeemi △/△ korral.

Eeldame nüüd, et mähised on ühendatud skeemi Y/△ järgi, nagu joonisel 12-25, *a*, kusjuures on arvestatud samu tingimusi, mida eeldati eelmisel juhtumil (joon. 12-24, *a*). Siis võtavad *ÜP* ja *AP* mähiste elektromotoorjõudude vektordiagrammid joon. 12-25, *b* näidatud kuju. Seejuures on samanimeliste liini elektromotoorjõudude vektorid (näit. E_{AB} ja E_{ab}) faasis 30° pööratud ning asetsevad kella numbrilaual nii, nagu on näidatud joon. 12-25, *c*. Niisugune trafomähiste ühendus tähistatakse Y/△-11. Ükskõik kumma mähise faaside ring-ümberpaigutusel ja nende alguste ning lõppude omavahel ümbervahetamisel (või joon. 12-25, *a* kolmnurkühenduses ühenduste *ay*, *bz* ja *cx* vahetamisel vastavalt *az*, *bx* ja *cy*-ga) võib saada ka teisi paarituarvulisi lülitusrühmi *1*, *3*, *5*, *7* ja *9*.

Trafode ühendusskeemide ja lülitusrühmade suur mitmekesisus ei ole ekspluatatsioonis soovitav. Seetõttu näeb ГОСТ 401-41 ette jõutrafode valmistamist ainult järgmistes mähiste ühendustes: Y/Y_0-12; Y/△-11 ja Y_0/△-11. Siin on esimesena näidatud *ÜP* mähise ja teisena *AP* mähise lülitus. Indeks 0 näitab, et vastava mähise nullpunkt (neutraal) on välja toodud. Eespool toodud ühendusskeemide kasutuspiirkonnad on toodud tabelis 12-2.

Tabel 12-2

Kolmefaasiliste trafode mitmesuguste lülitusrühmade kasutuspiirkonnad

Tähis	Mähiste pinged		Trafode võimsus kVA
	ÜP, kV	*AP*, V	
Y/Y_0-12	kuni 35 kV (kaasa arvatud)	230 400	kuni 560 (kaasa arvatud) kuni 8100 (kaasa arvatud)
Y/Δ-11	kuni 35 (kaasa arvatud)	525 üle 525	kuni 1800 (kaasa arvatud) „ 5600 „
Y_0/Δ-11	110 ja rohkem	3150 ja rohkem	3200 ja rohkem
Y_0/Δ-11	6,3 ja rohkem	3300 ja rohkem	7500 ja rohkem

12-5. ÕLITRAFODE KONSTRUKTSIOONIELEMENDID JA JAHUTUS

Õlitrafo paagi konstruktsioon sõltub trafo võimsusest. Trafod võimsusega kuni $S_N = 20$ kVA on varustatud sileda õlipaagiga, milles on loomulik õli konvektsioon — südamiku ja mähistega kokkupuutuv õli soojeneb ja tõuseb ülespoole, selle asemele valgub aga paagi seinte vastas jahtunud õli. Paagi seinad annavad soojuse ära ümbritsevale keskkonnale osaliselt soojuskiirguse, osaliselt aga õhu konvektsiooni teel. Õli ülemiste kihtide lubatud maksimaalne temperatuur on 95 °C.

Kui trafo nimivõimsus $S_N > 20$ kVA, siis paagi sileda pinna suurusest ei jätku soojuse küllalt intensiivseks ärajuhtimiseks. Trafodele võimsusega $S_N = 20 \ldots 1800$ kVA keevitatakse paagi külge jahutustorud (joon. 12-26), milles õli liigub ülevalt alla loomuliku konvektsiooni tõttu. Torustikuga paakide asemel kasutatakse mõnel maal ka lainelisi (ribilisi) paake, kuid viimased on nõrgemad ning nõuavad valmistamisel suuremat tööjõukulu.

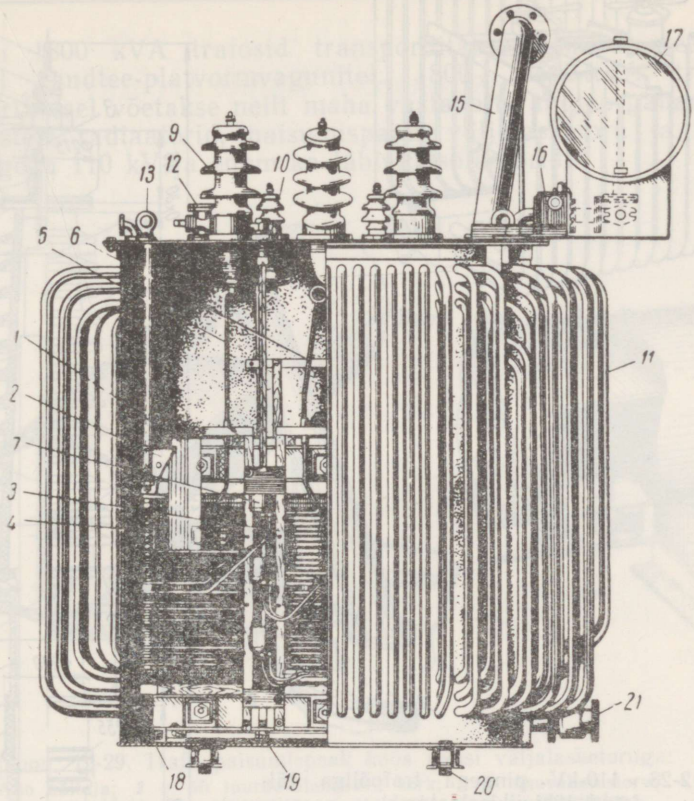
Trafodel võimsusega üle 1800 kVA kasutatakse siledaid paake, mille külge on kinnitatud torudest jahutusradiaatorid (joon. 12-27). Viimased on ühendatud paagi sisemusega selle ülemises ja alumises osas. Õli tsirkuleerib radiaatoreis samuti loomuliku konvektsiooni tulemusena. Kui $S_N = 10\,000 \ldots 60\,000$ kVA, siis ventileeritakse radiaatoreid soojuse intensiivsemaks eemaldamiseks. Soojussiire ümbritsevasse keskkonda kiireneb seejuures 50 ... ... 60 %.

Veelgi intensiivsemaks osutub vesijahutus. Sel juhul pumbatakse õli paagi ülemisest osast läbi vesijahuti (soojusvahendi) paagi alumisse ossa. Mõnikord paigutatakse vesijahuti trafo õlipaaki. Vesijahutust kasutatakse väga suure võimsusega trafodes.

Trafo õlipaagi kaanele on monteeritud läbiviikisolaatorid (joon. 12-26 ja 12-28), mida läbib vasklatt või -toru trafo ühendamiseks välisvõrku.

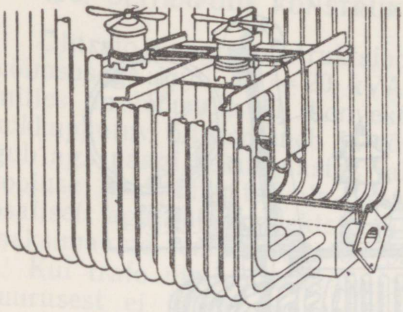
Trafod võimsusega üle 75 kVA varustatakse silindrikujulise õlipaisumispaagiga (joon. 12-26 ja 12-29), mis on valmistatud terasplekist ja ühendatakse toru abil õlipaagiga. Ümbritseva keskkonna temperatuuri muutustest ja trafo koormusest sõltumata peab õli nivoo alati jääma paisumispaagi piiridesse. Seetõttu väheneb avatud õlipinna suurus, mistõttu väheneb ka õli hapendumine. Trafo avarii korral tekib õli kiire lagunemine ja eraldub suurel hulgal gaasi, mis võib õlipaaki vigastada. Selle vältimiseks on õlipaagi kaanele monteeritud väljalasketoru (joon. 12-26 ja 12-29). Toru suletakse klaasmembraaniga, mis gaasisurve suurenemisel paagis puruneb.

Trafodele võimsusega üle 560 kVA monteeritakse paisumis- ja õlipaagi vahele gaasirelee (joon. 12-29). Kui mingi lokaalse üle-

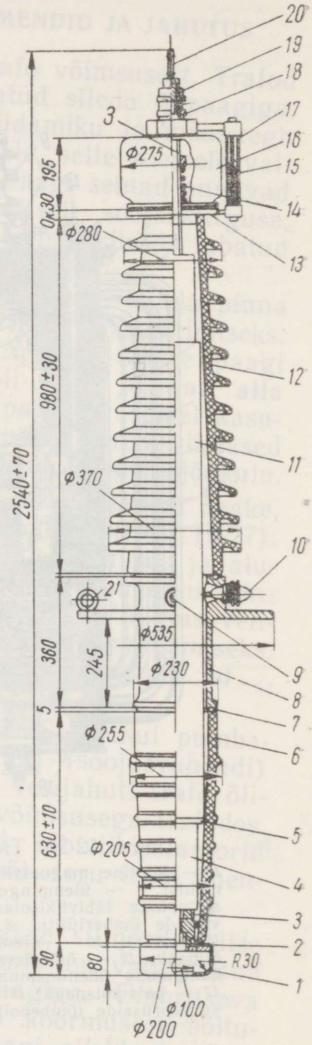


Joon. 12-26. Trafo koos jahutustorudega õlipaagiga:
1 — kihiline magnetsüdamik; *2* — ikke survеprussid; *3* — alampingemähis; *4* — ülempingemähis; *5* — ülempinge läbiviikisolaatorid; *6* — alampinge läbiviikisolaatorid; *7* — ülempingemähise reguleerimisväljaviikude ümberlüliti; *8* — ümberlüliti ajam; *9* — ülempinge sisend (isolaator); *10* — alampinge sisend (isolaator); *11* — jahutustorudega õlipaak; *12* — õli sissevalamisava; *13* — trafo tõsterõngas, *14* — vaakumpumba ühendusmuhv; *15* — gaasi väljalasketoru, *16* — gaasirelee; *17* — paisumispaak; *18* — paagi põhja tuginurgik; *19* — vertikaalne ikke survеprusside tõmbepolt; *20* — transportratas; *21* — õli väljalaskekraan

kuumenemise tõttu (näit. südamiku lehtede lühis, halvad kontaktid jm.) algab isolatsiooni või õli lagunemine, hakkavad gaasirelee kaane alla kogunema gaasid, surudes sealt õli välja. Seetõttu langeb gaasirelee ujuk allapoole ja ühendab signaalkontaktid. Gaaside tormilise eraldumise korral sulgub ka gaasirelee teine kontaktpaar, mis sulgeb trafo võrgust väljalülitamise ahela.



Joon. 12-27. Torujahuti koos ventilaatoriga

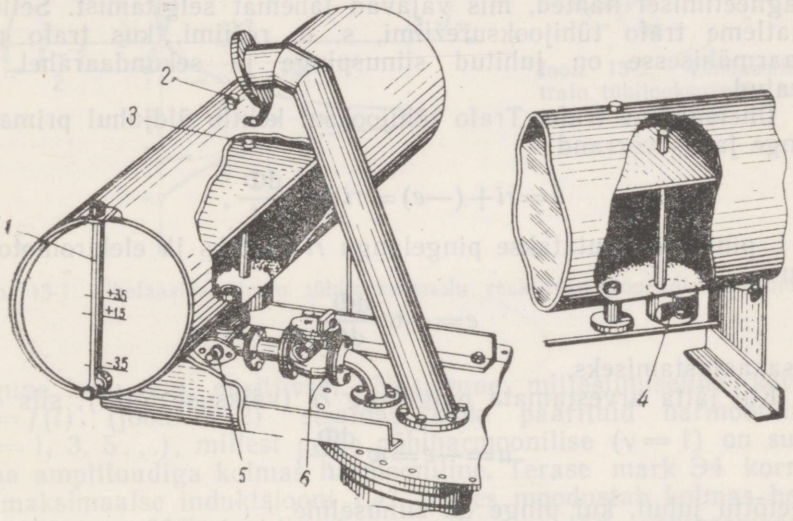


Joon. 12-28. 110-kV pingega trafoõliga täidetud läbiviikisolaator:

1 — alumiiniumekraan; *2* — malmäärik; *3* — voolu juhtiv vasktoru; *4* — isoleeriv bakeliidist tugisilinder; *5* — getinaksseib; *6* — alumine portselankate; *7* — tihendusseib; *8* — malmist ühendusmuhv; *9* — õliproovi võtmise seade; *10* — klemmisolaator läbiviikisolaatori isolatsiooni kaonurga tangensi mõõtmiseks; *11* — õliga immutatud paberist isoleersüdamik; *12* — ülemine portselankate; *13* — paisumispaagi alus; *14* — vedru; *15* — ujuk; *16* — õlilukuga paisumispaak; *17* — klaasist õlinivoo näitaja; *18* — tihenduspuks; *19* — messingotsik kaabli jaoks; *20* — kontaktklemm; *21* — läbiviikisolaatori tõsterõngas (4 tükki)

Trafo tööprotsessis õli hapendub, niiskub ja saastub, mistõttu selle isoleerimisvõime väheneb. Seetõttu kontrollitakse pidevalt õli ning kuivatatakse, puhastatakse ja regenereeritakse seda või asendatakse uuega. Vajaduse korral kuivatatakse trafosüdamikku koos mähistega vaakumis. Selleks otstarbeks on trafo varustatud õlikraani ja muu aparatuuriga.

Kuni 1800 kVA trafosid transporditakse kokkumonteeritult harilikel raudtee-platvormvagunitel. 1800...5600-kVA trafode transportimisel võetakse neilt maha vastavalt raudtee gabariitide nõudmistele radiaatorid, paisumispaak, väljalasketoru ja trafodel pingega 110 kV ja enam ka läbiviikisolaatorid.



Joon. 12-29. Trafo paisumispaak koos gaasi väljalasketoruga:
1 — õlinivoo näitaja; *2* — õli juurdevalamisava kork; *3* — õhuvahetustoru; *4* — sette eemaldaja; *5* — paisumispaagi eralduskraan; *6* — gaasirelee

Trafosid võimsusega 5600 kVA ja enam ning kaaluga üle 50...60 t transporditakse spetsiaalseil madalail raudteeplatvormidel. Sealjuures ei võeta suuremate võimsustega trafode puhul maha mitte ainult trafo väljaulatuvad osad, vaid kasutatakse ka lahtivõetavaid paake ajutise madala transpordikaanega või isegi ajutisi minimaalsete mõõtmetega transpordipaake.

Suure võimsusega trafode (200...300 MVA) mass on umbes 1 kg 1 kVA võimsuse kohta.

Kolmeteistkümnes peatükk

TRAFOSÜDAMIKE MAGNEETIMINE

13-1. TRAFOSÜDAMIKE MAGNEETIMISEL ESINEVAID NÄHTEID

Magnetahela küllastusest tingituna esinevad trafosüdamiku magneetimisel nähted, mis vajavad lähemat selgitamist. Selleks vaatleme trafo tühijooksurežiimi, s. o. režiimi, kus trafo primaarmähisesse on juhitud siinuspinge ja sekundaarahel on avatud.

Ühefaasiline trafo. Trafo tühijooksul kehtib üldjuhul primaarpinge jaoks võrrand

$$u = ri + (-e) = ri + w\frac{d\Phi}{dt},$$

s. t. pinge u kulutatakse pingelangu ri katteks ja elektromotoorjõu

$$e = -w\frac{d\Phi}{dt}$$

tasakaalustamiseks.

Kui jätta arvestamata pingelang ri (väiksuse tõttu), siis

$$u = -e = w\frac{d\Phi}{dt}.$$

Seetõttu juhul, kui pinge on siinuseline

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

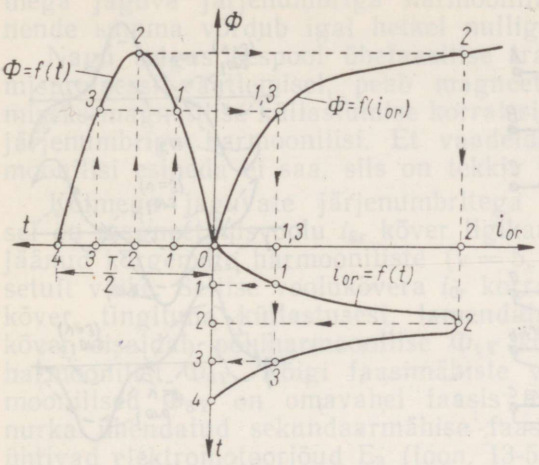
peab voog Φ samuti muutuma siinusfunktsiooni kohaselt

$$\Phi = \Phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

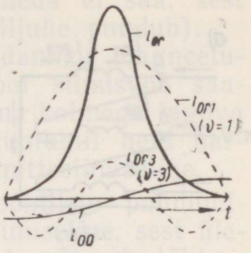
Jätame algul ka südamikus tekkiva teraseskao arvestamata. Siis võrgust võetav tühijooksuvool $i = i_0$ osutub puhtreaktiivseks magneetimisvooluks ($i_0 = i_{0r}$).

Voo Φ tekitab vool i_{0r}. Et küllastuse korral voog Φ ei ole enam võrdeline vooluga i_{0r}, siis siinusvoo korral osutub vool i_{0r} mittesiinuseliseks.

Joonisel 13-1 on *I* veerandis näidatud kõver $\Phi = f(i_{0r})$ küllastuse olemasolu korral ja *II* veerandis kõver $\Phi = f(t)$, kus t on aeg. Sama joonise *IV* veerandis on toodud kõver $i_{0r} = f(t)$, mis saadakse joonisel näidatud viisil, kui Φ väärtused kõveralt $\Phi = f(t)$ üksikute hetkede *1*, *2*, *3* jne. jaoks kanda kõverale $\Phi = f(i_{0r})$ ja sel teel saadud i_{0r} väärtused kanda alla samadele hetkedele. Kõvera $i_{0r} = f(t)$ negatiivsel poolperioodil on sama-



Joon. 13-1. Ühefaasilise trafo tühijooksuvoolu reaktiivkomponendi määramine



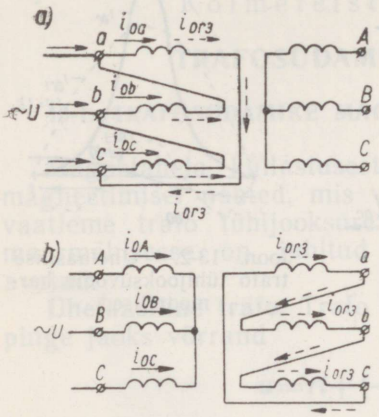
Joon. 13-2. Ühefaasilise trafo tühijooksuvoolu harmoonilised

sugune kuju kui positiivsel. Niisugune mittesiinuseline kõver $i_{0r} = f(t)$ (joon. 13-2) sisaldab kõiki paarituid harmoonilisi ($\nu = 1, 3, 5 \ldots$), millest peale põhiharmoonilise ($\nu = 1$) on suurima amplituudiga kolmas harmooniline. Terase mark Э4 korral ja maksimaalse induktsiooni 1,4T juures moodustab kolmas harmooniline ca 30% ja viies harmooniline ca 15% põhiharmoonilisest.

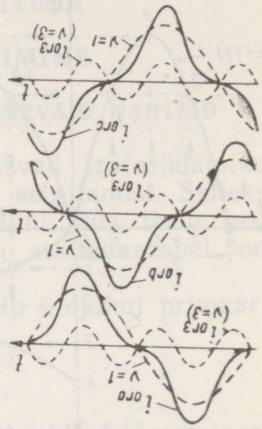
Tühijooksuvool i_0 sisaldab peale reaktiivkomponendi i_{0r} ka teatavat väikest siinuselist aktiivkomponenti, mida on põhjustanud aktiivenergia kadu trafosüdamikus (joon. 13-2). Seetõttu on tühijooksuvoolu kõver $i = i_{0r} + i_{0a}$ mittesümmeetriline.

Kolmefaasiline trafo mähiste ühendusega Y/△. Olgu trafo tühijooksul siinuspingega võrku lülitatud mähis kolmnurkühenduses (joon. 13-3, *a*). Seejuures on trafo iga faasimähis lülitatud siinuselisele võrgupingele. Järelikult on ka iga faasimähise poolt tekitatud voog siinuseliselt muutuv ja faaside tühijooksuvoolud i_{0ra}, i_{0rb} ja i_{0rc} sisaldavad kõiki paarituid harmoonilisi nagu ühefaasilise trafo korralgi. Sealjuures on kõikide faasivoolude kõrgemate harmooniliste paigutus põhiharmoonilise suhtes identne (joon. 13-4).

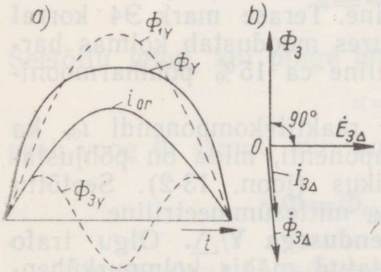
Kui üksikute faasivoolude põhiharmoonilised on üksteise suhtes faasis 120° nihutatud, siis kolmandad harmoonilised on nihutatud $3 \cdot 120° = 360°$ või 0°, viiendad harmoonilised aga $5 \cdot 120° = 600°$ või 240°, seitsmendad harmoonilised — $7 \cdot 120° = 840°$ või 120°, üheksandad harmoonilised — $9 \cdot 120° = 3 \cdot 360°$ või 0° jne.



Joon. 13-3. Trafo toitmine tühijooksul mähiste ühendusviisi Y/Δ puhul: *a* — kolmnurka ühendatud, *b* — tähte ühendatud mähise poolsest küljest



Joon. 13-4. Kolmnurka ühendatud mähise üksikuis faasides tekkivad tühijooksuvoolu reaktiivkomponendid ja nende harmoonilised



Joon. 13-5. Siinuselise tühijooksuvoolu korral tekkiva voo kõver (*a*) ja voogude ning voolude 3. harmooniliste vektordiagramm (*b*)

Seega harmoonilised, mille järjenumber jagub kolmega ($\nu = 3, 9, 15 \ldots$), ühtivad omavahel kõigis faasimähistes. Selle tulemusena puuduvad liinivooludes, mis moodustuvad faasivoolude vahest, kõik voolude harmoonilised, mille järjenumber jagub kolmega. Need harmoonilised ringlevad ainult faasimähiste suletud kontuuris (joon. 13-3, *a*) ja olles omavahel faasis ning suuruselt võrdsed, moodustavad nad resulteeriva suletud voolusüsteemi.

Kui toita tühijooksul trafot mähiste ühendusega Y/△ tähte ühendatud mähise poolt (joon. 13-3, *b*), siis faasivooludes kol-

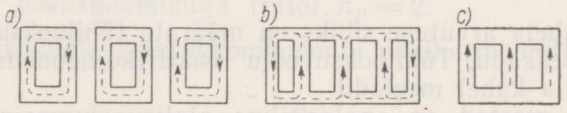
mega jaguva järjenumbriga harmoonilisi esineda ei saa, sest nende summa võrdub igal hetkel nulliga (nulljuhe puudub).

Nagu selgus eespool ühefaasilise trafo südamiku magneetumisprotsessi vaatlemisel, peab magneetimisvool siinusvoo saamiseks magnetilise küllastumise korral sisaldama kolmega jaguva järjenumbriga harmoonilisi. Et vaadeldaval juhtumil neid harmoonilisi esineda ei saa, siis on tekkiv voog mittesiinuseline.

Kolmega jaguvate järjenumbritega harmooniliste puudumisel on magneetimisvoolu i_{0r} kõver ligikaudu siinuseline, sest ülejäänud kõrgemate harmooniliste ($\nu = 5, 7$ jne.) mõju on tähtsusetult väike. Sellise voolukõvera i_{0r} korral osutub magnetvoo Φ_Y kõver, tingituna küllastusest, lamendatuks (joon. 13-5, *a*). See kõver sisaldab põhiharmoonilise Φ_{1Y} kõrval tugevat kolmandat harmoonilist Φ_{3Y}. Kõigi faasimähiste voogude kolmandad harmoonilised Φ_{3Y} on omavahel faasis ning indutseerivad kolmnurka ühendatud sekundaarmähise faasis suuruselt võrdsed ja ühtivad elektromotoorjõud E_3 (joon. 13-5, *b*). Need, liitudes kolmnurkses mähiste kontuuris, tekitavad seal voolu $I_{3\Delta}$, mis tingituna mähiste suhteliselt suurest induktiivsusest on praktiliselt puhtinduktiivse iseloomuga. Selle voolu poolt tekitatavad vood $\Phi_{3\Delta}$ kompenseerivad peaaegu täiesti vood Φ_{3Y}. Seega on faaside resulteerivad vood praktiliselt siinuselised. Järelikult on viimati vaadeldud juhu erinevus eelmisest ainult selles, et magneetimisvoolu kolmandad ja kolmega jaguva järjenumbriga harmoonilised tekivad sekundaarpoolel (joon. 13-3, *b*).

Eeltoodud arutlusest selgub, et kolmefaasilise trafo ükskõik kumma mähise kolmnurkühenduse korral on magnetvood, elektromotoorjõud ja pinged siinuselised. See asjaolu on niisuguse ühendusviisi tunduvaks eeliseks, võrreldes Y/Y lülitusega. Öeldu kehtib niihästi kolmefaasiliste grupitrafode kui ka kolme sambaga trafode kohta.

Kolmefaasiline trafo mähiste ühendusega Y/Y. Kolmefaasilise trafo mähiste sellise ühendamise korral puuduvad selle magneetimisvoolus, nagu eespool näidatud, kõik harmoonilised, mille järjenumber jagub kolmega ($\nu = 3, 9, 15$ jne.). Seetõttu esineb



Joon. 13-6. Voo kolmandad harmoonilised kolmefaasilistes trafodes

faaside magnetvoogude kõveras peale põhivoo Φ_1 ka voo kolmas harmooniline Φ_3.

Järelikult on ühenduse Y/Y iseloomulikuks omaduseks kõigis kolmes faasis ajaliselt faasis ühtiva voo kolmanda harmoonilise Φ_3 olemasolu. Selle tulemusena on faasi emj. ja faasipinged selles lülituses mittesiinuselised, sisaldades kolmandat harmoonilist E_3. Nende harmooniliste väärtus võib olla küllaltki suur. Näiteks, kui $\Phi_3 = 0{,}1\Phi_1$, siis $E_3 = 0{,}3\ E_1$, sest Φ_3 muutub kolmekordse sagedusega, võrreldes Φ_1-ga. Liini elektromotoorjõud on siiski siinuselised, sest kahe faasipinge vahes elektromotoorjõud E_3 puudub.

Kolmefaasilise grupitrafo (joon. 13-6, *a*) ja kolmefaasilise sammas-manteltrafo (joon. 13-6, *b*) korral kulgevad voo kolmandad harmoonilised Φ_3, samuti nagu Φ_1 piki suletud magnetahelat. Kolme sambaga trafos ei saa need vood aga magnetahela kaudu sulguda, sest nad on igal hetkel kõigis sammastes samasuunalised ja suuruselt võrdsed (joon. 13-6, *c*). Seetõttu sulguvad nad läbi trafoõli, õhu ja ferromagnetiliste kinnitusdetailide, läbi õlipaagi seinte jne. Selle tulemusena on siin voog Φ_3 väiksem kui teiste trafotüüpide puhul. Küll põhjustavad nad aga kinnitusdetailide ja õlipaagi seintes pöörisvoolukadusid.

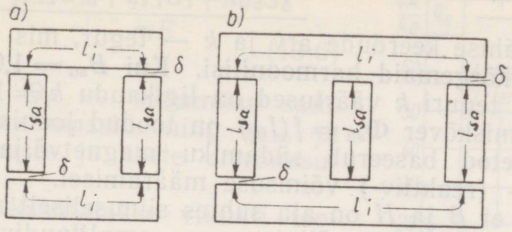
Seega esinevad kolmefaasilise trafo mähiste ühenduse Y/Y korral soovimatud nähted — faasipingete moonutused ja kolme sambaga trafo korral ka lisakadu pöörisvooludest. Nulljuhtme kasutamine peaks olukorda põhimõtteliselt parandama, sest siis moodustub voolu kolmandatele harmoonilistele I_3 suletud kontuur vooluga $3I_3$. Kui see kontuur aga moodustatakse läbi koormustakistite, siis on voolu I_3 suurus ja ka ta mõju väikesed.

Eespool kirjeldatud põhjustel seda ühendusviisi reeglina võimsate. kõrgepingetrafode korral ei kasutata. Kui aga mõningal juhul seda ühendusviisi siiski tuleb kasutada (näit. kui on vaja nullpunkt mõlemapoolselt maandada), siis võib trafole mähkida kolmanda mähise, mis lülitatakse kolmnurka ja mille juhtme ristlõige on arvutatud ainult voolule I_3.

13-2. TRAFO MAGNETAHELA ARVUTUS

Magnetahela arvutuse sihiks on määrata tühijooksuvoolu suurus ja teraseskadu. Tühijooksuvoolu reaktiivkomponendi arvutuse võib läbi viia kahel meetodil.

Esimene meetod on analoogiline alalisvoolumasina magnetahela arvutusega (vt. 2. ptk.). Sel juhul jagatakse magnetahel piki keskmist magnetjoont osadeks (sambad, ikked ja õhupilud nende vahel) nii, et iga üksikosa ulatuses võib magnetilisi indukt-



Joon. 13-7. Ühefaasilise trafo magnetahel (*a*) ja kolmefaasilise sammastrafo magnetahel (*b*)

sioone B_{sa}, B_i ja B_δ lugeda konstantseiks (joon. 13-7). Andes ette voo amplituudiväärtuse Φ_{sa} sambas, määratakse induktsioonid B_{sa} ja B_i, kusjuures $B_{sa} = B_\delta$, ja seejärel leitakse terase magneetimiskõveralt (vt. joon. 13-1) vastavalt H_{sa} ja H_i. Ühefaasilise trafo magneetimisergutus on siis avaldatav

$$F = 2H_{sa}l_{sa} + 2H_i l_i + 4\frac{B_{sa}}{\mu_0}\delta, \qquad (13\text{-}1)$$

kus δ on õhupilu laius, mis vaheliti laotud südamiku korral on 0,003 ... 0,005 cm. Eraldi koostatud sammaste ja ikete korral (põkksüdamik) on õhupilu ikete ja sammaste vahele paigutatud isoleervaheku paksuse võrra suurem.

Kolme sambaga trafo magnetahel on teatud määral ebasümmeetriline. Magnetvoo teekonna pikkus on äärmistes faasides suurem kui keskmises. Seetõttu on äärmiste faaside magneetimisergutus ja seega ka magneetimisvool suuremad kui keskmisel faasil. Praktikas seda erinevust väiksuse tõttu ei arvestata ja arvutamisel kasutatakse ühe faasi magneetimisergutuse keskmist väärtust. Siis (joon. 13-7, *b*)

$$F = H_{sa}l_{sa} + \frac{2}{3}H_i l_i + n_p\frac{B_{sa}}{\mu_0}\delta, \qquad (13\text{-}2)$$

kus n_p on keskmine pilude või liitekohtade arv faasi kohta. Kolme sambaga vaheliti laotud südamikuga trafol (vt. joon. 12-8, *b*) $n_p = \frac{7}{3}$ ja põkksüdamikuga trafol $n_p = 2$.

Tühijooksuvoolu reaktiivkomponendi põhiharmoonilise efektiivväärtus

$$I_{0r} = \frac{F}{\sqrt{2}\,kw}, \qquad (13\text{-}3)$$

kus w on mähise keerdude arv ja k — tegur, mis arvestab tühijooksuvoolu kõrgemaid harmoonilisi. Kui $B_{sa} = 1{,}0$ T ja $B_{sa} = 1{,}4$ T, siis teguri k väärtused on ligikaudu $k = 1{,}5$ ja $k = 2{,}2$.

Magneetimiskõver $\Phi_{sa} = f(I_{0r})$ on toodud joonisel 13-1.

Teine meetod baseerub südamiku magnetvälja energia või magneetimis- (reaktiiv-) võimsuse määramisel.

Eeldame, et B ja H on aja suhtes siinuseliselt muutuva magnetilise induktsiooni ja väljatugevuse amplituudiväärtused. Siis välja ruumiühikus sisalduva magnetilise energia maksimum

$$W'_{max} = \frac{BH}{2}.$$

Reaktiivvõimsus mahuühikus

$$Q' = \omega W'_{max} = \pi f BH$$

ning kogu südamiku — mahuga V ja massiga G — reaktiivvõimsus

$$Q = Q'V = \frac{Q'G}{\gamma} = \frac{\pi f BH}{\gamma} G = q_s G, \qquad (13\text{-}4)$$

kus γ on südamiku terase tihedus ja

$$q_s = \frac{\pi f BH}{\gamma} = \frac{\pi f B^2}{\gamma \mu_0} \qquad (13\text{-}5)$$

kujutab endast südamiku magneetimiserivõimsust, s. o. reaktiivvõimsust südamiku massiühikus.

Õhupilude kohta võib Q avaldise kirjutada kujul

$$Q = qn\delta S = nq_\delta S,$$

kus S on õhupilu pind;

n — õhupilude arv kogu südamikus;

q — reaktiivvõimsus õhupilu mahuühikus;

$q_\delta = q\delta$ — õhupilu pinnaühikule tulev reaktiivvõimsus.

Suurus $q_s = f(B)$ on põhimõtteliselt arvutatav vastava terase magneetimiskõvera $B = f(H)$ abil. Praktikas kasutatakse aga siiski katseliselt saadud andmeid. Kõverad $q_\delta = f(B)$ määratakse vaheliti laotud südamike puhul samuti katseliselt, sest seal šunteeritakse ühe plekikihi õhupilud teise plekikihi poolt, mis vähendab induktsiooni piludes ja suurendab seda šunteerivais teraslehtedes. Seetõttu sõltub siin q_δ suurus terase margist. Kõverad $q_s = f(B)$ ja $q_\delta = f(B)$ on toodud joonisel 13-8. Et trafo reaktiivmagneetimisvõimsus

$$Q_0 = mEI_{0r},$$

kus m on faaside arv, siis

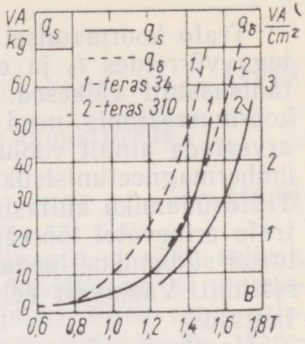
$$I_{0r}=\frac{Q_0}{mE}=\frac{q_{s.sa}G_{sa}+q_{s.i}G_i+nq_\delta S_\delta}{mE}. \quad (13\text{-}6)$$

Siin G_{sa} ja G_i — südamiku sammaste ja ikete massid ning $q_{s.sa}$ ja $q_{s.i}$ — sammaste ja ikete erivõimsused q_s.

Tavaliselt kasutatakse viimati toodud arvutusmetoodikat.

Teraseskadu südamikus p_{te} on lihtsalt arvutatav, teades kasutatava terasemargi erikadu $p=f(B)$:

$$p_{te}=p_{te.sa}G_{sa}+p_{te.i}G_i. \quad (13\text{-}7)$$



Joon. 13-8. Südamiku ja õhupilu reaktiiv-erivõimsuse kõverad

Tühijooksuvoolu aktiivkomponent

$$I_{0a}=\frac{p_{te}}{mE}=\frac{p_{te.sa}G_{sa}+p_{te.i}G_i}{mE}, \quad (13\text{-}8)$$

ja kogu

$$I_0=\sqrt{I_{0a}^2+I_{0r}^2}. \quad (13\text{-}9)$$

Jõutrafodel on I_0 suhteliselt väike, moodustades nimipinge korral ainult 2...10% nimivoolust. Ülemine piir kehtib väikeste trafode kohta (10...20 kVA). Tühijooksuvoolu väiksus on seletatav suletud ferromagnetilise südamiku olemasoluga.

Neljateistkümnes peatükk

TRAFO ASESKEEM JA SELLE PARAMEETRID

14-1. TRAFOMÄHISTE INDUKTIIVSUSED JA ELEKTROMAGNETILINE PUISTE

Mähiste induktiivsused. Terassüdamikuga trafo magnetiline läbitavus μ_a ei ole kogu ümbermagneetimistsükli vältel konstantne. Seetõttu muutuvad selle tsükli vältel ka trafo mähiste omainduktiivsused L ja vastastikused induktiivsused M. Sellise μ_a mittekonstantsuse tulemusena tekivad trafo lülitamisel siinuselisele võrgupingele selle tühijooksuvoolus i_0 kõrgemad harmoonilised (vt. § 13-1).

Trafo koormamisel lisandub voolule i_0 veel koormusvool, millega võrreldes i_0 ja eriti veel selle kõrgemad harmoonilised on tähtsusetult väikesed. Seetõttu võib trafo tööprotsessi uurimisel koormusrežiimis need harmoonilised tähele panemata jätta ja arvestada ainult voolu i_0 põhiharmoonilist. Järelikult loeme kogu ümbermagneetimistsükli vältel suurused μ_a, L ja M konstantseks. Trafosüdamiku küllastust võib seejuures arvesse võtta sellega, et trafo erinevatel töörežiimidel, s. o. voo erinevail amplituudiväärtustel südamikus loeme μ_a, L ja M konstantseks vaid vaadeldaval režiimil. Vastavalt eeltoodule eeldame, et μ_a, L ja M on konstantsed.

Vaatleme järgnevalt põhivoo Φ_s poolt põhjustatud mähiste induktiivsusi ja induktiivtakistusi eeldusel, et Φ_s kulgeb piki suletud südamikku ja aheldub mõlema mähise kõigi keerdudega (joon. 14-1).

Olgu voog Φ_s tekitatud voolust primaarmähises i_1, kusjuures vool sekundaarmähises $i_2 = 0$. Suurused Φ_s ja i_1 olgu teada kas magnetahela arvutusest või katseliselt määratuna. Sel juhul primaarmähise omainduktiivsus põhivoost

$$L_{s1} = \frac{w_1 \Phi_s}{i_1}. \tag{14-1}$$

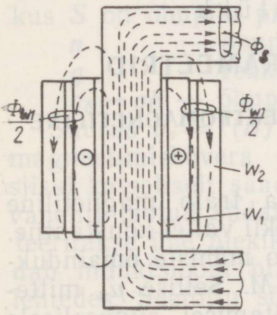
L_{s1} suurus on määratav ka südamiku magnetilise takistuse kaudu

$$R_{\mu s} = \sum_k \frac{l_k}{\mu_k S_k}, \tag{14-2}$$

kus l_k, S_k ja μ_k tähistavad vastavalt magnetahela k-nda lõigu pikkust, ristlõiget ja magnetilist läbitavust.

Sealjuures

$$\Phi_s = \frac{F}{R_{\mu s}} = \frac{w_1 i_1}{R_{\mu s}}. \tag{14-3}$$



Joon. 14-1. Trafo magnetvood ühepoolsel magneetimisel ($i_1 \neq 0$; $i_2 = 0$)

Pärast valemist (14-3) saadud Φ_s väärtuse paigutamist võrrandisse (14-1) saame

$$L_{s1} = \frac{w_1^2}{R_{\mu s}}. \tag{14-4}$$

Tuleb märkida, et $R_{\mu s}$ suurus on samuti määratav magnetahela arvutustulemustest või siis katsetulemustest seose (14-3) kaudu.

Analoogiliselt on määratav ka sekundaarmähise omainduktiivsus

$$L_{s2}=\frac{w_2^2}{R_{\mu s}}. \tag{14-5}$$

Primaar- ja sekundaarmähise vastastikune induktiivsus

$$M_s=\frac{w_1 w_2}{R_{\mu s}}. \tag{14-6}$$

Tervenisti südamikus asuva magnetvälja pilt ei sõltu sellest, kumma mähise voolu poolt ta tekitatakse. Seetõttu on ka magnetiline takistus voole Φ_s mõlema mähise jaoks ühine ning valemeisse (14-4), (14-5) ja (14-6) läheb ühine takistus $R_{\mu s}$. Järelikult on ka

$$L_{s2}\frac{w_1^2}{w_2^2}=M_s\frac{w_1}{w_2}=L_{s1}. \tag{14-7}$$

Primaarmähise vool i_1 tekitab peale põhivoo Φ_s veel voo Φ_{w1}, mis kulgeb osaliselt läbi õhu või trafoõli (joon. 14-1). Sellest voost põhjustatud aheldusvoogudele (primaar- ja sekundaarmähisega Ψ_{w1} ja Ψ_{w12}) vastavad primaarmähise omainduktiivsus

$$L_{w1}=\frac{\Psi_{w1}}{i_1}$$

ja vastastikune induktiivsus

$$M_{w12}=\frac{\Psi_{w12}}{i_1}.$$

Täpselt samuti tekitatakse ka sekundaarmähise voolu i_2 poolt osaliselt läbi õhu kulgev voog Φ_{w2}. Sellest voost põhjustatud sekundaar- ja primaarmähisega ahelduvad aheldusvood Ψ_{w2} ja Ψ_{w21} vastavad sekundaarmähise omainduktiivsusele

$$L_{w2}=\frac{\Psi_{w2}}{i_2}$$

ja kahe mähise vastastikusele induktiivsusele

$$M_{w21}=\frac{\Psi_{w21}}{i_2}.$$

Sealjuures $M_{w12}=M_{w21}=M_w$.

Voogude Φ_{w1} ja Φ_{w2} väljapilt on palju keerulisem kui voo Φ_s väljapilt. Nende voogude väljajooned ahelduvad ainult mingi üksteisest erineva osaga kummagi mähise keerdudest. Seetõttu erinevalt L_{s2}-st [vt. seost (14-7)]

$$L_{s2}\frac{w_1^2}{w_2^2} \neq M_w \frac{w_1}{w_2} \neq L_{s1}. \qquad (14\text{-}8)$$

Täielik primaar- ja sekundaarmähise omainduktiivsus

$$L_{11} = L_{s1} + L_{w1}; \quad L_{22} = L_{s2} + L_{w2} \qquad (14\text{-}9)$$

ja täielik vastastikune induktiivsus

$$M = M_s + M_w. \qquad (14\text{-}10)$$

Võrrandite (14-9) ja (14-10) esimesed liidetavad on tunduvalt suuremad kui teised, sest läbi õhu kulgev voog on suhteliselt väike.

Elektromagnetilise puiste mõiste. Kahe induktiivselt sidestatud ahela elektromagnetilise sidestuse täielikkust iseloomustab nende sidestustegur

$$c = \frac{M}{\sqrt{L_{11}L_{22}}}. \qquad (14\text{-}11)$$

Nagu on teada elektrotehnika teoreetiliste aluste kursusest, on alati $c < 1$.

Kui trafos puuduksid läbi õhu kulgevad vood Φ_{w1} ja Φ_{w2}, siis $L_{11} = L_{s1}$; $L_{22} = L_{s2}$, $M = M_s$ ja sel juhul vastavalt võrrandeile (14-4), (14-5), (14-6) ja (14-11)

$$c = \frac{M_s}{\sqrt{L_{s1}L_{s2}}} = 1.$$

Seega on siis mittetäieliku elektromagnetilise sidestuse $c < 1$ põhjuseks voogude Φ_{w1} ja Φ_{w2} olemasolu trafos või täpsemini öeldult, nende mittevõrdne aheldumine mõlema mähisega. Tingimus $c = 1$ oleks täidetav ainult mõlema mähise täielikul ühtimisel, mis aga praktiliselt on võimatu.

Mittetäieliku elektromagnetilise sidestuse nähet nimetatakse elektromagnetiliseks puisteks. Koos seosega (14-11) on otstarbekas vaatluse alla võtta ka elektromagnetilise puiste tegur

$$\sigma = 1 - c^2 = 1 - \frac{M^2}{L_{11}L_{22}}. \qquad (14\text{-}12)$$

Mida väiksem on c ja mida suurem σ, seda suurem on elektromagnetiline puiste.

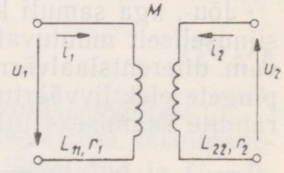
Tingituna sellest, et õhus kulgevad vood Φ_{w1} ja Φ_{w2} ei aheldu mõlema mähisega ühteviisi või ahelduvad seejuures nendega veel mittetäielikult, nimetatakse neid tihti ka puistevoogudeks, olgugi et see nimetus on teataval määral tinglik. Nimelt põhjus-

tavad vood Φ_{w1} ja Φ_{w2} ka vastastikust induktsiooni, sest $M_w \neq 0$. Allpool tõestatakse, et mittetäielik elektromagnetiline sidestus või elektromagnetilise puiste suurus avaldab suurt mõju trafode ja pöörlevate elektrimasinate mitmetele tehnilistele näitajatele ja karakteristikutele.

Ferromagnetilise südamikuga trafodes on vood Φ_{w1} ja Φ_{w2} küllaltki väikesed. Seetõttu on seal elektromagnetiline sidestus suhteliselt tugev ja puiste vastavalt väike. Jõutrafode korral näiteks on $c = 0{,}995 \ldots 0{,}998$ ja puistetegur $\sigma = 0{,}004 \ldots 0{,}010$. Järelikult moodustub siin σ väärtus [valem (14-12)] kahe väga lähedase suuruse vahest, mistõttu arvutus selle valemiga on vägagi ebatäpne. Praktiliselt on L_{11}, L_{22} ja M väärtusi niihästi arvutuslikult kui ka katseliselt võimatu küllaldase täpsusega määrata. Seetõttu tekib vajadus elektromagnetilist puistet iseloomustavate parameetrite vahetuks määramiseks.

14-2. TRAFO PINGEVÕRRANDID

Trafo tööprotsessi saab uurida mähiste pingevõrrandite alusel. Mähiste elementide (keerdude ja poolide) ja samuti mähiste ning trafosüdamiku vahelised mahtuvusvoolud on tavalistes töötingimustes ($f < 1000 \ldots 5000$ Hz) väga väikesed ja seetõttu võib neid mitte arvestada. Ferromagnetilise südamikuta trafodes on L_{11}, L_{22} ja M konstantsed. Vastavalt § 14-1 toodud selgitustele võib samad suurused mingi antud töörežiimi jaoks ka ferromagnetilise südamikuga trafos konstantseks lugeda. Jätame esialgu südamiku teraseskao arvestamata. Siis on ühefaasilise kahe mähisega trafo (joon. 14-2) pingevõrrandid diferentsiaalkujul avaldatud järgmiselt:



Joon. 14-2. Ühefaasilise kahe mähisega trafo skeem

$$\left.\begin{aligned} u_1 &= r_1 i_1 + L_{11}\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t} + M\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}\,; \\ u_2 &= -r_2 i_2 - L_{22}\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t} - M\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t}\,, \end{aligned}\right\} \qquad (14\text{-}13)$$

kus u_1, u_2, i_1, i_2 on primaar- ja sekundaarmähise pinge ja voolu hetkväärtused,

r_1, r_2, L_{11}, L_{22} — mähiste aktiivtakistused ja induktiivsused,

M — mähiste vastastikune induktiivsus.

Skeemil (joon. 14-2) on näidatud u ja i positiivsed suunad, kusjuures nool u tähisena on suunatud kõrgema potentsiaaliga punktist madalama potentsiaaliga punkti.

Võrrandi (14-13) kirjutusviis on tingitud järgmistest kaalutlustest.

Primaarmähisele rakendatud pinge u_1 kulutatakse pingelangule mähise aktiivtakistusel $i_1 r_1$ ja samas mähises indutseeritud elektromotoorjõu

$$e_1 = -\left(L_{11} \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \right)$$

tasakaalustamiseks, koosnedes seega kahest komponendist $r_1 i_1$ ja $-e_1$, mis kajastubki võrrandisüsteemi (14-13) esimeses võrrandis. Sekundaarpinge u_2 tekitab sekundaarmähises indutseeritud elektromotoorjõud

$$e_2 = -\left(L_{22} \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \right)$$

ja seega $u_2 = e_2 - r_2 i_2$, mis vastab võrrandisüsteemi (14-13) teisele võrrandile.

Võrrandeis (14-13) eeldatakse, et $M > 0$ ning positiivsed voolud i_1 ja i_2 tekitavad samasuunalised vood.

Tuleb märkida, et võrrandisüsteemi (14-13) teise võrrandi märgid võiks muuta vastupidiseks. Sel juhul võiks pinget u_2 vaadelda sekundaarvõrgust trafole rakendatud pingena. Mõningad, eriti just välismaa autorid kasutavad tihti sellist kirjutusviisi.

Jõu-, aga samuti ka mitmed spetsiaaltrafod töötavad harilikult siinuseliselt muutuvate pingete ja vooludega. Sel juhul on mugavam diferentsiaalvõrrandite (14-13) asemel kasutada voolude ja pingete efektiivväärtustega võrrandeid komplekskujul. Nende võrrandite saamiseks tuleb võrrandisse (14-13) paigutada

$$u_1 = \sqrt{2}\, \dot{U}_1 e^{j\omega t}, \qquad u_2 = \sqrt{2}\, \dot{U}_2 e^{j\omega t},$$

$$i_1 = \sqrt{2}\, \dot{I}_1 e^{j\omega t}, \qquad i^2 = \sqrt{2}\, \dot{I}_2 e^{j\omega t}$$

ning pärast diferentseerimist taandada võrrandeist kordaja $\sqrt{2}\, e^{j\omega t}$.

Sellisel juhtumil saame pingevõrrandid kujul

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_1 &= r_1 \dot{I}_1 + jx_{11} \dot{I}_1 + jx_{12} \dot{I}_2 ; \\ -\dot{U}_2 &= r_2 \dot{I}_2 + jx_{22} \dot{I}_2 + jx_{21} \dot{I}_1 , \end{aligned}\right\} \qquad (14\text{-}14)$$

kus

$$x_{11} = \omega L_{11}, \qquad x_{22} = \omega L_{22}, \qquad x_{12} = \omega M \qquad (14\text{-}15)$$

kujutavad endast mähiste täielikku oma- ja vastastikust induktiivtakistust.

Kolmefaasilise trafo sümmeetrilise koormuse korral kulgevad elektromagnetilised protsessid kõigis faasides ühteviisi, olles ainult üksteise suhtes faasis 120° nihutatud. Kolme sambaga trafo

magnetahela mõningane ebasümmeetria ja mõningal juhul (vt. 13-1) esinevad magnetvoo kolmandad harmoonilised trafo tööolukorras tunduvat mõju ei avalda. Pealegi võib nende nähete mõju vajaduse korral eraldi arvestada. Seetõttu on võrrandid (14-14) suure täpsusega kasutatavad ka kolmefaasilise, sümmeetriliselt koormatud trafo faasisuuruste määramisel.

Võrrandisüsteem (14-4) ei arvesta ainult trafosüdamiku teraseskadu. Selle kao arvestamist käsitletakse eraldi.

Kolmefaasilise trafo puhul, nagu eespool öeldud, tähendavad $\dot{U}_1$, $\dot{U}_2$, $\dot{I}_1$ ja $\dot{I}_2$ vastavalt faasipingeid ja -voole.

Võrrandid (14-13) ja (14-14) määravad eespool toodud lihtsustuste korral täielikult ära trafos esinevad protsessid ning võimaldavad lahendada trafo tööprotsesse käsitavaid ülesandeid. Näiteks kui määrata esimesest võrrandist (14-14) $\dot{I}_1$ ja paigutada teise võrrandisse (14-14), saame sekundaarpinge $\dot{U}_2$ sõltuvuse koormusvoolust $\dot{I}_2$:

$$\dot{U}_2 = -\frac{jx_{12}}{r_1+jx_{11}}\dot{U}_1 - (r_2+jx_{22})\left[1-\frac{(jx_{12})^2}{(r_1+jx_{11})(r_2+jx_{22})}\right]\dot{I}_2. \quad (14\text{-}16)$$

Avaldise (14-16) parema poole esimene liige määrab suuruse $\dot{U}_2=\dot{U}_{20}$, s. o. tühijooksul, kui $\dot{I}_2=0$:

$$\dot{U}_{20} = -\frac{jx_{12}}{r_1+jx_{11}}\dot{U}_1, \quad (14\text{-}17)$$

teine liige koormusel tekkiva pingelangu sekundaarmähises.

Võrrandist (14-16) saab määrata ka lühiserežiimi sekundaarvoolu $\dot{I}_2=\dot{I}_{2k}$, s. o. kui sekundaarmähis on lühistatud ja $\dot{U}_2=0$:

$$\dot{I}_{2k} = \frac{\dot{U}_{20}}{(r_2+jx_{22})\left[1-\frac{(jx_{12})^2}{(r_1+jx_{11})(r_2+jx_{22})}\right]}. \quad (14\text{-}18)$$

Tuleb märkida, et praktilistes arvutustes võrrandeist (14-13) ja (14-14), eriti aga just võrrandeist (14-16) ja (14-18) saadud tulemused ei ole küllalt täpsed. Põhjus on selles, et võrrandeis (14-16) ja (14-18) olev kordaja

$$1-\frac{(jx_{12})^2}{(r_1+jx_{11})(r_2+jx_{22})}$$

kujutab endast kahe väärtuselt lähedase suuruse vahet. Selles võib veenduda, kui jätta arvestamata x_{11} ja x_{22}-ga võrreldes väga väikesed suurused r_1 ja r_2. Siis saab ülaltoodud kordaja kuju

$$1-\frac{x_{12}^2}{x_{11}x_{22}}=1-\frac{M^2}{L_{11}L_{22}}=\sigma, \qquad (14\text{-}19)$$

s. t. puisteteguri väärtuse, vastavalt võrrandile (14-12). Kuid nagu juba eespool mainitud oli, tekib M, L_{11} ja L_{22} arvutuslikul või eksperimentaalsel määramisel küllalt suur viga.

Seega, võttes $r_1 = r_2 = 0$, saame võrrandite (14-16) ja (14-18) asemel vastavalt

$$\dot{U}_2=-\frac{x_{12}}{x_{11}}\dot{U}_1-j\sigma x_{22}\dot{I}_2=\dot{U}_{20}-j\sigma x_{22}\dot{I}_2;$$

$$\dot{I}_{2k}=\frac{\dot{U}_{20}}{j\sigma x_{22}}.$$

Toodud seostest nähtub samuti, et sellised ekspluatatsioonilist tähtsust omavad suurused nagu pingelang ja lühisevool määratakse väikese osaga täielikust induktiivtakistusest σx_{22}, mis on põhjustatud elektromagnetilisest puistest. Sama võib öelda ka teiste, trafosid ja ka pöörlevaid masinaid iseloomustavate ekspluatatsiooninäitajate kohta. Seetõttu on elektromagnetilist puistet iseloomustavate suuruste määramine üks tähtsamaid küsimusi elektrimasinate teoorias.

Peale eespool toodud kaalutluste arvutuste täpsuse osas on võrrandite (14-13) ja (14-14) kasutamine ebamugav veel seetõttu, et primaar- ja sekundaarmähise keerdude arvud erinevad ($w_1 \neq w_2$). Seega erinevad üksteisest tugevasti ka parameetrid r_1, r_2, L_{11}, L_{22}, M, x_{11}, x_{22} ja x_{12} ja samuti ka pinged u_1, u_2, U_1, U_2 ning voolud i_1, i_2, I_1 ja I_2.

Seoses sellega on elektrimasinate teooriat vaadeldavate probleemide osa otstarbekas arendada järgnevais, üksteisega tihedalt seotud suundades.

1. Induktiivselt sidestatud mähised taandatakse vastavate ümberarvutuste abil ühele ja samale keerdude arvule, mille tulemusena nende mähiste parameetrid, pinged ja voolud muutuvad ühesugusteks.

2. Täielikest omainduktiivsustest L_{11}, L_{22} ja omainduktiivtakistustest x_{11} ja x_{22} lahutatakse vastavalt puisteinduktiivsused S_1, S_2 ja puisteinduktiivtakistused x_1 ja x_2, mis on põhjustatud elektromagnetilise puiste nähtest. Lahutatakse niisuguse arvestusega, et täielike induktiivsuste jääk ($L_{11} - S_1$, $L_{22} - S_2$) ja vastavate induktiivtakistuste jääk ($x_{11} - x_1$, $x_{22} - x_2$) vastaksid täieliku elektromagnetilise sidestusega ahelatele ($c = 1$).

3. Töötatakse välja meetodid väikeste parameetrite — puiste-

induktiivsuste ja puisteinduktiivtakistuste — vahetuks määramiseks, sõltumatult täielikest induktiivsustest ja induktiivtakistustest. Sellega saavutatakse vajalik täpsus nende väikeste parameetrite määramisel.

4. Induktiivselt sidestatud elektriahelatelt minnakse üle elektriliselt sidestatud ahelate aseskeemidele, mis lihtsustab arvutusi ja suurendab teooria ülevaatlikkust.

5. Puisteinduktiivsused ja vastavad induktiivtakistused viiakse arvutusvalemeisse ja aseskeemidesse eraldi sisse, mis võimaldab elektromagnetilisest puistest sõltuvate suuruste vajaliku täpsusega arvutamist.

Neid küsimusi rakendatuna trafode juures vaadeldaksegi allpool.

14-3. KAHE MÄHISEGA TRAFO ASESKEEMID

Sekundaarmähise taandamine primaarmähisele. Kui primaar- ja sekundaarmähise keerdude arvud on võrdsed, siis nende voolud, pinged ja muud suurused on ühesugused. Vaatleme sellist nn. taandatud trafot, mille mähiste keerdude arvud on võrdsed.

Kujutleme, et trafo tegelik sekundaarmähis keerdude arvuga w_2 on asendatud taandatud mähisega, keerdude arvuga $w_2' = w_1$. Selle juures sekundaarmähise keerdude arv muutub

$$k = \frac{w'_2}{w_2} = \frac{w_1}{w_2} \qquad (14\text{-}20)$$

korda.

Suurust k nimetatakse trafo t a a n d a m i s - v õ i ü l e k a n d e s u h t e k s.

Sellise asendamise või «taandamise» tulemusel muutuvad ka taandatud sekundaarmähise elektromotoorjõud E'_2 ja pinge U'_2 k korda, võrreldes tegelike sekundaarsuurustega E_2 ja U_2:

$$\dot{E}'_2 = k\dot{E}_2; \qquad \dot{U}'_2 = k\dot{U}_2. \qquad (14\text{-}21)$$

Selleks et taandatud ja tegeliku sekundaarmähise võimsused kõigis töörežiimides võrduksid, on vajalik, et

$$\dot{U}'_2\dot{I}'_2 = \dot{U}_2\dot{I}_2,$$

kus $\dot{I}'_2$ on taandatud sekundaarvool. Siit järgneb, arvestades võrrandit (14-21), et

$$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{I}_2}{k}. \qquad (14\text{-}22)$$

Taandatud ja tegeliku sekundaarmähise magneetimisergutused on võrrandite (14-20) ja (14-22) alusel

$$\dot{I}'_2 w'_2 = \dot{I}_2 w_2. \qquad (14\text{-}23)$$

Selleks et taandatud ja tegeliku trafo elektromagnetilised protsessid kulgeksid ühesuguselt, on vaja, et tegelik ja taandatud sekundaarmähis tekitaksid ühesuguse magnetvälja. Et seda tagada, on vähe tingimuse (14-23) täitmisest, vaid peale selle peab taandatud mähis omama samu geomeetrilisi mõõtmeid ja kuju ning asuma trafosüdamiku aknas täpselt samuti nagu tegelik sekundaarmähis (vt. näiteks joon. 12-2, 12-26). Seetõttu peab taandatud mähise keerdude summaarne ristlõige võrduma tegeliku mähise vastava ristlõikega, s. t. taandatud mähise iga keeru ristlõige peab muutuma k korda. Et ka keerdude arv taandatud mähisel oli muutunud k kordselt, siis lõppresultaadina muutub selle aktiivtakistus k^2 korda, s. o.

$$r'_2 = k^2 r_2. \qquad (14\text{-}24)$$

Et poolide ühesuguste geomeetriliste mõõtmete korral nende induktiivsused ja induktiivtakistused on võrdelised keerdude arvu ruuduga, siis taandatud ja tegeliku mähise induktiivtakistuste x'_2 ja x_2 vahel kehtib samasugune seos:

$$x'_2 = k^2 x_2. \qquad (14\text{-}25)$$

On ilmne, et kaod taandatud ja tegelikes mähistes on võrdsed:

$$I'^2_2 r'_2 = \left(\frac{I_2}{k}\right)^2 k^2 r_2 = I_2^2 r_2.$$

Samuti võrduvad ka suhtelised pingelangud taandatud ja tegeliku trafo sekundaarmähises:

$$\frac{r'_2 I'_2}{U'_2} = \frac{k^2 r_2}{k U_2} \cdot \frac{I_2}{k} = \frac{r_2 I_2}{U_2},$$

$$\frac{x'_2 I'_2}{U'_2} = \frac{k^2 x_2}{k U_2} \cdot \frac{I_2}{k} = \frac{x_2 I_2}{U_2}.$$

Järelikult on kõik energeetilised ja elektromagnetilised seosed taandatud ja tegelikes trafodes ühesugused, mis õigustabki eeltoodud taandamist.

Teraseskadu mittearvestav aseskeem. Vastavalt eeltoodule teeme trafo pingevõrrandeis (14-14) asenduse:

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{U}'_2}{k}; \quad \dot{I}_2 = k\dot{I}'_2, \qquad (14\text{-}26)$$

mis matemaatilises osas vastab üleminekule esialgseilt reaalseilt muutujatelt U_2 ja I_2 uutele (taandatud) muutujatele U'_2 ja I'_2. Korrutades teist võrrandit võrrandisüsteemist (14-14) k-ga ja võttes arvesse asendust (14-26), saame:

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_1 &= r_1\dot{I}_1 + jx_{11}\dot{I}_1 + jkx_{12}\dot{I}'_2 \\ -\dot{U}'_2 &= k^2r_2\dot{I}'_2 + jk^2x_{22}\dot{I}'_2 + jkx_{12}\dot{I}_1 \end{aligned}\right\}. \tag{14-27}$$

Minnes üle kahe ahela elektrilisele sidestusele, peab vastavas aseskeemis esinema mõlema ahela ühine haru, milles voolab nende ahelate voolude summa $\dot{I}_1+\dot{I}'_2$. Vastavalt sellele peab nende ahelate pingevõrrandeisse tekkima ühesugused liikmed kordajatega $(\dot{I}+\dot{I}'_2)$. Võrrandeist (14-27) nähtub, et selliste liikmete saamiseks on esimesele võrrandile vaja liita ja temast lahutada liige $jkx_{12}\dot{I}_1$ ja teisele võrrandile liita ja temast lahutada liige $jkx_{12}\dot{I}'_2$. Sel juhtumil saame:

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_1 &= r_1\dot{I}_1 + j(x_{11} - kx_{12})\dot{I}_1 + jkx_{12}(\dot{I}_1+\dot{I}'_2), \\ -\dot{U}_2 &= k^2r_2\dot{I}'_2 + j(k^2x_{22} - kx_{12})\dot{I}'_2 + jkx_{12}(\dot{I}_1+\dot{I}'_2). \end{aligned}\right\} \tag{14-28}$$

Võtame kasutusele järgmised nimetused ja tähised:

1) sekundaarmähise taandatud aktiivtakistus

$$r'_2 = k^2r_2, \tag{14-29}$$

mis ühtib valemiga (14-24);

2) vastastikuse induktiivsuse taandatud induktiivtakistus

$$x'_{12} = kx_{12}; \tag{14-30}$$

3) primaarmähise puisteinduktiivtakistus

$$x_1 = x_{11} - kx_{12}; \tag{14-31}$$

4) sekundaarmähise taandatud puisteinduktiivtakistus

$$x'_2 = k^2x_{22} - kx_{12} = x'_{22} - x'_{12} = k^2x_2, \tag{14-32}$$

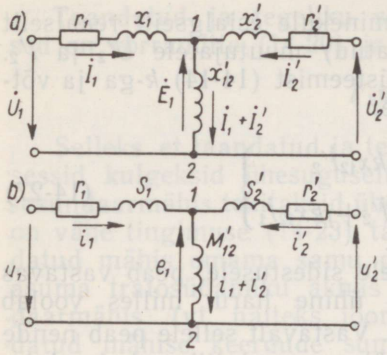
kus

$$x_2 = x_{22} - \frac{x_{12}}{k} \tag{14-33}$$

on taandatud sekundaarmähise puisteinduktiivtakistus.

Viies eelloetletud taandatud suurused võrrandeisse (14-28), saame taandatud trafo pingevõrrandid kujul

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_1 &= r_1\dot{I}_1 + jx_1\dot{I}_1 + jx'_{12}(\dot{I}_1+\dot{I}'_2), \\ -\dot{U}'_2 &= r'_2\dot{I}'_2 + jx'_2I'_2 + jx'_{12}(\dot{I}_1+\dot{I}'_2). \end{aligned}\right\} \tag{14-34}$$



Joon. 14-3. Kahe mähisega trafo teraseskadu mittearvestav aseskeem

Ei ole raske näha, et võrrandid (14-34) vastavad aseskeemile joon. 14-3, *a*. Tõepoolest, kulgedes mõttes piki kogu vasakpoolset ja parempoolset kontuuri joonisel 14-3, *a* ja koostades nende kohta pingevõrrandid, saamegi tulemusena süsteemi (14-34). Seega siis kujutab joonis 14-3, *a* taandatud trafo aseskeemi vastavalt võrrandeile (14-14) ja (14-34).

Analoogiliselt võib ümber kujundada ka pingete diferentsiaalvõrrandid (14-13), paigutades neisse

$$u_2=\frac{u'_2}{k} \quad \text{ja} \quad i_2=ki'_2. \tag{14-35}$$

Sel juhul saame aseskeemi 14-3, *b*, kus

$$S_1=L_{11}-kM=\frac{x_1}{\omega} \tag{14-36}$$

ja

$$S'_2=k^2L_{22}-kM=k^2\left(L_{22}-\frac{M}{k}\right)=k^2S_2=k^2\frac{x_2}{\omega} \tag{14-37}$$

kujutavad endast primaar- ja sekundaarmähise puisteinduktiivsusi, ning

$$M'_{12}=kM=\frac{x'_{12}}{\omega} \tag{14-38}$$

kujutab taandatud vastastikust induktiivsust.

Aseskeem joon. 14-3, *b* on kehtiv igasuguste pingete ja vooluде ajaliste muutumiste seaduspärasuste korral, sealhulgas ka siirdeprotsesside puhul.

Võrrandeid (14-34) ja aseskeeme joon. 14-3 võib tõlgitseda selliselt, et takistused r_1 ja x_1, r'_2 ja x'_2 või induktiivsused S_1 ja S'_2 on lülitatud mähiste ahelatega järjestikku ning mähiste parameetrid on nende suuruste võrra vähendatud. Selle tulemusena saadakse nn. idealiseeritud trafo, mille aktiivtakistused võrduvad nulliga ja elektromagnetiline sidestus $c = 1$. Tõepoolest, sellise idealiseeritud trafo enda- ja vastastikuse induktsiooni taandatud induktiivtakistused on võrdsed — $x'_{12} = kx_{12}$ ja seetõttu vastavalt seostele (14-12) ja (14-19) $c^2 = 1$ ja $\sigma = 0$.

Tuleb märkida, et nagu järeldub toodud ümberkujundustest, on seosed (14-26) ja kõik järgnevad, aga samuti ka aseskeemid joon. 14-3 õiged ja peegeldavad õigesti kõiki protsesse trafos k

iga väärtuse korral. Matemaatilisest seisukohast lähtudes tähendavad uued ümberkujundused üleminekut muutujatelt $\dot{U}_2$ ja $\dot{I}_2$ võrranditest (14-26) uutele muutujatele $\dot{U}'_2$ ja $\dot{I}'_2$, mis on võimalik igasuguse k korral. Sellega seoses on aga vaja märkida, et induktiivtakistused ja puisteinduktiivsused vastavalt võrrandeile (14-30), (14-31), (14-32), (14-33), (14-36), (14-37) ja (14-38) ei ole üheselt määratavad, vaid sõltuvad ülekandesuhtest k. Kuid jõutrafode ülekandesuhe k on ratsionaalselt määratav võrrandiga (14-20), nagu seda tehakse praktikas ja ka antud raamatus. Mingi teistsuguse k valik on otstarbekas ainult erandjuhtumitel.

Aseskeemi parameetrid. Vaatleme joon. 14-3 toodud aseskeemi parameetreid, kui

$$k=\frac{w_1}{w_2} \quad \text{[vt. võrrand (14-20)]}.$$

Taandatud vastastikune induktiivsus võrrandite (14-6), (14-10) ja (14-38) alusel

$$M'_{12}=kM=kM_s+kM_w=\frac{w_1}{w_2}\cdot\frac{w_1 w_2}{R_{\mu s}}+\frac{w_1}{w_2}M_w$$

või valemi (14-4) alusel

$$M'_{12}=L_{s1}+\frac{w_1}{w_2}M_w. \tag{14-39}$$

Võrrandi (14-39) viimane liige on eelviimasega võrreldes väga väike ja seetõttu võib küllaldase täpsusega võtta

$$M'_{12}\approx L_{s1}. \tag{14-40}$$

Seega, vastavalt võrrandeile (14-15), (14-30), (14-38) ja (14-40)

$$x'_{12}=kx_{12}=\omega kM=\omega M'_{12}\approx\omega L_{s1},$$

või

$$x'_{12}\approx x_{s1}=\frac{\omega w_1^2}{R_{\mu s}}. \tag{14-41}$$

Järelikult on takistus x'_{12} suure täpsusega võrdne südamikus kulgevast voost tekitatud primaarmähise omainduktiivtakistusega.

Aseskeemi joon. 14-3 haru *1-2* nimetatakse magneetivaks haruks. Selles harus kulgev magneetimisvool

$$\dot{I}_M=\dot{I}_1+\dot{I}'_2$$

tekitab trafomähiste resulteeriva magneetimisergutuse

$$F_{res}=w_1(\dot{I}_1+\dot{I}'_2)=w_1\dot{I}_1+w_1\dot{I}'_2=\dot{F}_1+\dot{F}_2,$$

mis omakorda tekitab südamikus resulteeriva voo amplituudiväärtusega Φ_s. Pinge sellel harul vastavalt võrrandile (14-41)

$$\dot{U}_{12}=jx'_{12}(\dot{I}_1+\dot{I}'_2)\approx jx_{s1}(\dot{I}_1+\dot{I}'_2)=j\omega w_1\frac{w_1(\dot{I}_1+\dot{I}'_2)}{R_{\mu s}}=$$

$$=j\omega w_1\frac{\dot{F}_{res}}{R_{\mu s}}=j\omega w_1\frac{\dot{\Phi}_s}{\sqrt{2}}=j\pi\sqrt{2}fw_1\dot{\Phi}_s=-\dot{E}_1$$

on seega suuruselt võrdne ja vastasmärgiline elektromotoorjõuga $\dot{E}_1$, mille trafosüdamiku resulteeriv voog (põhivoog) indutseerib primaarmähises, jäädes viimasest faasis maha 90°.

Primaarmähise puisteinduktiivsus, vastavalt võrrandeile (14-9), (14-10) ja (14-36), avaldub:

$$S_1=L_{11}-kM=L_{1s}+L_{1w}-kM_s-kM_w.$$

Kuid võrrandi (14-4) ja (14-6) alusel

$$L_{1S}-kM_S=\frac{w_1^2}{R_{\mu s}}-\frac{w_1}{w_2}\cdot\frac{w.w_2}{R_{\mu s}}=0.$$

Seetõttu

$$S_1=L_{1w}-\frac{w_1}{w_2}M_w. \qquad (14\text{-}42)$$

Analoogiliselt, vastavalt võrrandeile (14-9), (14-10) ja (14-37),

$$S_2=L_{22}-\frac{M}{k}=L_{2s}+L_{2w}-\frac{M_s}{k}-\frac{M_w}{k}.$$

Kuid võrrandite (14-5) ja (14-6) alusel

$$L_{2s}-\frac{M_s}{k}=\frac{w_2^2}{R_{\mu s}}-\frac{w_2}{w_1}\cdot\frac{w_1\cdot w_2}{R_{\mu s}}=0$$

ja seetõttu

$$\left.\begin{aligned} S_2&=L_{2w}-\frac{w_2}{w_1}M_w;\\ S'_2&=\frac{w_1^2}{w_2^2}S_2=\frac{w_1^2}{w_2^2}L_{2w}-\frac{w_1}{w_2}M_w. \end{aligned}\right\} \qquad (14\text{-}43)$$

Seega määratakse siis puisteinduktiivsused S_1, S_2 ja S'_2 ning puisteinduktiivtakistused

$$x_1=\omega S_1,\quad x_2=\omega S_2,\quad x'_2=\omega S'_2. \qquad (14\text{-}44)$$

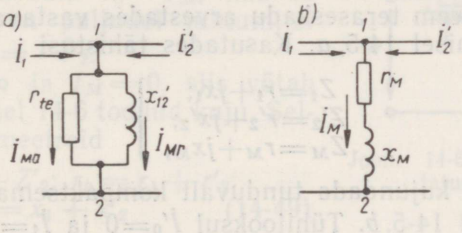
ülekandesuhte $k=\frac{w_1}{w_2}$ korral ainult magnetvoogudega, mis sulguvad osaliselt läbi õhu. Kuid siiski ei saa piirduda ainult võrrandite (14-42) ja (14-43) esimeste liikmetega, teisi liikmeid arvesta-

mata, ja seetõttu võime läbi õhu sulguvaid vooge ainult tinglikult puistevoogudeks nimetada.

Teraseskadu arvestav aseskeem. Teraseskadu trafo südamikus p_{te} on antud sageduse korral võrdeline järgmiste suurustega:

$$p_{te} \sim B_s^2 \sim \Phi_s^2 \sim E_1^2.$$

Järelikult on teraseskadu p_{te} võrdeline aseskeemi joon. 14-3, *a* magneetiva haru klemmidele *1-2* rakendatud pinge U_{12} ruuduga. Kui neile klemmidele rööbiti $x'_{12} = x_{1s}$-ga lülitada aktiivtakistus



Joon. 14-4. Teraseskadu arvestav aseskeemi magneetiv ahel

r_{te}, nagu näidatud joonisel 14-4, *a*, siis kadu selles takistis on samuti võrdeline U_{12}^2-ga. Selle takistuse r_{te} suuruse võib valida nii, et kadu temas võrduks teraseskaoga trafos

$$p_{te} = \frac{m_1 U_{12}^2}{r_{te}} = \frac{m_1 E_1^2}{r_{te}}.$$

Siit

$$r_{te} = \frac{p_{te}}{m_1 E_1^2}. \qquad (14\text{-}45)$$

Kao p_{te} suuruse võib määrata arvutuslikult (vt. § 13-2) või katseliselt.

Magneetimisvool $\dot{I}_M = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2$

jaguneb magneetiva ahela (joon. 14-4, *a*) kahe haru vahel aktiivvooluks I_{Ma} ja reaktiivvooluks I_{Mr} (vt. § 13-2), millest esimene määrab teraseskao suuruse, teine aga tekitab magnetvoo trafo südamikus.

Arvutada on aseskeemi alusel mugavam, kui asendada rööpskeem joon. 14-4, *a* jadaskeemiga joon. 14-4, *b*. Selle jadaahela takistus

$$Z_M=\frac{r_{te}jx'_{12}}{r_{te}+jx'_{12}}=\frac{r_{te}x'^2_{12}}{r^2_{te}+x'^2_{12}}+j\frac{r^2_{te}x'_{12}}{r^2_{te}+x'^2_{12}}=r_M+jx_M. \qquad (14\text{-}46)$$

Et $r_{te} \gg x_{12}$, siis

$$r_M \approx \frac{x^2_{12}}{r_{te}}; \qquad x_M \approx x'_{12} \approx x_{s1}. \qquad (14\text{-}47)$$

Südamiku küllastuse suurenedes, s. o. voo Φ_s, E_1 või U_1 suurenedes, kui $f=\text{const}$, takistus x'_{12} väheneb. Sealjuures ainult r_M väheneb, aga $r_{te} \approx \text{const}$.

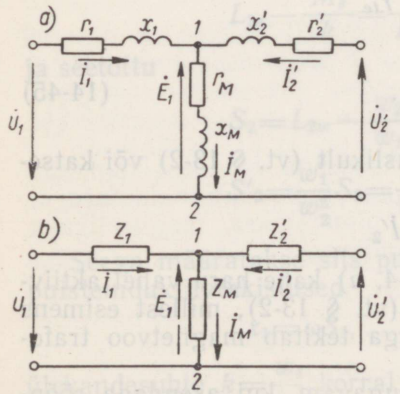
Trafo aseskeem teraseskadu arvestades vastavalt joon. 14-4, *b* on toodud joonisel 14-5, *a*. Kasutades tähistusi

$$\left.\begin{aligned} Z_1&=r_1+jx_1;\\ Z'_2&=r'_2+jx'_2;\\ Z_M&=r_M+jx_M, \end{aligned}\right\} \qquad (14\text{-}48)$$

võib aseskeemi kujundada tunduvalt kompaktsemalt, nagu see on toodud joonisel 14-5, *b*. Tühijooksul $\dot{I}'_0=0$ ja $\dot{I}_1=\dot{I}_M$, mis võrdub antud juhul trafo tühijooksuvooluga $\dot{I}_0$.

Resultaadina kujunes lihtne *T*-kujuline trafo aseskeem, mis kujutab endast passiivset neliklemmi. Selle skeemi magneetiva haru takistus Z_M peegeldab nähteid ferromagnetilises südamikus. Z_M on tunduvalt suurem takistustest Z_1 ja Z'_2, mille moodustavad mähiste aktiiv- ja puisteinduktiivtakistused. Jõutrafode korral suhtelised takistused

$$z_{M*}=10\ldots50;$$
$$z_{1*} \approx z'_{2*}=0{,}025\ldots0{,}10.$$



Joon. 14-5. Kahe mähisega trafo teraseskadu arvestav aseskeem

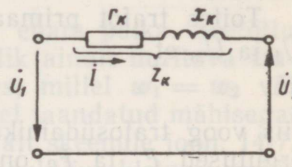
Trafo pingevõrrandid ja aseskeemi võib esitada ka suhtelistes suurustes. Võttes arvesse, et

$$U_N=Z_NI_N,$$

võib võrrandite (14-34) vasakpoolseid liikmeid jagada U_N-ga ja parempoolseid Z_NI_N-ga, millega toimubki üleminek suhtelistele suurustele. Aseskeemis võib samuti U, I, r, x ja Z absoluutväärtused asendada suhtelistega. Sel juhtumil võib trafo tööreżiimide arvutused läbi viia suhtelistes suurustes.

Ei ole raske näha, et sekundaarahela takistuste, voolude ja pingete suhtelised väärtused sõltuvad sellest, millist suhte k väärtust kasutati sekundaarmähise taandamisel primaarmähisele. See selgusetus kaob, kui määrata k alati ühel viisil. Näiteks jõutrafodel võetakse alati $k=\frac{w_1}{w_2}$.

Lihtsustatud aseskeem. Et $Z_M \gg Z_1 \approx Z'_2$, siis võib paljudel juhtumitel võtta $Z_M=\infty$, mis sisuliselt tähendab aseskeemi joon. 14-5 magneetiva haru katkestamist. Kui $Z_M=\infty$, siis $\dot{I}_M=0$. Sellise lihtsustuse korral jätame arvestamata tühijooksuvoolu $\dot{I}_0=\dot{I}_M$, mis ta väiksuse tõttu on paljudel juhtumitel lubatav. Siis $\dot{I}_1=-\dot{I}'_2$.



Joon. 14-6. Trafo lihtsustatud aseskeem

Kui $Z_M=\infty$ ja $I_M=0$, siis võtab aseskeem joonisel 14-6 toodud kuju. Selle skeemi parameetreid

$$Z_k=Z_1+Z'_2;\ r_k=r_1+r'_2;\ x_k=x_1+x'_2 \qquad (14\text{-}49)$$

nimetatakse vastavalt lühise näiv-, aktiiv- ja induktiivtakistusteks (vt. samuti § 14-5). Niisugused nimetused on õigustatud sellega, et trafo sekundaarmähise lühistamisele vastab aseskeemi sekundaarklemmide (parempoolsete) lühistamine joon. 14-6, mistõttu trafo lühisetakistus võrdubki Z_k-ga.

Aseskeem joon. 14-6 on äärmiselt lihtne. Vastavalt sellele skeemile on trafo ekvivalentne takistusega Z_k.

14-4. TRAFO ASESKEEMI PARAMEETRITE ARVUTUSLIK MÄÄRAMINE

Aseskeemi parameetreid võib määrata kas arvutuslikult või katseliselt.

Mähiste aktiivtakistused on mähiseandmete olemasolu korral lihtsalt arvutatavad, teades lisaks ka voolu väljatõrjetegurit, mis arvestab aktiivtakistuse suurenemist pinnaefekti mõjul (vt. § 12-3). Harilikult on selle teguri väärtused piires 1,005 ... 1,05.

Magneetiva ahela parameetrid on lihtsalt määratavad magnetahela arvutuse andmetest (vt. § 13-2). Takistus r_{te} aseskeemis joon. 14-4, *a* oli juba määratud § 14-3 [vt. võrrand (14-15)].

Selleks, et leida antud E_1-le vastavat x'_{12} väärtust [vt. valemit (12-3)], on vaja määrata voog Φ_s, edasi magneetimisergutus F ja lõpuks valemite (13-3) või (13-6) abil vool I_{0r}. Siis

$$x'_{12}=\frac{E_1}{I_{0r}}.$$

Seejärel võib kasutada valemeid (14-46) ja (14-47).

Vastulülitusmeetod. Tingituna magnetväljade keerukast konfiguratsioonist õhus, on kõige raskem just puisteinduktiivtakistuste x_1 ja x'_2 määramine. Liiatigi on nende parameetrite täpne määramine väga tähtis (vt. § 14-1). Vaadeldes aseskeemi joon. 14-5, *a*, nähtub, et selle skeemi parameetrite x_1 ja x'_2 mõju trafo ekspluatatsiooninäitajatele ja karakteristikutele on palju suurem kui magneetiva ahela parameetritel.

Parameetrite x_1 ja x'_2 määramiseks kasutatakse saksa elektrotehniku V. Rogovski poolt 1909. a. väljatöötatud nn. vastulülitusmeetodit.

Toites trafot primaar- ja sekundaarpoolelt selliste pingetega $\dot{U}_1$ ja $\dot{U}_2$, et

$$\dot{I}_M = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = 0, \tag{14-50}$$

siis voog trafosüdamikus $\Phi_s = 0$ ja $E_1 = E'_2 = 0$. Magneetimisergutused F_1 ja F_2 on sel puhul võrdsed ja vastasfaasis, kust pärinebki meetodi nimetus.

Siinjuures, vastavalt võrrandeile (14-34) ja aseskeemidele joon. 14-3 ja 14-5,

$$\dot{U}_1 = r_1\dot{I}_1 + jx_1\dot{I}_1 = Z_1\dot{I}_1 \tag{14-51}$$

ja

$$-\dot{U}'_2 = r'_2\dot{I}'_2 + jx'_2\dot{I}'_2 = Z'_2\dot{I}'_2 \tag{14-52}$$

või

$$-\dot{U}'_2 = r_2\dot{I}_2 + jx_2\dot{I}_2 = Z_2\dot{I}_2. \tag{14-53}$$

Toodud võrrandeist (14-51) ja (14-53) järeldub, et kui sellise vastulülituse korral mõõta U_1, U_2, I_1, I_2 ja primaar- ning sekundaarmähistesse juhitud aktiivvõimsusi P_1 ja P_2, saab määrata parameetrid

$$z_1 = \frac{U_1}{I_1}; \qquad z_2 = \frac{U_2}{I_2};$$

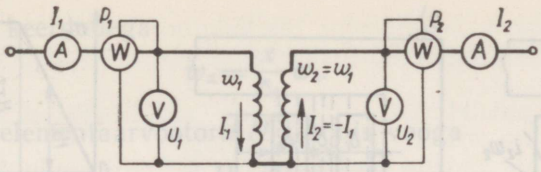
$$r_1 = \frac{P_1}{mI_1^2}; \qquad r_2 = \frac{P_2}{mI_2^2}$$

ja lõpuks ka puistetakistused

$$x_1 = \sqrt{z_1^2 - r_1^2}; \qquad x^2 = \sqrt{z_2^2 - r_2^2}.$$

Eeltoodust järeldub, et vastulülituse korral eksisteerivad trafos ainult puistevood.

Sellise vastulülitusrežiimi teostamine praktikas, kui $w_1 \neq w_2$, on peaaegu võimatu, sest väga raske on küllaldase täpsusega täita nõuet (14-50). Selle nõude mittetäpse täitmise korral tekib südamikus tunduv, puistevoogudega Φ_w suuruselt võrreldav voog Φ_s



Joon. 14-7. Vastulülituskatse skeem

ning võrrandid (14-51) ja (14-53) ei pea enam paika. Seetõttu on selle katse läbiviimine praktikas võimalik ainult uuritava trafoga geomeetriliselt sarnase maketi juures, millel $w_1 = w_2$ või siis ta tegeliku sekundaarmähise asendamisel taandatud mähisega. Niisugusel juhul võib katse läbi viia vastavalt skeemile joon. 14-7. Vastulülitusmeetodi idee on kõigi puisteinduktiivtakistuste määramise arvutusmeetodite aluseks.

Puisteinduktiivtakistuste arvutamine iga mähise kohta eraldi on väga raske. Seetõttu arvutatakse harilikult nende takistuste summa, lähtudes magnetvälja pildist vastulülitusrežiimis, millal

$$i_1 w_1 + i_2 w_2 = (i_1 + i'_2) w_1 = 0.$$

Joonisel 14-8, *a* on kujutatud trafosüdamiku aknasse paigutatud kontsentriliste mähiste läbilõige ja nende poolt vastulülitusrežiimis tekitatava magnetvälja pilt. Selle tegeliku väljapildi võib asendada idealiseeritud väljapildiga (joon. 14-8, *b*), kus kõik magnetjooned on vertikaalsed ja nende arvutuslik pikkus ikete vahel l_σ on veidi suurem mähise kõrgusest l, s. t.

$$l_\sigma = \frac{l}{k_R}, \qquad (14\text{-}54)$$

kus $k_R = 0{,}93 \ldots 0{,}98$ kujutab endast nn. Rogovski tegurit.

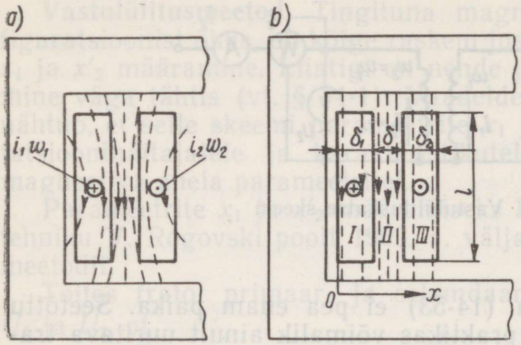
Määrame väljatugevuse jaotuse seaduspärasuse x telje suunas joonisel 14-8, *b*.

Kasutame koguvooluseadust

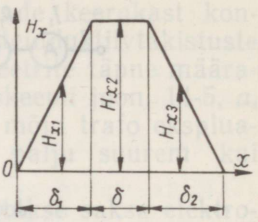
$$\oint \mathbf{H}\, \mathrm{d}\mathbf{l} = \Sigma i$$

I tsoonis oleva magnetjoone jaoks $(0 \leqslant x \leqslant \delta_1)$. Terase jaoks võime võtta $\mu_{te} = \infty$ ja vastavalt sellele $H_{te} = 0$. Seega ringintegraal võrdub $H_{x1} l_\delta$ ja vaadeldav magnetjoon aheldub vooluga

$$\Sigma i = w_1 i_1 \frac{x}{\delta_1}.$$



Joon. 14-8. Vastulülitusrežiimis trafo magnetväljade pilt



Joon. 14-9. Magnetilise puistevälja tugevuse kõver $H_x = f(x)$

Seega

$$H_{x1} = \frac{w_1 i_1}{l_\sigma} \cdot \frac{x}{\delta_1}.$$

II tsooni ($\delta_1 \leqslant x \leqslant \delta_1 + \delta$) jaoks on $\Sigma i = w_1 i_1$ ja seega

$$H_{x2} = \frac{w_1 i_1}{l_\sigma}.$$

III tsooni ($\delta_1 + \delta \leqslant x \leqslant \delta_1 + \delta + \delta_2$) jaoks saame

$$\Sigma i = w_1 i_1 + w_2 i_2 \frac{x - \delta_1 - \delta}{\delta_2} = w_1 i_1 - \frac{x - \delta_1 - \delta}{\delta_2} w_1 i_1,$$

järelikult

$$H_{x3} = \frac{w_1 i_1}{l_\sigma} \cdot \frac{\delta_1 + \delta + \delta_2 - x}{\delta_2}. \qquad (14\text{-}57)$$

Väljatugevuse H_x muutumine x telje suunas on graafiliselt toodud joonisel 14-9.

Erinevate mähistega joon. 14-8 ahelduvate magnetjoonte vahelist täpset piiri on raske määrata. Seetõttu ei ole võimalik ka x_1 ja x_2' eraldi määrata. Võib aga arvutada summa $x_1 + x'_2$ ja sel juhul ei ole selle piirjoone asukohal tähtsust. Leppeliselt paigutatakse piirjoon *II* tsooni keskele (joon. 14-8, *b*)

Jätame arvestamata diameetri muutuse x telje suunas ja paigutame arvutustesse kahe mähise keskmise diameetri D_k. Sel juhul elementaarvootoru *I* tsoonis koordinaadiga x sisaldab voogu

$$\mu_0 H_{x1} \pi D_k \, dx,$$

mis aheldub keerdudega

$$w_x = \frac{x}{\delta_1} w_1.$$

Samal ajal elementaarvootoru *II* tsoonis vooga

$$\mu_0 H_{x2} \pi D_k \, dx$$

aheldub keerdudega w_1. Seetõttu avaldub *I* tsoonis aheldusvoog võrrandite (14-55) ja (14-56) alusel järgnevalt:

$$\Psi_1 = \int_0^{\delta_1} \frac{x}{\delta_1} w_1 \mu_0 \frac{w_1 i_1}{l_\sigma} \pi D_k \, dx + \int_{\delta_1}^{\delta_1+\delta/2} w_1 \mu_0 \frac{w_1 i_1}{l_\sigma} \pi D_k \, dx =$$

$$= \frac{\mu_0 w_1^2 i_1 \pi D_k}{l_\sigma} \left(\frac{\delta_1}{3} + \frac{\delta}{2} \right).$$

Olgu sekundaarmähis taandatud primaarmähisele. Sel juhul saame tema jaoks analoogiliselt eeltoodule

$$\Psi'_2 = \frac{\mu_0 w_1^2 i_1 \pi D_k}{l_\sigma} \left(\frac{\delta_2}{3} + \frac{\delta}{2} \right).$$

Puisteinduktiivtakistuste summaks

$$x_k = x_1 + x'_2 = 2\pi f (S_1 + S'_2) = 2\pi f \frac{\Psi_1 + \Psi'_2}{i_1}$$

saame eeltoodud seoste ja võrrandi (14-54) alusel

$$x_k = x_1 + x'_2 = 2\pi f \mu_0 w_1^2 \frac{\pi D_k k_R}{l} \left(\delta + \frac{\delta_1 + \delta_2}{3} \right). \qquad (14\text{-}58)$$

Suurust

$$\delta' = \delta + \frac{\delta_1 + \delta_2}{3} \qquad (14\text{-}59)$$

nimetatakse mähistevahelise õhupilu taandatud laiuseks.

Seosest (14-58) on näha puisteinduktiivtakistuste sõltuvus mähiste geomeetrilistest mõõtmetest. Südamiku läbimõõdu D_s suurendamine konstantse induktsiooni korral (B_s = const) suurendab voogu südamikus ja w_1 ning l vähenevad võrdeliselt D_s^2-ga. Suurus D_k väheneb samuti ning koos sellega ka puisteinduktiivtakistus. Kui etteantud võimsusega trafo projekteerimisel on südamiku ristlõige juba valitud, siis on sellega määratud ka suurus D_k, keerdude arv w_1 ja mähiste ristlõiked $l\delta_1 = l\delta_2$. Kui sealjuures valida l suurem ja δ_1 ning δ_2 väiksemad, siis puiste väheneb, ja vastupidi. Kahe mähise vaheline kaugus δ valitakse,

lähtudes mähiste isolatsiooni läbilöögitugevusest vastavalt nimipingetele. Nimipingete suurenemisega suureneb δ ja vastavalt ka puiste.

Valemid puisteinduktiivtakistuste arvutamiseks ketasmähiste korral saadakse analoogiliselt eeltooduga.

Eespool oli toodud magnetvälja ja puisteinduktiivtakistuste arvutus lihtsaima trafo kohta, milles mähise koguvool iw jagunes ühtlaselt piki kogu sammast.

Keerulisemate juhtude korral muutuvad vastavad arvutused tunduvalt keerukamaiks.

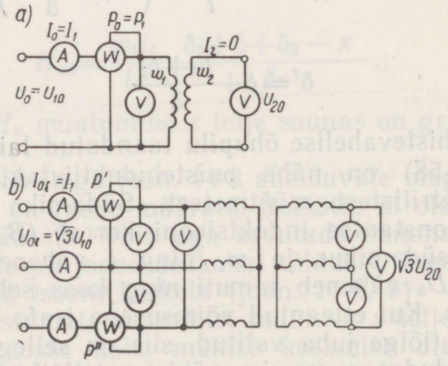
Nõukogude Liidus on põhjalikke uurimusi trafode magnetväljade ja puisteinduktiivtakistuste alal teinud G. N. Petrov, E. G. Markvardt, E. A. Mankin jt.

14-5. TRAFO ASESKEEMI PARAMEETRITE KATSELINE MÄÄRAMINE

Tühijooksukatse. Trafo aseskeemi parameetreid saab määrata ta tühijooksu- ja lühisekatse andmete alusel.

Kahe mähisega ühefaasilise ($m = 1$) ja kolmefaasilise ($m = 3$) trafo lülitusskeemid tühijooksukatseks on toodud joonisel 14-10. Trafo primaarmähis on lülitatud siinuspingele ja sekundaarahel on avatud. Mõõdetakse primaarpinget $U_0 = U_{10}$, voolu $I_0 = I_1$, võimsust $P_0 = P_1$ ja sekundaarpinget U_{20}.

Ühefaasilise trafo tühijooksukatse andmetest määratakse ta näiv-, aktiiv- ja induktiivtakistus tühijooksul.



Joon. 14-10. Kahe mähisega ühefaasilise (*a*) ja kolmefaasilise (*b*) trafo tühijooksukatse skeemid

$$z_0=\frac{U_0}{I_0}; \quad r_0=\frac{P_0}{I_0^2}; \quad x_0=\sqrt{z_0^2-r_0^2}, \tag{14-60}$$

samuti ülekandesuhe

$$k=\frac{w_1}{w_2}\approx\frac{U_{10}}{U_{20}} \tag{14-61}$$

ja võimsustegur

$$\cos\varphi_0=\frac{P_0}{U_0 I_0}. \tag{14-62}$$

Kolmefaasilise trafo korral määratakse kolme voltmeetri ja kolme ampermeetri näitude alusel liinipingete ja -voolude aritmeetilised keskmised U_{0l} ja I_{0l} ning vattmeetrite näitude alusel kolme faasi tühijooksuvõimsus $P_0=P'+P''$. Füüsikalist sisu omab ainult ühe faasimähise takistuse määramine. Seetõttu tuleb tingimata arvestada mähiste ühendusskeemi. Kui primaarmähis on ühendatud tähte, siis

$$z_0=\frac{U_{0l}}{\sqrt{3}\,I_{0l}}; \quad r_0=\frac{P_0}{3I_{0l}^2}; \quad x_0=\sqrt{z_0^2-r_0^2}, \tag{14-63}$$

kuid kolmnurklülituse puhul

$$z_0=\frac{\sqrt{3}\,U_{0l}}{I_{0l}}; \quad r_0=\frac{P_0}{I_{0l}^2}; \quad x_0=\sqrt{z_0^2-r_0^2}. \tag{14-64}$$

Tühijooksu võimsustegur

$$\cos\varphi_0=\frac{P_0}{\sqrt{3}\,U_{0l}I_{0l}}. \tag{14-65}$$

Kolmefaasiliste trafode ülekandesuhte võib määrata kas liinipingete või faasipingete kaudu (vastavalt k_l ja k). Trafode teoorias omab tähtsust ainult teisena näidatud ülekandesuhte väärtus.

On otstarbekas määrata eeltoodud takistuste suhtelised väärtused:

$$z_{0*}=\frac{z_0 I_N}{U_N}; \quad r_{0*}=\frac{r_0 I_N}{U_N}; \quad x_{0*}=\frac{x_0 I_N}{U_N}. \tag{14-66}$$

Siin I_N ja U_N on nimifaasivool ja -pinge.

Nimitakistus, mis antud juhul on võetud ühikuks, leitakse järgmiselt:

$$z_N=\frac{U_N}{I_N}. \tag{14-67}$$

Jõutrafode korral, kui $U_0 = U_N$, on tavaliselt $z_{0*} \approx x_{0*} = 10 \ldots 50$ ja $r_{0*} = 1{,}0 \ldots 5{,}0$. Teisena näidatud väärtused kuuluvad võimsaile trafodele.

Trafo aseskeemi (joon. 14-5) vaadeldes selgub, et $I'_2 = 0$ juures tühijooksuparameetrid z_0, r_0 ja x_0 kujutavad endast järgmiste takistuste summasid:

$$z_0 = |Z_1 + Z_M|; \quad r_0 = r_1 + r_M; \quad x_0 = x_1 + x_M. \tag{14-68}$$

Jõutrafodes on takistused r_1 ja x_1 kümneid ja sadu kordi väiksemad takistustest r_M ja x_M. Seetõttu võib tühijooksuparameetrid küllaldase täpsusega lugeda võrdseks magneetiva haru parameetritega, s. o.

$$z_0 \approx Z_M; \quad r_0 \approx r_M; \quad x_0 \approx x_M. \tag{14-69}$$

Samal põhjusel võib ka tühijooksuvõimsuse P_0 küllalt suure täpsusega trafosüdamiku teraseskaoga võrdseks lugeda.

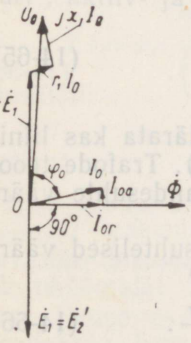
Tühijooksul, vastavalt aseskeemile joon. 14-5

$$\dot{U}_0 = Z_1 \dot{I}_0 + Z_M \dot{I}_0 = Z_1 \dot{I}_0 + (-\dot{E}_1) \tag{14-70}$$

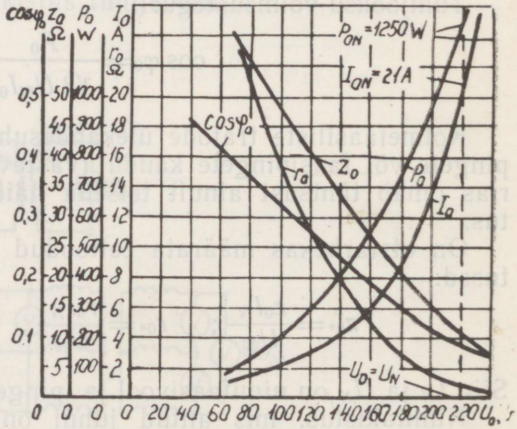
või siis, et $Z_1 \ll Z_M$, saame küllaldase täpsusega

$$\dot{U}_0 \approx -\dot{E}_1; \quad U_0 \approx E_1. \tag{14-71}$$

Tühijooksupinge võrrandile (14-70) vastab trafo tühijooksu vektordiagramm joonisel 14-11. Tingituna induktiivtakistuse ülekaalust pinge $U_0 = U_N$ juures on võimsustegur $\cos\varphi \leqslant 0{,}1$.



Joon. 14-11. Trafo tühijooksu vektordiagramm



Joon. 14-12. Trafo tühijooksukarakteristikud ühenduses Y/Y$_0$; 240 kVA; 3150/380 V alampinge poolelt mõõdetuna

Et $r_1 \ll r_M$, siis kujutab tühijooksukadu endast praktiliselt teraseskadu trafosüdamikus koos pöörisvoolukaoga õlipaagi seintes tühijooksurežiimil.

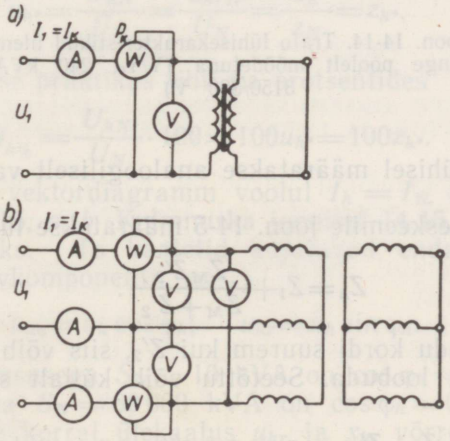
Tühijooksukatse viiakse harilikult läbi rea U_0 väärtuste juures: $U_0 \approx 0{,}3U_N$ kuni $U_0 \approx 1{,}1U_N$, ning saadud mõõtmistulemuste alusel ehitatakse tühijooksukarakteristikud. Viimased kujutavad endast seoseid I_0, P_0, z_0, r_0, $\cos\varphi_0 = f(U_0)$, mis on toodud joon. 14-12. Pinge U_0 suurendamisega kasvab südamiku küllastus, mistõttu I_0 suureneb kiiremini kui U_0. Seetõttu vähenevad koos U_0 kasvuga parameetrid z_0 ja x_0. Et $P_0 \sim E^2 \sim U^2$ ja $I_0{}^2$ kasvab kiiremini kui $U_0{}^2$, siis r_0 väheneb samuti koos U_0 kasvuga. Tühijooksukarakteristikutest määratakse vastavate suuruste väärtused $U_0 = U_N$ korral.

Lühisekatse viiakse läbi vastavalt skeemidele joon. 14-13. Sekundaarmähised lühistatakse ja primaarmähistele lülitatakse trafo ülekuumenemise ning riknemise vältimiseks madalam pinge, mille suurus valitakse sellise arvestusega, et vool jääks nimivoolu piiridesse.

Lühise näivtakistus z_k, reaktiivtakistus x_k ja aktiivtakistus r_k arvutatakse analoogiliselt vastavate tühijooksutakistustega.

Ühefaasilise trafo korral

$$z_k = \frac{U_k}{I_k}; \quad r_k = \frac{P_k}{I_k^2}; \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}. \qquad (14\text{-}72)$$



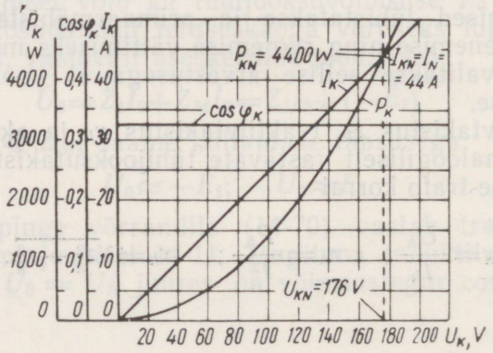
Joon. 14-13. Kahe mähisega ühefaasilise (*a*) ja kolmefaasilise (*b*) trafo lühisekatse skeemid

Kolmefaasilise trafo korral määratakse mõõteriistade näitude alusel liinipinge ja liinivoolu keskmised väärtused $U_{k\,l}$ ja $I_{k\,l}$ ning kolmefaasilise lühise võimsus P_k. Primaarmähise tähtühenduse korral faasi lühiseparameetrid:

$$z_k = \frac{U_{k\,l}}{\sqrt{3}\,I_{k\,l}}; \quad r_k = \frac{P_k}{3I_{k\,l}^2}; \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} \tag{14-73}$$

ja kolmnurkühenduse korral:

$$z_k = \frac{\sqrt{3}\,U_{k\,l}}{I_{k\,l}}; \quad r_k = \frac{P_k}{I_{k\,l}^2}; \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}. \tag{14-74}$$



Joon. 14-14. Trafo lühisekarakteristikud ülempinge poolelt mõõdetuna (Y/Y$_n$; 240 kVA; 3150/380 V)

Võimsustegur lühisel määratakse analoogiliselt valemiga (14-62) ja (14-65).

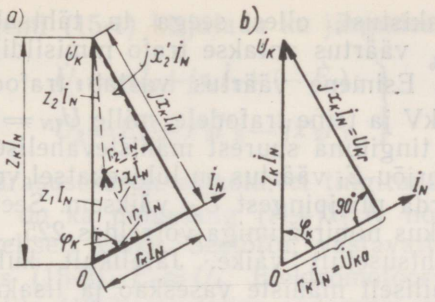
Vastavalt aseskeemile joon. 14-5 määratakse lühisetakistus

$$Z_k = Z_1 + \frac{Z_M Z'_2}{Z_M + Z'_2}. \tag{14-75}$$

Et Z_M on sadu kordi suurem kui Z'_2, siis võib valemi (14-75) nimetajas Z'_2-st loobuda. Seetõttu võib küllalt suure täpsusega kirjutada

$$Z_k = Z_1 + Z'_2; \quad r_k = r_1 + r'_2; \quad x_k = x_1 + x'_2. \tag{14-76}$$

Need seosed vastavad lihtsustatud aseskeemile joon. 14-6, kui seal sekundaarklemmid lühistada ($U'_2 = 0$).



Joon. 14-15. Trafo vektordiagrammid lühisel, kui $I_k = I_N$

Et x_1 ja x_2 suurused sõltuvad õhus kulgevatest voogudest, siis nende ja samuti ka z_k suurus ei sõltu U_k-st ja I_k-st. Trafo lühisekarakteristikud on toodud joonisel 14-14.

Märgime, et aseskeemide kasutamisel võib kõik arvutused läbi viia suhtelistes suurustes. Selleks on küllaldane kujutleda, et neis skeemides kõik suurused U, I, r, x ja z on väljendatud suhtelistes suurustes.

Pinge $U_k = U_{kN}$, mille juures lühisevool võrdub nimivooluga: $I_k = I_N$, nimetatakse lühisepingeks ja tähistatakse u_k. Lühisepinge u_k suhteline väärtus võrdub lühisetakistuse suhtelise väärtusega:

$$u_{k*} = \frac{U_{kN}}{U_N} = \frac{z_k I_N}{U_N} = \frac{z_k}{z_N} = z_{k*}. \qquad (14\text{-}77)$$

Suurus u_k antakse praktikas tihti ka protsentides

$$u_{k\%} = \frac{U_{kN}}{U_N} \cdot 100 = 100 u_{k*} = 100 z_{k*}. \qquad (14\text{-}78)$$

Trafo lühise vektordiagramm voolul $I_k = I_N$ on kahel kujul toodud joon. 14-15, *a*, *b*. Kolmnurka joonisel 14-15, *b* nimetatakse lühisekolmnurgaks. Ta kaatetid kujutavad endast lühisepinge aktiiv- ja reaktiivkomponenti:

$$u_{ka} = u_k \cos \varphi_k; \qquad u_{kr} = u_k \sin \varphi_k. \qquad (14\text{-}79)$$

Trafodel võimsusega $S_N = 10$ kVA on $\cos \varphi_k \approx 0{,}65$, kuid trafodel võimsusega $S_N = 60\,000$ kVA on $\cos \varphi_k \approx 0{,}05$. Seega on võimsate trafode korral ülekaalus u_{kr} ja x_k, võrreldes u_{ka} ja r_k väärtustega. On silmanähtav, et $u_{ka*} = r_{k*}$ ja $u_{kr*} = x_{k*}$. Suurus u_{ka*} taandatakse mähise temperatuurile 75 °C.

Vastavalt eeltoodule iseloomustab lühisepinge trafo aktiiv- ja

puisteinduktiivtakistust, olles seega ta tähtsaks parameetriks. Lühisepinge $u_{k\%}$ väärtus antakse trafo nimisildil. Jõutrafodes on $u_{k\%} = 5{,}5 \ldots 15$. Esimene väärtus vastab trafodele nimiliinipingega $U_{lN} \leqslant 10$ kV ja teine trafodele, mille $U_{lN} = 500$ kV. Viimaste puiste on suur tingituna suurest mähistevahelisest kaugusest.

Elektromotoorjõu E_1 väärtus on lühisekatsel voolu $I_k = I_N$ korral 15...30 korda nimipingest U_N väiksem. Seetõttu on ka teraseskadu südamikus nimirežiimiga võrreldes 225...900 korda väiksem, seega tähtsusetult väike. Järelikult kulutatakse lühisevõimsus P_k põhiliselt mähiste vaseskao ja lisakadude katmiseks, mida põhjustavad paagi seintes ja kinnitusdetailides tekkivad puistevood. Seega ka $r_k = r_1 + r'_2$, määratuna lühisekatsest, on ekvivalentne takistus, mis arvestab ka neid lisakadusid.

Kui lühis tekib nimiprimaarpingel, siis

$$I_k = \frac{U_N}{z_k}$$

või suhtelistes suurustes

$$I_{k*} = \frac{1}{z_{k*}} = \frac{100}{u_{k\%}}.$$

Kui näiteks $u_{k\%} = 10\%$, siis $I_k = 10\ I_N$.

Viieteistkümnes peatükk

TRAFO TÖÖ KOORMUSEL

15-1. TRAFO KOORMUSREŽIIMI FÜÜSIKALINE OLEMUS, VEKTOR- JA ENERGEETILISED DIAGRAMMID

Trafo koormusrežiimi uurimisel võtame vaatluse alla ühefaasilise trafo või sümmeetriliselt koormatud kolmefaasilise trafo ühe faasi. Mittesümmeetriliselt koormatud kolmefaasilist trafot analüüsitakse eraldi. Eeldame, et primaarpinge $U_1 = \text{const}$ ja sagedus $f = \text{const}$.

Trafo töö füüsikaline olemus. Joonisel 14-5 kujutatud aseskeemi alusel võime trafo pingevõrrandid kirjutada kujul:

$$\left.\begin{aligned} \dot{U}_1 &= r_1\dot{I}_1 + jx_1\dot{I}_1 + Z_M(\dot{I}_1 + \dot{I}'_2) \\ -\dot{U}_2 &= r'_2\dot{I}'_2 + jx'_2\dot{I}'_2 + Z_M(\dot{I}_1 + \dot{I}'_2), \end{aligned}\right\} \qquad (15\text{-}1)$$

kusjuures

$$Z_M(\dot{I}_1 + \dot{I}'_2) = Z_M\dot{I}_M = -\dot{E}_1.$$

Seetõttu võib valemi (15-1) kirjutada ka järgmisel kujul:

$$\left.\begin{aligned}\dot{U}_1 &= r_1\dot{I}_1 + jx_1\dot{I}_1 + (-\dot{E}_1);\\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_1 - r'_2\dot{I}'_2 - jx'_2\dot{I}'_2.\end{aligned}\right\} \quad (15\text{-}2)$$

Trafo töö iseärasuseks on asjaolu, et tingituna r_1 ja x_1 suhtelisest väiksusest on ka pingelang $(r_1+jx_1)\dot{I}_1$ normaalkoormuste diapasoonis suhteliselt väike. Seetõttu, vastavalt esimesele võrrandile süsteemis (15-2) $\dot{E}_1 \approx \dot{U}_1$. Elektromotoorjõud $\dot{E}_1$ on aga vastavalt võrrandile (12-3) võrdeline südamiku magnetvooga Φ_s. Järelikult on voo suurus põhiliselt määratud primaarpingega

$$\Phi_s \approx \frac{U_1}{4{,}44fw_1} \quad (15\text{-}3)$$

ja kui $U_1 = \text{const}$, siis ka $\Phi_s = \text{const}$.

Trafo tarbib tühijooksul võrgust sellist voolu $I_1 = I_0$, mis tekitab toitepingele U_1 vastava magnetvoo. Voog Φ_s on alati nii suur, et selle poolt indutseeritud elektromotoorjõud E_1 koos pingelanguga Z_1I_1 tasakaalustab vastavalt võrrandile (15-2) pinge U_1.

Kui sekundaarmähisele lülitatakse koormus, tekib selles mähises vool $\dot{I}_2$. Sekundaarne magneetimisergutus $w_2\dot{I}_2 = w_1\dot{I}'_2$ püüab tekitada südamikus oma voo ja muuta seega tühijooksul eksisteerinud voogu. Kuid nagu eespool oli märgitud, konstantse U_1 korral see voog oluliselt muutuda ei saa. Seetõttu tarbib primaarmähis võrgust peale magneetimisvoolu $\dot{I}_M$ veel sellise suurusega lisavoolu $\dot{I}'_1$, et selle poolt tekitatav magneetimisergutus $w_1\dot{I}'_1$ tasakaalustaks magneetimisergutuse $w_2\dot{I}_2$. Seega

$$w_1\dot{I}'_1 = -w_2\dot{I}_2 = -w_1\dot{I}'_2, \quad (15\text{-}4)$$

kust

$$\dot{I}'_1 = -\dot{I}'_2. \quad (15\text{-}5)$$

Sekundaarvoolu $\dot{I}_2$ tasakaalustavat voolu $\dot{I}'_1$ nimetatakse p r i m a a r v o o l u k o o r m u s k o m p o n e n d i k s.

Täielik primaarvool koosneb seega magneetimis- ja koormuskomponendist

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_M + \dot{I}'_1. \quad (15\text{-}6)$$

Võrrandi (15-4) alusel võib seose (15-6) kirjutada kujul

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_M - \dot{I}'_2, \quad (15\text{-}7)$$

mis on kooskõlas eespool selgitatuga ja samuti aseskeemiga joon. 14-5.

Korrutades avaldise (15-7) w_1-ga, saame

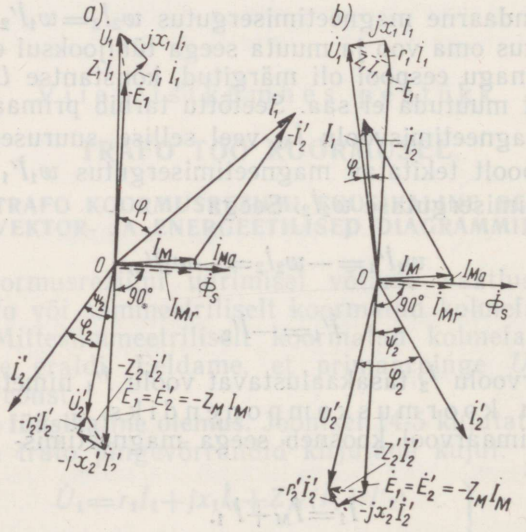
$$w_1\dot{I}_1+w_1\dot{I}'_2=w_1\dot{I}_M \tag{15-8}$$

või

$$w_1\dot{I}_1+w_2\dot{I}_2=w_1\dot{I}_M. \tag{15-9}$$

Eeltoodu alusel võib väita, et trafosüdamikus tekitatakse voog primaar- ja sekundaarmähise magneetimisergutuste summa või siis primaarmähise voolu magneetimiskomponendi $\dot{I}_M$ poolt. Et koormuse muutumisel vool $\dot{I}_1$ ja pingelang $Z_1\dot{I}_1$ muutuvad samuti, siis muutuvad vastavalt võrrandeile (15-2) ja (12-3) mõningal määral ka E_1 ja Φ_s. Sellele vastavalt muutub muutlikul koormusel ka primaarvoolu magneetimiskomponent $\dot{I}_M$.

Trafo vektordiagrammid võimaldavad selle tööd ja eespool saadud seoseid tunduvalt paremini ja ülevaatlikumalt analüüsida. Vektordiagramme võib konstrueerida aseskeemi (joon. 14-5) või võrrandite 15-2 alusel.



Joon. 15-1. Trafo vektordiagrammid induktiivse iseloomuga (*a*) ja mahtuvusliku iseloomuga (*b*) segakoormusel

Joonisel 15-1, *a* on kujutatud trafo vektordiagramm induktiivse iseloomuga segakoormuse korral. Elektromotoorjõud $\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$ jääb südamiku voost Φ_s 90° faasis maha. Vool $\dot{I}'_2$ jääb $\dot{E}'_2$-st faasis maha mingi nurga ψ_2 võrra, mille suurus sõltub koormuse iseloomust. Lahutades $\dot{E}'_2$-st pingelangud $jx'_2\dot{I}'_2$ (risti $\dot{I}'_2$-ga) ja $r'_2\dot{I}'_2$ (rööbiti $\dot{I}'_2$-ga), saamegi sekundaarpinge $\dot{U}'_2$ vektori.

Magneetimisvoolu reaktiivkomponent (magneetiv komponent) $\dot{I}_{Mr}$ ühtib faasis Φ_s-ga, aktiivkomponent $\dot{I}_{Ma}$ aga eelneb viimasele faasis 90°. Seetõttu magneetimisvoolu vektor $I_M = I_{Mr} + I_{Ma}$ edestab voo vektorit Φ_s faasis mõnevõrra (joon. 15-1, *a*). Liites $\dot{I}_m$-le vektori $\dot{I}'_1 = -\dot{I}'_2$, leiame primaarvoolu vektori $\dot{I}_1$. Selleks, et leida primaarpinge $\dot{U}_1$ vektorit, liidame vektorile $-\dot{E}_1$, mis on suuruselt võrdne ja vastassuunaline vektoriga $\dot{E}_1$, pingelangude vektorid $r_1\dot{I}_1$ ja $jx_1\dot{I}_1$. Induktiivse iseloomuga segakoormusel $\varphi_1 > \varphi_2$.



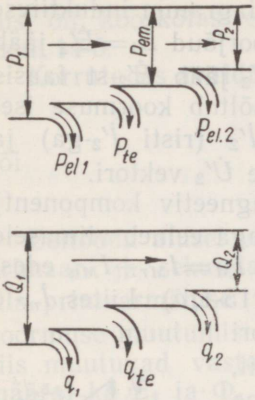
Joon. 15-2. Trafo lihtsustatud vektordiagramm induktiivse iseloomuga segakoormusel

Joonisel 15-1, *b* on analoogiliselt eelnevaga koostatud vektordiagramm mahtuvusliku iseloomuga segakoormusele, s. o. juhtumile, kui vooluvektor $\dot{I}'_2$ edestab vektoreid ε'_2 ja $\dot{U}'_2$ vastavalt nurkade ψ_2 ja φ_2 võrra. Märgime veel, et diagrammide selguse huvides on vektorid $\dot{I}_{Mr}$ ja $\dot{I}_{Ma}$ ning samuti pingelangude vektorid kujutatud tegelikest suuremaina.

Diagrammist 15-1, *a* nähtub, et konstantse U_1 ja ψ_2 või φ_2 korral põhjustab koormusvoolu I'_2 suurendamine $E_1 = E'_2$ ja U'_2 mõningase vähenemise. Seega vähenevad mõnevõrra ka Φ_s ja I_M. Diagrammist 15-1, *b* selgub, et mahtuvusliku iseloomuga segakoormuse suurendamisel suurused $\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$, $\dot{U}'_2$, $\dot{I}_M$ ja Φ_s küllalt suurel $|\psi_2|$ või $|\varphi_2|$ väärtusel võivad isegi suureneda.

Lihtsustatud vektordiagramm vastab trafo lihtsustatud aseskeemile (vt. joon. 14-6), kus magneetimisvool on võetud võrdseks nulliga. Muutes seejuures vektorite $\dot{U}'_2$ ja $\dot{I}'_2$ positiivsed suunad vastupidisteks (pöörates neid 180°), saame vastavalt skeemile 14-6 diagrammi, mis on toodud joonisel 15-2. Kui $U_1 = \text{const}$ ja $I'_2 = \text{const}$ ning faasinihe φ_2 muutub, siis vektori $\dot{U}'_2$ tipp liigub mööda ringjoont raadiusega $Z_k I'_2$. Selle ringi kese asub vektori $\dot{U}_1$ tipus, nagu kriipsjoonega on näidatud joonisel 15-2. Selle diagrammi alusel on lihtne otsustada koormuse iseloomu või φ_2 suuruse mõju pingele U'_2.

Trafo energeetiline diagramm. Aktiivvõimsuse muundumine tra-



Joon. 15-3. Trafo aktiiv- (*a*) ja reaktiivvõimsuse (*b*) muundusskeem

fos toimub diagrammi joon. 15-3, *a* kohaselt, mis vastab aseskeemidele joon. 14-4 ja 14-5 ning vektordiagrammile joon. 15-1.

Primaarmähise poolt võrgust tarbitav võimsus

$$P_1 = mU_1I_1 \cos \varphi_1.$$

Osa sellest võimsusest kulutatakse elektrilisele kaovõimsusele primaarmähises

$$p_{el1} = mI_1^2 r_1.$$

Teine osa võimsusest kulutatakse südamiku teraseskaovõimsusele

$$p_{te} = mE_1 I_{Ma} = mI_M^2 r_M.$$

Elektromagnetiline võimsus

$$P_{em} = P_1 - p_{el1} - p_{te} = mE_1 I'_2 \cos \Psi_2$$

antakse magnetvälja vahendusel sekundaarmähisesse. Selle mähise kaovõimsus

$$p_{el2} = mI_2^2 r_2 = mI_2'^2 r'_2.$$

Jääkvõimsus P_2 kujutab endast tarbijale antavat kasulikku võimsust:

$$P_2 = P_{em} - p_{el2} = mU_2I_2 \cos \varphi_2 = mU'_2I'_2 \cos \varphi_2.$$

Reaktiivvõimsuse muundumine toimub diagrammi 15-3, *b* kohaselt. Primaarsest reaktiivvõimsusest

$$Q_1 = mU_1I_1 \sin \varphi_1$$

kulutatakse osa, $q_1 = mI_1^2 x_1$, primaarpuistevälja tekitamiseks ja teine osa $q_{te} = m E_1 I_{Mr} = m I_M^2 x_M$ põhivoo tekitamiseks südamikus. Sekundaarmähises kulutatakse reaktiivvõimsus

$$q_2 = mI_2^2 x_2 = mI_2'^2 x'_2$$

sekundaarpuistevälja tekitamiseks ja reaktiivvõimsuse jääk

$$Q_2 = Q_1 - q_1 - q_{te} - q_2 = mU_2I_2 \sin \varphi_2 = mU'_2I'_2 \sin \varphi_2$$

antakse tarbijale. Mahtuvusliku iseloomuga segakoormuse korral on $\varphi_2 < 0$ ja samuti ka $Q_2 < 0$. Q_2 märgi muutus tähendab reaktiivvõimsuse või reaktiivenergia ülekandesuuna muutumist. Kui sellejuures veel

$$Q_1 = Q_2 + q_2 + q_{te} + q_1 < 0,$$

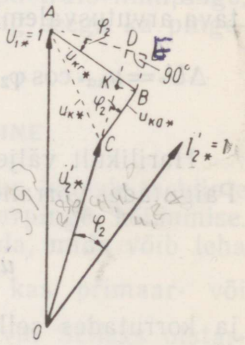
siis kantakse reaktiivvõimsus sekundaarmähisest primaarmähisesse. Kui aga $Q_2 < 0$ ja $Q_1 > 0$, siis tarbivad mõlemad, nii primaar- kui ka sekundaarmähis, reaktiivvõimsust ja kulutavad selle trafo magneetimiseks.

15-2. TRAFO PINGEMUUTUS

Trafo pingemuutuseks nimetatakse sekundaarmähise tühijooksupinge ja sama mähise klemmidel nimikoormusel esineva pinge aritmeetilist vahet konstantse nimiprimaarpinge ja nimisageduse korral. Pingemuutus on trafo tähtis ekspluatatsiooniomaduste iseloomustaja. Pingemuutuse määramine vektordiagrammidest on nende väiksuse ja graafilise konstruktsiooni ebatäpsuse tõttu ebamugav. Seetõttu kasutatakse selleks otstarbeks tavaliselt allpool toodud analüütilist valemit.

Valemi tuletamiseks kasutame trafo lihtsustatud vektordiagrammi (joon. 15-2), mis on ehitatud $U_1 = U_{1N}$ ja $I_2 = I_{2N}$ või $I'_2 = I'_{2N} = I_{1N}$ suhtelistes väärtustes (joon. 15-4). Sel juhul suhteline pingelang ja selle komponendid võrduvad lühisepinge ja selle komponentide suhteliste väärtustega:

$$z_{k*} I'_{2N*} = z_{k*} = u_{k*};$$
$$r_{k*} I'_{2N*} = r_{k*} = u_{ka*};$$
$$x_{k*} I'_{2N*} = x_{k*} = u_{kr*},$$



Joon. 15-4. Trafo pingemuutuse määramise vektordiagramm

nagu on näidatud joonisel 15-4. Peale selle on sellel joonisel olev joon CD joone OC pikendus, $AE \perp OD$ ja $KB \perp OD$ ning $\widehat{BAE} = \varphi_2$.

Vastavalt definitsioonile avaldub suhteline pingemuutus ΔU_*:

$$\Delta U_* = \frac{U_{20*} - U_{2*}}{U_{20*}} = \frac{U'_{20*} - U'_{2*}}{U'_{20*}} = \frac{U_{1N*} - U'_{2*}}{U_{1N*}} = 1 - U'_{2*}. \tag{15-10}$$

Jooniselt 15-4 saame:

$$U'_{2*} = OD - CD = \sqrt{OA^2 - AD^2} - CD = \sqrt{1 - AD^2} - CD.$$

Reaalse trafo korral $AD \ll 1$ ja seetõttu võib rahulduda juurealuse ligikaudse väärtusega, kasutades Newtoni binoomvalemit, millest arvestame ainult kaht esimest liiget:

$$\sqrt{1-AD^2} \approx 1-\frac{AD^2}{2}.$$

Siis

$$U'_{2*}=1-CD-\frac{AD^2}{2}$$

ja võrrandi 15-10 alusel

$$\Delta U_*=CD+\frac{AD^2}{2}. \qquad (15\text{-}11)$$

Vastavalt joonisele 15-4

$$CD=CK+KD=CK+BE=u_{ka*}\cos\varphi_2+u_{kr*}\sin\varphi_2;$$
$$AD=AE-DE=AE-KB=u_{kr*}\cos\varphi_2-u_{ka*}\sin\varphi_2.$$

Paigutades need lõikude väärtused valemisse (15-11), saame otsitava arvutusvalemi kujul

$$\Delta U_*=u_{ka*}\cos\varphi_2+u_{kr*}\sin\varphi_2+\frac{(u_{kr*}\cos\varphi_2-u_{ka*}\sin\varphi_2)^2}{2}. \qquad (15\text{-}12)$$

Harilikult väljendatakse ΔU protsentides $u_{ka\%}$ ja $u_{kr\%}$ kaudu. Paigutades võrrandisse (15-12)

$$u_{ka*}=\frac{u_{ka\%}}{100}; \quad u_{kr*}=\frac{u_{kr\%}}{100}$$

ja korrutades selle võrrandi mõlemaid liikmeid 100-ga, saame:

$$\Delta U_{\%}=u_{ka\%}\cos\varphi_2+u_{kr\%}\sin\varphi_2+\frac{(u_{kr\%}\cos\varphi_2-u_{ka\%}\sin\varphi_2)^2}{200}. \qquad (15\text{-}13)$$

Selle valemi viimane liige on suhteliselt väike, mistõttu võib võtta

$$\Delta U_{\%}\approx u_{ka\%}\cos\varphi_2+u_{kr\%}\sin\varphi_2. \qquad (15\text{-}14)$$

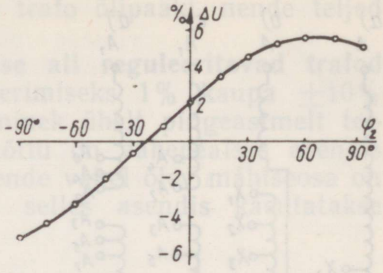
Kui on vaja määrata pingemuutust voolu $I_2 \neq I_{2N}$ juures, on küllaldane, kui korrutada valemite (15-12) ja (15-13) kaks esimest liiget trafo koormusteguriga $k_{krm}=I_2/I_{2N}$ ja viimane k_{krm}^2-ga.

Näide. Olgu trafo nimiandmed: võimsus $S_N=180$ kVA, pinge $U_{1N}=6000$ V, $U_{2N}=400$ V, lühisepinge $u_{k\%}=5{,}5$, $u_{ka\%}=2{,}2$, $u_{kr\%}=5{,}04$. Nimivoolu jaoks $\cos\varphi_2=1{,}0$ ja $\sin\varphi_3=0$ puhul saame valemit (15-13) kasutades pingemuutuseks $\Delta U_{\%}=2{,}33$ ja valemiga (15-14) — $\Delta U_{\%}=2{,}2$. Kui aga $\cos\varphi_2=0{,}8$ ja $\sin\varphi_2=0{,}6$, saame vastavalt $\Delta U_{\%}=4{,}82$ ja $\Delta U_{\%}=4{,}78$.

Joon. 15-5 on toodud illustreerimiseks graafik $\Delta U_{\%}=f(\varphi_2)$ nimivoolu korral ($I=I_N$), mis on saadud eeltoodud arvutus-

näite alusel. Parempoolne osa vastab induktiivse iseloomuga ja vasakpoolne osa mahtuvusliku iseloomuga segakoormusele.

Jooniselt 15-5 nähtub, et induktiivse iseloomuga segakoormusel sekundaarpinge langeb ($\triangle U > 0$), mahtuvusliku iseloomuga segakoormusel küllalt suure faasinihke korral aga isegi tõuseb ($\triangle U < 0$). See on tingitud sellest, et induktiivvool põhjustab induktiivtakistuses pinge vähenemise, mahtuvusvool aga pinge tõusu. Mida kõrgem on trafo nimipinge, seda suurem on trafo lühisepinge ja puiste ning seega ka pingemuutus.



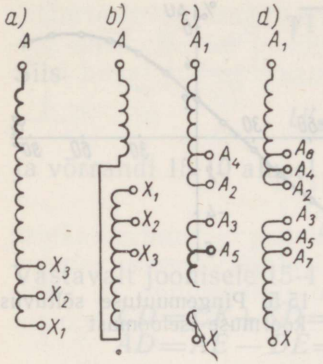
Joon. 15-5. Pingemuutuse sõltuvus koormuse iseloomust

15-3. TRAFO PINGE REGULEERIMINE

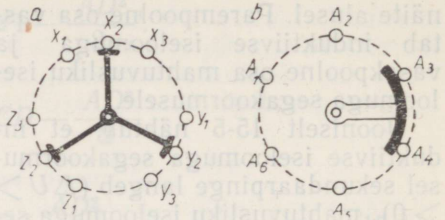
Tingituna pingelangust trafos ja toitevõrgus kutsub tarbijate koormuse kõikumine esile ka trafo sekundaarpinge kõikumise. Järelikult tekib vajadus trafo pinget reguleerida, mida võib teha ülekandesuhte $k = \frac{w_1}{w_2}$ muutmisega, muutes kas primaar- või sekundaarmähise töösse lülitatud keerdude arvu. Selleks otstarbeks varustatakse mähis mitme väljavõttega. Pinge reguleerimine toimub nende väljavõtete ümberlülitamisega vastava ümberlülitusseadme abil.

Väljavõtete ümberlülitamine võib toimuda võrgust väljalülitatud trafo korral või ka väljalülitamata, s. o. koormatud trafos. Esimesel juhul on ümberlülitusseade lihtsam ja odavam, kuid nõuab tarbijate toite katkestamist, mida ei või tihti teha. Seetõttu on see meetod praktikas kasutatav pinget madaldavate võrgutrafode sekundaarpinge korrigeerimiseks vastavalt vaadeldava võrgulõigu primaarpinge tasemele ja samuti ka sesoonsete pingekõikumiste korral, tingituna koormuse suuruse sesoonseist muutustest. Koormuse all reguleerimine nõuab keerukamat ja kallimat ümberlülitusseadet ja seda kasutatakse võimsais trafodes, kui on vaja kas tihti või pidevalt pinget reguleerida. Koormuse all reguleeritavate trafode kasutamine laieneb pidevalt.

Väljalülitatud olukorras muudetava keerdude arvuga trafosid valmistatakse vastavalt ГОСТ 401-41 reguleerimispiiridega $\pm 5\%$ nimipinge suhtes (väikese ja keskmise võimsusega jõutrafod) ja $\pm 2{,}5\%$ ning $\pm 5\%$ (suure võimsusega trafod). Esimesel juhtumil



Joon. 15-6. Väljavõtetega mähiste skeemid pinge reguleerimiseks



Joon. 15-7. Pinge reguleerimiseks kasutatavate ümberlülitite skeemid

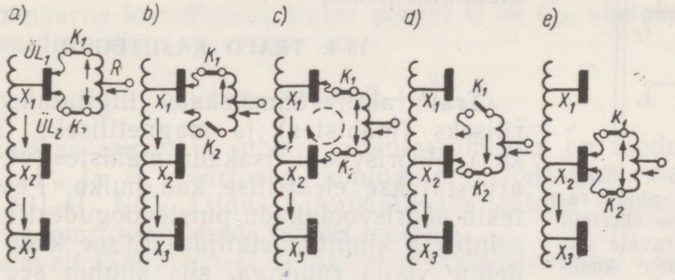
on trafol kolm ja teisel — viis pingeastet. Väljavõtteid on otstarbekas teha selle mähise juures, mille pinge ekspluatatsioonis muutub. Seejuures muutub trafo magnetvoog $\Phi \sim \frac{U}{w}$ erinevail pingeastmeil vähe. Harilikult on selleks ülempingemähis. Väljavõtete tegemisel ülempingemähisest on veel see eelis, et seal on tänu suurele keerdude arvule võimalik saada täpsemalt pingeastmeid $\pm 2{,}5\%$ ja $\pm 5\%$. Peale selle on vool ülempingemähises väiksem ja ümberlüliti seetõttu väiksem ja kompaktsem.

Mähise ümberlülitatavad osad väljavõtete vahel on otstarbekas paigutada mähise poolele kõrgusele, et mõlemad mähise vooluga osad oleksid suvalisil väljavõtteil töötades ikete suhtes võimalikult sümmeetrilise asetusega. Vastasel korral moonutub tugevasti puistevoo jaotus (võrreldes joon. 14-8), mis suurendab trafo puisteinduktiivsust ning lühistel mähistes tekkivaid mehaanilisi jõude (vt. § 17-2). Teisest küljest on aga soovitav väljavõtteid teha maandatud neutraaliga (nullpunktiga) mähises, sest see lubab ümberlülitis kasutada nõrgemat isolatsiooni.

Joonisel 15-6 on näidatud kõige iseloomulikumad väljavõtetega mähiste skeemid. Skeemi 15-6, *a* kasutatakse mitmekihilise silindermähise korral, kus väljavõtted on tehtud kõige pealmisest kihist. Skeemil joon. 15-6, *b* on mähis valmistatud kahest vastassuunaliselt keritud osast, et mõlema mähiseosa elektromotoorjõud ja magneetimisergutused liituksid. Skeemides joon. 15-6, *a* ja *b* kasutatakse üht kolmefaasilist ümberlülitit (joon. 15-7, *a*), skeemides joon. 15-6, *c* ja *d* on aga igal faasil oma ümberlüliti (joon. 15-7, *b*), sest sel korral on erinevate faaside väljavõtete vahel pinge $U \approx$

$\approx 0{,}5U_N$. Ümberlülitid paigutatakse trafo õlipaaki, nende teljed aga ulatuvad läbi paagi kaane.

NSV Liidus toodetavad koormuse all reguleeritavad trafod arvutatakse tavaliselt pinge reguleerimiseks 1% kaupa $\pm 10\%$ ulatuses. Neis trafodes toimub üleminek ühelt pingeastmelt teisele vooluahelat katkestamata. Seetõttu on vahepealses asendis lülitatud kaks naaberväljavõtet ja nende vahel olev mähiseosa on lühistatud. Lühisevoolu piiramiseks selles asendis kasutatakse kas reaktorit või aktiivtakistust.

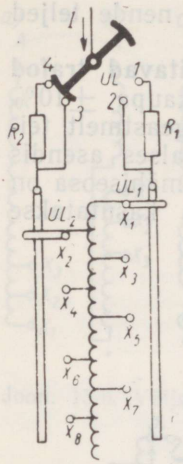


Joon. 15-8. Koormuse all pinge reguleerimise skeemid voolu piiravate reaktorite kasutamise korral

Joon. 15-8 on toodud ümberlülitusskeem reaktoriga R ja näidatud viis järjestikust asendit üleminekul väljavõttelt X_1 (asend *a*) väljavõttele X_2 (asend *e*). Mõlemas ümberlülitusskeemi harus on kontaktor (K_1 ja K_2) antud harust voolu väljalülitamiseks enne haru ümberlülitamist, samuti ka ümberlüliti liugkontaktid ($ÜL_1$, $ÜL_2$), mis on ette nähtud vooluta harude ümberlülitamiseks. Normaalses tööolukorras (asendid *a* ja *e*) läbivad skeemi vooluharude voolud reaktori poolmähiseid vastassuundades. Seetõttu magnetvoog reaktori südamikus praktiliselt puudub ja ta induktiivtakistus on väike. Seevastu aga vool pingeastme lühise korral lüliti vahepealses asendis (joon. 15-8, *c* näidatud kriipsjoonega) läbib mõlemaid reaktori poolmähiseid samas suunas. Reaktori südamik magneetub ja induktiivtakistus sellele voolule on suur.

Reaktor R ja ümberlülitid $ÜL$ on paigutatud trafo õlipaaki, kuid kontaktorid K — spetsiaalsesse lisapaaki, mis on monteeritud õlipaagi välisseinale. Sellega välditakse trafoõli saastumist vooluahela katkestamise tõttu kontaktoriga.

Joonisel 15-9 on toodud koormuse all ümberlülitamise põhimõtteskeem, kasutades voolu piiravaid aktiivtakisteid R_1 ja R_2. Joonisel näidatud ümberlüliti asendi puhul töötab trafo väljavõt-



Joon. 15-9. Koormuse all pinge reguleerimise skeemid voolu piiravate aktiivtakistuste kasutamise korral

tel X_2. Selleks et üle minna väljavõttele X_1, viiakse algul tööolukorras ümberlüliti $ÜL_1$ sellele klemmile ja seejärel pööratakse ümberlüliti $ÜL$ vastava mehhanismi abil kiiresti asendisse, kus ta ühendab kontakte *1* ja *2*. Kontaktide *3* ja *4* lahutamise ja kontaktide *1* ja *2* ühendamise järjestus on arvestatud sellisena, et töövoolu *I* ahel ei katkeks. Kiire, vaid sajandiksekundeid kestev ümberlülitus on vajalik selleks, et vältida takistite R_1 ja R_2 ülekuumenemist.

15-4. TRAFO KASUTEGUR

Trafo aktiivvõimsuskadu liigitatakse elektriliseks (mähistes) ja magnetiliseks (südamikus). Pöörisvoolu lisakadu mähistes (vt. § 12-3) arvestatakse elektrilise kao hulka. Peale selle tekib pöörisvoolukadu puistevoogudest ka paagi seintes ja kinnitusdetailides. Et see kadu on võrdeline voolu ruuduga, siis kuulub see samuti elektrilise kao hulka. Lühise aktiivtakistuse r_k katseline väärtus arvestab ka seda lisakadu.

Kadude suurus määratakse trafo projekteerimisel arvutuslikult ja valmis trafo korral katseliselt.

Vastavalt ГОСТ 401-41 määratakse magnetilise kao (teraseskao) võimsus p_{te} tühijooksukatsega (vt. § 14-5).

Nagu selgitati § 15-1, muutub trafo voog mõnevõrra koormuse muutumisel $U_1 = \text{const}$ puhul, millele vastavalt muutub ka teraseskadu. See muutus on aga suhteliselt tühine ja vastavalt ГОСТ 401-41 võetakse teraseskaovõimsus $U_1 = U_{1N} = \text{const}$ juures võrdseks tühijooksuvõimsusega P_0 samal pingel, sõltumata koormuse suurusest. Elektriline kaovõimsus koos lisakaovõimsusega nimivoolu juures võetakse võrdseks lühisevõimsusega P_k sama voolu juures (vt. § 14-5). Mähiste temperatuur lühisekatsel ϑ erineb tavaliselt 75°C-st ja seetõttu tuleb tegelik kaovõimsuse suurus taandada sellele temperatuurile. Selleks tuleb vaskmähiste korral katseliselt saadud kaovõimsuse suurus korrutada teguriga

$$k_\vartheta = \frac{235+75}{235+\vartheta}$$

ja alumiiniummähiste korral teguriga

$$k_\vartheta = \frac{245+75}{245+\vartheta}.$$

Elektriline kaovõimsus koormusel $I \neq I_N$ võetakse vastavalt ГОСТ 401-41 võrdseks $k_{krm}^2 P_k$-ga, kus

$$k_{krm} = \frac{I_2}{I_{2N}} \tag{15-15}$$

on trafo koormustegur. Sealjuures ei võeta arvesse seda asjaolu, et voolu magneetiva komponendi olemasolu tõttu suhe $\frac{I_1}{I_{1N}}$ mõningal määral erineb valemiga (15-15) määratud koormusteguri k_{krm} väärtusest.

Summaarne kaovõimsus trafos pingel $U = U_N$ võetakse võrdseks avaldisega

$$p_\Sigma = p_{te} + p_{el} = P_0 + k_{krm}^2 P_k. \tag{15-16}$$

Praktikas esinevais suhetes orienteerumiseks on toodud tabelis 15-1 P_0 ja P_k väärtused mõningate trafode kohta vastavalt ГОСТ 401-41. NSV Liidus valmistatavate trafode juures ei tohi vastavad suurused ületada tabelis tooduid.

Vastavalt ГОСТ 401-41 arvutatakse trafo kasutegur eeldusel, et selle kasulik võimsus on määratud seosega

$$P_2 = mU_{2N} k_{krm} I_{2N} \cos\varphi_2 = k_{krm} S_N \cos\varphi_2, \tag{15-17}$$

s. t. ei arvestata pinge U_2 muutumist koormuse muutumisel.

Arvestades eeltoodut, võtab kasuteguri avaldis

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2 + p_\Sigma - p_\Sigma}{P_2 + p_\Sigma} = 1 - \frac{p_\Sigma}{P_2 + p_\Sigma}$$

vastavalt ГОСТ 401-41 järgmise kuju

Tabel 15-1

Kahe mähisega õlitrafode tühijooksu ja lühise kaovõimsus P_0 ja P_k

Trafo nimivõimsus kVA	Nimipinged kV		Kaovõimsused kW	
S_N	UP	AP	P_0	P_k
10	6,0	0,4	0,105	0,335
100	6,0	0,4	0,6	2,4
180	6,0	0,4	1,0	4,0
1 000	10,0	6,3	4,9	15,0
10 000	35,0	6,3	29,0	92,0
60 000	110,0	38,5	140,0	295,0

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + k_{krm}^2 P_k}{k_{krm} S_N \cos\varphi_2 + P_0 + k_{krm}^2 P_k}. \qquad (15\text{-}18)$$

Eespool näidatud lihtsustus mõjub vähe kasuteguri arvutustulemuse täpsusele.

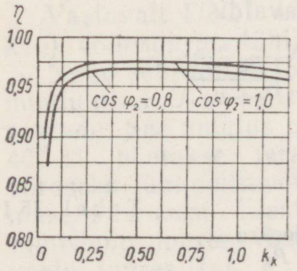
Trafo kasutegur on maksimaalse väärtusega sellisel koormusel, mille juures püsikaovõimsus p_{te} on võrdne muutuvkaovõimsusega p_{el}, s. o. kui $k_{krm}^2 P_k = P_0$. Seega siis $\eta = \eta_{max}$, kui

$$k_{krm} = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}}. \qquad (15\text{-}19)$$

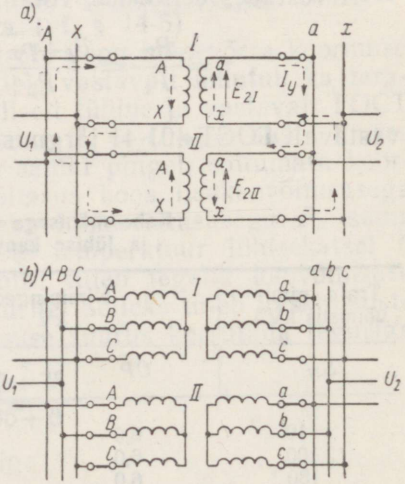
Joonisel 15-10 on graafiliselt antud standardse jõutrafo, võimsusega 180 kVA, pingega 6,3/0,525 kV, $\cos\varphi_2 = 1$ ja $\cos\varphi_2 = 0{,}8$, kasuteguri η sõltuvus koormustegurist k_{krm}. Sellel trafol $\eta = \eta_{max}$, kui

$$k_{krm} = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}} = \sqrt{\frac{1}{4}} = 0{,}5.$$

Trafo töö ökonoomsuse kriteeriumina ajaliselt muutuva koormuse korral kasutatakse nn. aastakasuteguri mõistet. See tegur kujutab endast trafo sekundaarmähise poolt aasta vältel võrku antud energia suhet primaarmähise poolt võrgust tarbitud energiasse.



Joon. 15-10. Trafo — 180 kVA; 6,3/0,525 kV — kasuteguri sõltuvus koormustegurist



Joon. 15-11. Kahe mähisega ühefaasilise (*a*) ja kolmefaasilise (*b*) trafo paralleeltöö skeemid

15-5. TRAFODE PARALLEELTÖÖ

Paralleeltöö tingimused. Pinget tõstvais või madaldavais trafoalajaamades paigaldatakse võimsusest sõltuvalt kaks, kolm või enam trafot paralleeltööle (joon. 15-11). Trafode paralleeltöö on vajalik samadel põhjustel kui generaatoritelgi (vt. § 9-7): 1) vajadusest reserveerida tarbijate toidet avarii ja remondi korral; 2) energiakao vähendamiseks alajaama väikesel koormusel osa trafode väljalülitamisega.

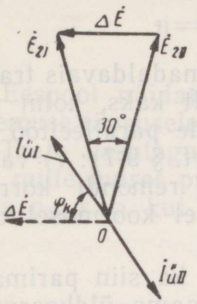
Samuti nagu generaatorite paralleeltööl, on ka siin parimate paralleeltöö tingimuste loomiseks vaja, et alajaama üldkoormus jaguneks trafode vahel võrdeliselt nende nimivõimsustega. Niisugune koormuse jagunemine paralleelselt töötavate trafode vahel saadakse tingimustel, et 1) need kuuluvad ühte ja samasse mähiste lülitusrühma; 2) on võrdsete nimiprimaar- ja sekundaarpingetega ehk, mis on sama, võrdsete ülekandesuhetega; 3) lühisepingete väärtused on võrdsed.

Kui kaks esimest tingimust on täidetud, siis paralleelselt töötavate trafode vastavate faasimähiste sekundaarpinged on tühijooksul, s. o. väljalülitatud sekundaarvõrgu korral, võrdse suurusega ja samas faasis. Seetõttu ei teki neis mähistes koormuse puudumisel, vaatamata sellele, et nad on lülitatud ühistele kogumislattidele, mingeid voole. Vastasel korral tekivad juba tühijooksul ühtlustusvoolud $I_ü$, mis tsirkuleerivad paralleelselt lülitatud trafode sekundaarmähistest moodustunud kinnises kontuuris ja transformeeritakse ka primaarmähistesse. Joonisel 15-11, *a* on need voolud näidatud kriipsnooltega. Kuigi ühtlustusvoolud ei tarvitse olla eriti suured ega põhjustada avariid, tekitavad nad tarbijate koormusvooludega liitumisel koormuse ebaühtlust ning suurendavad trafo kadusid ja soojenemist. Kolmanda tingimuse täitmine kindlustab koormuse ühtlase jaotumise trafode vahel.

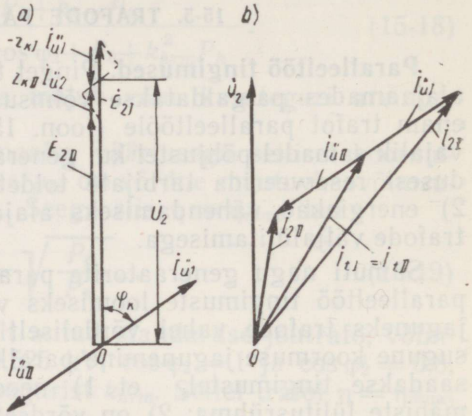
Märgime, et trafode esmasel paralleeltööle lülitamisel tuleb kontrollida nende «faassust», s. o. veenduda, et ühele kogumislatile oleks lülitatud trafode need faasimähised, milles pinged faasis ühtivad. Sellist proovi, näiteks skeemis 15-11, *b*, võib lihtsamal juhul, kui sekundaarpinge ei ole suur, teha järgmiselt. Sulgeme näiteks skeemis 15-11, *b* kõik lüliti (lahklüliti) noad peale *II* trafo *b* ja *c* faasi nugade. Pärast seda mõõdame pingel $U_1 \neq 0$ pinged nende nugade ja vastavate kontakthuulikute vahel. Kui pinge võrdub seal nulliga, on pinged faasis.

Selgitame järgnevalt eeltoodud tingimustest kõrvalekaldumise mõju trafode paralleeltööle. Sealjuures lähtume lihtsustatud aseskeemist, jättes magneetimisvoolu arvestamata.

Mähiste lülitusrühmade samasuse nõue. Eeldame, et paralleeltööle on lülitatud kaks trafot mähiste ühendusega $Y/\triangle$-11 ja



Joon. 15-12. Trafode Y/Δ-11 ja Y/Y-12 paralleeltöö korral esinevad ühtlustusvoolud



Joon. 15-13. Ebavõrdsete ülekandesuhete korral tekkivad ühtlustusvoolud

Y/Y-12 ja omavahel võrdsete nimiprimaar- ning sekundaarpingetega. Siis on nende vastavate faaside sekundaar-elektromotoorjõud E_2 suuruselt võrdsed, kuid faasis 30° nihutatud (joon. 15-12). Sekundaarmähiste poolt moodustatud suletud ahelas mõjub elektromotoorjõudude vahe

$$\Delta E = 2E_2 \sin 15° = 0{,}518E_2.$$

Ühtlustusvool ringleb ainult trafode primaar- ja sekundaarmähistes ning selle suurus on piiratud nende mähiste takistusega, s. o. trafode lühisetakistusega.

Seetõttu

$$I_{\ddot{u}} = \frac{\Delta E}{Z_{kI} + Z_{kII}}. \qquad (15\text{-}20)$$

Kui trafod on näiteks võrdse võimsusega ja $z_{kI*} = z_{kII*} = u_{kI*} = u_{kII*} = 0{,}05$, siis ühtlustusvoolu suhteline suurus

$$I_{\ddot{u}*} = \frac{0{,}518}{2 \cdot 0{,}05} = 5{,}18,$$

s. t. ühtlustusvool ületab 5,18 korda trafode nimivoolu. Selline olukord on peaaegu võrdne trafo lühisega.

Järelikult on erinevasse lülitusrühma kuuluvate trafode paralleeltööle lülitamine lubamatu. Kuid siiski on võimalikud juhtumid, kus mähiste väljastuste tähiste ring-ümberpaigutamisega (vt. § 12-4) või kahe trafo klemmide vastava ühendamisega on võimalik saavutada nende elektromotoorjõudude faasis ühtimist ka

erinevate lülitusrühmade korral. Selle võimalikkust igal konkreetsel juhtumil võib kontrollida trafode pingete vektordiagrammide abil.

Ülekandesuhete võrdsuse tingimus. Olgu antud näiteks kaks ühefaasilist trafot (vt. joon. 15-11, *a*), mille nimiprimaar- ja -sekundaarpinged ei ole võrdsed. Olgu $E_{2I} > E_{2II}$ (joon. 15-13, *a*). Sekundaarmähiste suletud ahelas mõjub siis nende elektromotoorjõudude vahe $\Delta\dot{E} = \dot{E}_{2I} - \dot{E}_{2II}$, mis põhjustab ühtlustusvoolu vastavalt valemile (15-20). Selle voolu suund kummagi trafo sekundaarmähises on erinev (joon. 15-13, *a*): trafo *I* genereerib voolu $I_{üI}$ ja trafo *II* tarbib voolu $I_{üII}$. Nende voolude poolt vastavais mähistes tekitatavad pingelangud võrdsustavad mõlema mähise sekundaarpinged (joon. 15-13, *a*).

Koormusele lülitamisel tekivad trafodes tarbija voolud I_{tI} ja I_{tII}. Liitudes nende vooludega, põhjustavad ühtlustusvoolud trafode resulteerivate voolude ja koormuste ebaühtlust (joon. 15-13, *b*).

Näitena olgu paralleeltööle lülitatud kaks võrdse võimsusega trafot, millel $z_{kI*} = z_{kII*} = 0{,}055$ ja ülekandesuhted erinevad 1% võrra. Siis $\Delta E = 0{,}01\ U_N$ ja vastavalt valemile (15-20)

$$I_{ü*} = \frac{\Delta E_*}{z_{kI*} + z_{kII*}} = \frac{0{,}01}{2 \cdot 0{,}055} = 0{,}091 \text{ või } 9{,}1\%.$$

Nagu näha, on ühtlustusvoolu väärtus juba sellise ülekandesuhete väikese ebavõrdsuse korral küllaltki suur. Vastavalt ГОСТ 401-41 lubatakse üldjuhtumil paralleeltööle lülitada trafosid, mille ülekandesuhted ei erine üksteisest enam kui $\pm 0{,}5\%$, elektrijaamade omatarbetrafodel ja trafodel, mille $k < 3$ — enam kui $\pm 1\%$.

Lühisepingete võrdsuse tingimus. Vaatleme kolme ühesuguse lülitusrühma ja võrdsete pingetega trafo paralleeltööd. Selle juures saadud resultaadid on kergesti laiendatavad ükskõik millise arvu paralleelselt töötavate trafode korral. Lähtudes lihtsustatud aseskeemist (vt. joon. 14-6) ja jättes seega arvestamata magneetimisvoolud, on kolme trafo paralleeltöö skeem esitatav joon. 15-14 toodud kujul.

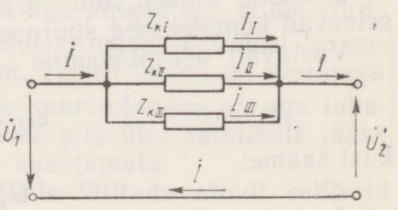
Pingelang

$$\Delta\dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2 = \dot{U}'_{20} - \dot{U}'_2$$

on kõigis kolmes trafos ühesugune:

$$\Delta\dot{U} = Z\dot{I}, \qquad (15\text{-}21)$$

kus $\dot{I}$ on üldkoormusvool ja



Joon. 15-14. Ühesuguste lülitusrühmade ja ülekandesuhetega trafode paralleeltöö lihtsustatud skeem

$$Z=\frac{1}{\frac{1}{Z_{k\mathrm{I}}}+\frac{1}{Z_{k\mathrm{II}}}+\frac{1}{Z_{k\mathrm{III}}}}=\frac{1}{\sum\limits_{n}\frac{1}{Z_{kn}}}. \tag{15-22}$$

Üksikute trafode voolud

$$\left.\begin{aligned} \dot{I}_{\mathrm{I}}&=\frac{\Delta\dot{U}}{Z_{k\mathrm{I}}}=\frac{\dot{I}}{Z_{k\mathrm{I}}\sum\limits_{n}\frac{1}{Z_{kn}}}; \quad \dot{I}_{\mathrm{II}}=\frac{\dot{I}}{Z_{k\mathrm{II}}\sum\limits_{n}\frac{1}{Z_{kn}}};\\ \dot{I}_{\mathrm{III}}&=\frac{\dot{I}}{Z_{k\mathrm{III}}\sum\limits_{n}\frac{1}{Z_{kn}}}. \end{aligned}\right\} \tag{15-23}$$

Üldjuhtumil need voolud ei ole faasis, sest komplekssete lühisetakistuste argumendid $\varphi_{k\mathrm{I}}$, $\varphi_{k\mathrm{II}}$ ja $\varphi_{k\mathrm{III}}$ ei tarvitse olla võrdsed

$$Z_{k\mathrm{I}}=z_{k\mathrm{I}}e^{j\varphi_{k\mathrm{I}}}; \quad Z_{k\mathrm{II}}=z_{k\mathrm{II}}e^{j\varphi_{k\mathrm{II}}}; \quad Z_{k\mathrm{III}}=z_{k\mathrm{III}}e^{j\varphi_{k\mathrm{III}}}.$$

Seejuures näiteks

$$\frac{\dot{I}_{\mathrm{I}}}{\dot{I}_{\mathrm{II}}}=\frac{z_{k\mathrm{I}}}{z_{k\mathrm{II}}}e^{j(\varphi_{k\mathrm{I}}-\varphi_{k\mathrm{II}})},$$

s. t. voolud $\dot{I}_{\mathrm{I}}$ ja $\dot{I}_{\mathrm{II}}$ on teineteisest nurga $\varphi_{k\mathrm{I}}-\varphi_{k\mathrm{II}}$ võrra faasis nihutatud. Siiski ei ole see faasinihe harilikes tingimustes kuigi suur ja küllalt suure täpsusega võib võtta

$$I_{\mathrm{I}}+I_{\mathrm{II}}+I_{\mathrm{III}}=I. \tag{15-24}$$

Seetõttu on ka trafode näivvõimsuste aritmeetiline summa küllaldase täpsusega võrdne koormuse näivvõimsusega S:

$$S_{\mathrm{I}}+S_{\mathrm{II}}+S_{\mathrm{III}}=S. \tag{15-25}$$

Eeltoodu alusel võib võrrandeis (15-21), (15-22) ja (15-23) esinevad komplekssed suurused asendada nende moodulitega.

Vastavalt definitsioonile

$$z_{k\mathrm{I}*}=\frac{z_{k\mathrm{I}}I_{1N}}{U_N},$$

kust saame:

$$z_{k\mathrm{I}}=z_{k\mathrm{I}*}\frac{U_N}{I_{1N}}=\frac{u_{k\mathrm{I}\%}}{100}\cdot\frac{U_N}{I_{1N}}.$$

Analoogilised võrrandid saame ka $z_{k\mathrm{II}}$ ja $z_{k\mathrm{III}}$ kohta.

Paigutame need z_k jaoks saadud seosed valemisse (15-23) ja asendame voolud nendega võrdeliste näivvõimsustega, milleks korrutame avaldist (15-23) suurusega mU_N. Siis

$$mU_N I_{IN} = \frac{mU_N I}{\frac{u_{kI\%}}{100} \cdot \frac{U_N}{I_{IN}} \cdot \frac{m}{m} \sum_n \frac{100 I_{Nn}}{u_{kn\%} U_N}}$$

või

$$S_I = \frac{S}{\frac{u_{kI\%}}{S_{NI}} \sum_n \frac{S_{Nn}}{u_{kn\%}}}.$$

Suhtelistes suurustes

$$\left.\begin{aligned} S_{I*} &= \frac{S_I}{S_{NI}} = \frac{S}{u_{kI\%} \sum_n \frac{S_{Nn}}{u_{kn\%}}}; \\ S_{II*} &= \frac{S_{II}}{S_{NII}} = \frac{S}{u_{kII\%} \sum_n \frac{S_{Nn}}{u_{kn\%}}}; \\ S_{III*} &= \frac{S_{III}}{S_{NIII}} = \frac{S}{u_{kIII\%} \sum_n \frac{S_{Nn}}{u_{kn\%}}}. \end{aligned}\right\} \quad (15\text{-}26)$$

Võrrandite (15-26) alusel

$$S_{I*} : S_{II*} : S_{III*} = \frac{1}{u_{kI\%}} : \frac{1}{u_{kII\%}} : \frac{1}{u_{kIII\%}}, \quad (15\text{-}27)$$

s. t. trafode suhtelised koormused on pöördvõrdelised nende lühisepingetega. Kui $u_{kI\%} = u_{kII\%} = u_{kIII\%}$, siis $S_{I*} = S_{II*} = S_{III*}$. Seega koormatakse trafosid ühtlaselt ja koormuse suurendamisel saavutavad nad nimikoormuse üheaegselt. On ilmne, et sellistel tingimustel on paralleeltöö optimaalne. Kui aga pinged $u_{k\%}$ ei ole võrdsed, siis saavutab nimikoormuse üldkoormuse tõstmisel kõigepealt see trafo, mille $u_{k\%}$ on väikseim. Teised trafod on seejuures veel alakoormatud. Edasine koormuse suurendamine on aga lubamatu, sest esimene trafo koormatakse siis üle. Järelikult jääks trafode installeeritud võimsusest osa kasutamata.

ГОСТ 401-41 soovitab paralleeltööle lülitada ainult selliseid trafosid, mille $u_{k\%}$ ei erineks kõigi paralleelselt töötavate trafode suhteliste lühisepingete aritmeetilisest keskmisest rohkem kui $\pm 10\%$ ja mille nimivõimsuste suhe ei oleks suurem kui 3 : 1.

Näide. Kolm võrdsete ülekandesuhete ja ühesuguse lülitusrühmaga trafot, nimiandmetega $S_{NI}=180$ kVA, $S_{NII}=240$ kVA, $S_{NIII}=320$ kVA ja $u_{kI\%}=5{,}4$, $u_{kII\%}=7{,}4$, $u_{kIII\%}=6{,}6\%$, on lülitatud paralleeltööle. Määrame iga üksiku trafo koormuse, kui üldine koormusvõimsus võrdub trafode summaarse võimsusega, s. o. $S=180+240+320=740$ kVA. Saame

$$\sum_n \frac{S_{Nn}}{u_{kn\%}}=\frac{180}{5{,}4}+\frac{240}{6{,}0}+\frac{320}{6{,}6}=121{,}8$$

$$S_{I*}=\frac{740}{5{,}4\cdot 121{,}8}=1{,}125,$$

$$S_{II*}=\frac{740}{6\cdot 121{,}8}=1{,}01;$$

$$S_{III*}=\frac{740}{6{,}6\cdot 121{,}8}=0{,}92.$$

Järelikult:

$$S_I=1{,}125\cdot 180=202{,}5 \text{ kVA},$$
$$S_{II}=1{,}01\cdot 240=243 \text{ kVA},$$
$$S_{III}=0{,}92\cdot 320=294{,}5 \text{ kVA}.$$

Seega on siis I trafo 12,5% ülekoormatud ja III trafo 8% alakoormatud. Et vabastada I trafot ülekoormusest, on vaja alajaama üldkoormust vähendada kuni 740 : 1,125 = 657 kVA-ni ehk 83 kVA võrra. Järelikult jääb alajaama installeeritud võimsusest 83 kVA kasutamata.

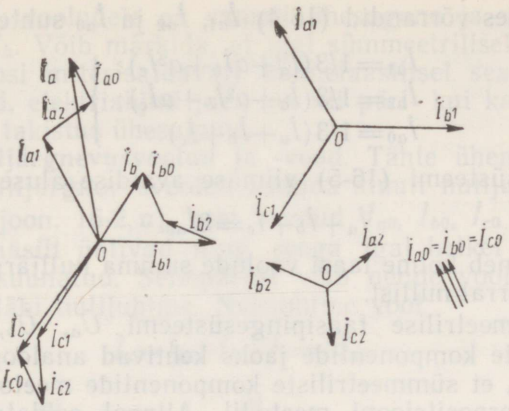
Kuueteistkümnes peatükk

TRAFODE MITTESÜMMEETRILINE KOORMUS

16-1. SÜMMEETRILISTE KOMPONENTIDE MEETODI RAKENDAMINE

Üldsätteid. Praktikas esineb juhtumeid, kus trafo faasid on koormatud mittesümmeetriliselt (valgustuskoormuse ebaühtlane jagunemine faaside vahel, võimsate ühefaasiliste tarbijate juurdelülitamine jne.). Peale selle esinevad trafodest toidetavates elektrivõrkudes mittesümmeetrilised lühised (ühefaasilised lühised maaga või nulljuhtmega ja kahefaasilised lühised). Mittesümmeetriliste töörežiimide uurimisel eeldame, et trafo on sümmeetrilise ehitusega, s. o. magnetilises ja elektrilises mõttes on kõik kolm faasi ühesugused.

Nagu teada, on mittesümmeetriliste režiimide üldiseks analüüsimeetodiks sümmeetriliste komponentide meetod. Vastavalt sellele meetodile lahutatakse kolmefaasiline mittesümmeetriline voolusüsteem $\dot{I}_a$, $\dot{I}_b$, $\dot{I}_c$ voolu päri- ($\dot{I}_{a1}$, $\dot{I}_{b1}$, $\dot{I}_{c1}$), vastu- ($\dot{I}_{a2}$, $\dot{I}_{b2}$, $\dot{I}_{c2}$)



Joon. 16-1. Kolmefaasiliste voolude sümmeetrilised komponendid

ja nulljärgnevus- ($\dot{I}_{a0}$, $\dot{I}_{b0}$, $\dot{I}_{c0}$) süsteemiks (joon. 16-1). Pärijärgnevussüsteemi voolude $\dot{I}_{a1}$, $\dot{I}_{b1}$, $\dot{I}_{c1}$ vektorid on suuruselt võrdsed ja järgnevad üksteisele kellaosuti liikumise suunas. Vastujärgnevussüsteemi voolude $\dot{I}_{a2}$, $\dot{I}_{b2}$, $\dot{I}_{c2}$ vektorid on suuruselt samuti võrdsed, kuid järgnevad üksteisele kellaosuti liikumisele vastassuunas. Nulljärgnevussüsteemi voolude $\dot{I}_{a0}$, $\dot{I}_{b0}$, $\dot{I}_{c0}$ vektorid on võrdse suurusega ja ühtivad faasis. Seejuures

$$\left.\begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}_{a1}+\dot{I}_{a2}+\dot{I}_{a0};\\ \dot{I}_b &= \dot{I}_{b1}+\dot{I}_{b2}+\dot{I}_{b0};\\ \dot{I}_c &= \dot{I}_{c1}+\dot{I}_{c2}+\dot{I}_{c0}; \end{aligned}\right\} \tag{16-1}$$

ja

$$\left.\begin{aligned} \dot{I}_{b1} &= a^2\dot{I}_{a1}; \qquad \dot{I}_{c1} = a\dot{I}_{a1};\\ \dot{I}_{b2} &= a\dot{I}_{a2}; \qquad \dot{I}_{c2} = a^2\dot{I}_{a2};\\ \dot{I}_{a0} &= \dot{I}_{b0} = \dot{I}_{c0}; \end{aligned}\right\} \tag{16-2}$$

kus $a = e^{j2\pi/3}$; $a^2 = e^{j4\pi/3}$ ning

$$1+a+a^2=0. \tag{16-3}$$

Faasi a sümmeetrilisi komponente võib lugeda põhilisteks. Vastavalt avaldistele (16-1) ja (16-2) võib siis kirjutada

$$\left.\begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}_{a1}+\dot{I}_{a2}+\dot{I}_{a0};\\ \dot{I}_b &= a^2\dot{I}_{a1}+a\dot{I}_{a2}+\dot{I}_{a0};\\ \dot{I}_c &= a\dot{I}_{a1}+a^2\dot{I}_{a2}+\dot{I}_{a0}. \end{aligned}\right\} \tag{16-4}$$

Lahendades võrrandid (16-4) $\dot{I}_{a1}$, $\dot{I}_{a2}$ ja $\dot{I}_{a0}$ suhtes, saame

$$\left.\begin{aligned} \dot{I}_{a1} &= 1/3(\dot{I}_a + a\dot{I}_b + a^2\dot{I}_c); \\ \dot{I}_{a2} &= 1/3(\dot{I}_a + a^2\dot{I}_b + a\dot{I}_c); \\ \dot{I}_{a0} &= 1/3(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c). \end{aligned}\right\} \quad (16\text{-}5)$$

Võrrandisüsteemi (16-5) viimase avaldise alusel

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 3\dot{I}_{a0}. \quad (16\text{-}6)$$

Seega erineb kolme faasi voolude summa nulljärgnevusvoolude olemasolu korral nullist.

Mittesümmeetrilise faasipingesüsteemi $\dot{U}_a$, $\dot{U}_b$, $\dot{U}_c$ ja selle sümmeetriliste komponentide jaoks kehtivad analoogilised seosed.

On ilmne, et sümmeetriliste komponentide meetodi kasutamine põhineb superpositsiooni meetodil. Allpool eeldatakse, et trafo magnetahela kõikides osades $\mu = \text{const}$, mille tõttu superpositsiooni printsiipi ongi võimalik kasutada.

Eeldame samuti, et primaar- ja sekundaarmähiste keerdude arvud on võrdsed ($w_1 = w_2$) ja seetõttu pole vajadust eristada taandamata ja taandatud sekundaarsuurusi ning märkida viimaseid ülakomaga. Seejuures saadavate tulemuste üldine iseloom ei kao, sest alati on võimalik teha vastavaid ümberarvutusi. Primaarseid faasisuurusi tähistame indeksitega A, B, C, sekundaarseid aga indeksitega a, b, c.

Trafo aseskeem ja takistused päri- ning vastujärgnevusvooludele. Eelnevates peatükkides vaadeldi trafo tööd sümmeetrilisel koormusel, s. o. juhtumitel, kui trafo faasivoolud moodustasid sümmeetrilise süsteemi:

$$\dot{I}_b = a^2\dot{I}_a; \quad \dot{I}_c = a\dot{I}_a.$$

Kui asetada need $\dot{I}_b$ ja $\dot{I}_c$ väärtused avaldisse (16-5), siis saame

$$\dot{I}_{a1} = \dot{I}_a; \quad \dot{I}_{a2} = 0; \quad \dot{I}_{a0} = 0,$$

s. o. sel juhtumil esinevad ainult pärijärgnevusvoolud. Sellepärast vastas kõik eespool toodu trafo tööle pärijärgnevusvooludega.

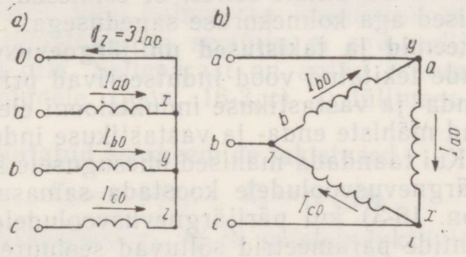
Kui sümmeetrilise koormusega töötavatel trafodel vahetada ülempinge poolel omavahel kaks klemmi (näiteks B ja C) ja samuti ka alampinge poolel (näiteks b ja c), siis tarbijate ja trafo enese töörežiim ei muutu. Trafo faasivoolude vektorite järjestus muutub aga vastupidiseks, s. o. vastab nüüd vastujärgnevusvooludele. Järelikult transformeeruvad vastujärgnevusvoolud ühest mähisest teise nagu pärijärgnevusvooludki.

Seega on trafo käitumine päri- ja vastujärgnevusvoolude suhtes ühesugune. Järelikult on aseskeemid joon. 14-5 ja 14-6 kehtivad nii päri- kui ka vastujärgnevusvooludele. Trafo takistus päri- ja

vastujärgnevusvooludele on samuti ühesugune ja võrdub lühisetakistusega Z_k. Võib märkida, et igal sümmeetrilisel ja staatilisel (pöörlevaid osi mittesisaldaval) kolmefaasilisel seadmel (trafod, ülekandeliinid, elektriahjud jne.) on nii päri- kui ka vastujärgnevusvooludele takistus ühesugune.

Trafo nulljärgnevusvoolud ja -vood. Tähte ühendatud mähistes võivad nulljärgnevusvoolud tekkida ainult nulljuhtme olemasolu korral (joon. 16-2, *a*), sest voolud $\dot{I}_{a0}$, $\dot{I}_{b0}$, $\dot{I}_{c0}$ on suuruselt võrdsed ja faasilt ühtivad ning seega igal hetkel faasimähistes ühesuguselt suunatud. Sellepärast võib nende voolude ahel sulguda ainult läbi nulljuhtme. Nulljuhtme vool

$$\dot{I}_z = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 3\dot{I}_{a0}. \qquad (16\text{-}7)$$



Joon. 16-2. Nulljärgnevusvoolud mähistes, mis on ühendatud nulljuhtmega tähte (*a*) ja kolmnurka (*b*)

Kui trafo nullpunkt on maandatud, võib nulljuhtmeks olla ka maapind.

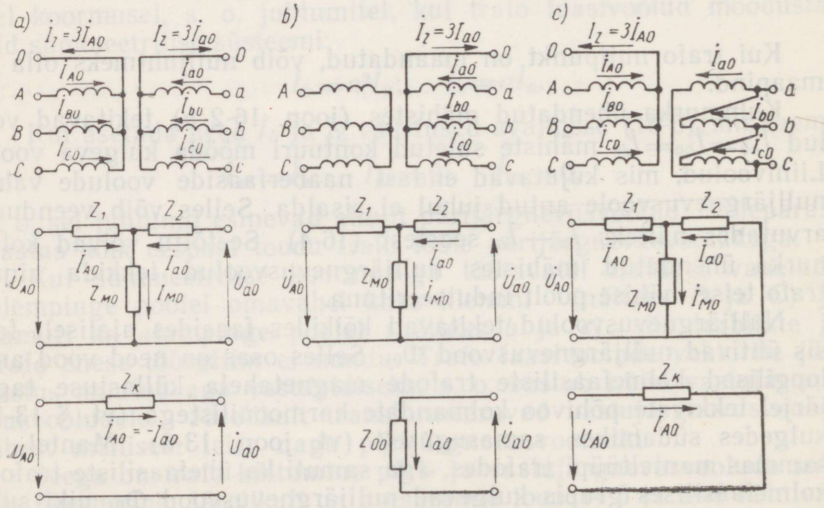
Kolmnurka ühendatud mähistes (joon. 16-2, *b*) tekitavad voolud $\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{b0} = \dot{I}_{c0}$ mähiste suletud kontuuri mööda kulgeva voolu. Liinivoolud, mis kujutavad endast naaberfaaside voolude vahet, nulljärgnevusvoole antud juhul ei sisalda. Selles võib veenduda, arvutades näiteks $\dot{I}_a - \dot{I}_b$ seostest (16-4). Seetõttu võivad kolmnurka ühendatud mähistes nulljärgnevusvoolud tekkida ainult trafo teise mähise poolt indutseerituna.

Nulljärgnevusvoolud tekitavad kõikides faasides ajaliselt faasis ühtivad nulljärgnevusvood Φ_{0j}. Selles osas on need vood analoogilised kolmefaasiliste trafode magnetahela küllastuse tagajärjel tekkivate põhivoo kolmandate harmoonilistega (vt. § 13-1), kulgedes südamikes samasuguselt (vt. joon. 13-6). Mantel- ja sammas-manteltüüpi trafodes, aga samuti ka ühefaasiliste trafode kolmefaasilises grupis kulgevad nulljärgnevusvood Φ_{0j} piki suletud terassüdamikku (vt. joon. 13-6, *a* ja *b*). Sellepärast on viima-

sel juhul magnetiline takistus neile voogudele väike ja juba väikesed voolud $\dot{I}_{a0}=\dot{I}_{b0}=\dot{I}_{c0}$ võivad tekitada suuri nulljärgnevusvooge. Tõepoolest, kui vool $\dot{I}_{a0}$ võrdub trafo tühijooksuvooluga, siis voog Φ_{0j} võrdub trafo normaalse töövooga. Kolme sambaga trafos nulljärgnevusvood on igal hetkel suunatud kõikides sammastes ühtemoodi ja sulguvad sellest tingituna ühelt ikkelt teisele läbi trafo õli ja -paagi (vt. joon. 13-6, *c*). Sel juhtumil on magnetiline takistus Φ_{0j}-le suhteliselt suur, paagi seintes aga indutseeritakse pöörisvoolud ja tekivad kaod.

Öeldust selgub, et nulljärgnevusvoolud ja -vood mõjuvad mitmesuguse konstruktsiooniga ja mähiste erineva ühendusega trafodes analoogiliselt magneetimisvoolu ja -voo kolmandate harmoonilistega. Erinevus on ainult selles, et esimesed muutuvad põhisagedusega, teised aga kolmekordse sagedusega.

Trafo aseskeemid ja takistused nulljärgnevusvooludele. Nulljärgnevusvoolude tekitatud vood indutseerivad primaar- ja sekundaarmähises enda- ja vastastikuse induktsiooni elektromotoorjõud, millele vastavad mähiste enda- ja vastastikuse induktsiooni induktiivtakistused. Kui taandada mähised ühesugusele keerdude arvule, siis võib nulljärgnevusvooludele koostada samasuguse *T*-kujulise aseskeemi (joon. 16-3) kui pärijärgnevusvooludelegi. Aseskeemi üksikute elementide parameetrid sõltuvad seejuures trafo magnet-



Joon. 16-3. Nulljärgnevus-aseskeemid

ahela ja mähiste ehitusest, kuid ei sõltu mähiste ühendusskeemist. Viimasest sõltub ainult aseskeemide kuju väljundklemmide suhtes.

Trafos mähiste ühendusviisiga Y_0/Y_0 võivad nulljärgnevusvoolud esineda nii primaar- ja sekundaarmähistes enestes kui ka trafovälistes primaar- ja sekundaarahelates. Sellepärast ei erine sel juhtumil aseskeemid nulljärgnevusvooludele (joon. 16-3, *a*) oma kujult pärijärgnevusvoolude aseskeemidest. Y/Y_0 ühendusskeemi puhul ei saa nulljärgnevusvoolud nulljuhtmeta mähises eksisteerida ja sellepärast on aseskeem nulljärgnevusvooludele selle mähise poolt avatud (joon. 16-3, *b*). Nulljuhtmeta mähise klemmidel esineb aga seevastu nulljärgnevus-faasipinge U_{A0}, mille indutseerib Y_0 ühenduses oleva mähise nulljärgnevusvool. Trafol mähiste ühendusviisiga $\triangle/Y_0$ võivad nulljärgnevusvoolud samuti esineda mõlemates mähistes, kuid kolmnurka ühendatud mähis on nende voolude suhtes lühistatud ja seetõttu ei saa nulljärgnevusvoole selle välisahelas olla. Sellepärast on antud juhtumil aseskeemid nulljärgnevusvooludele (joon. 16-3, *c*) $\triangle$-lülituses oleva mähise poolt lühistatud.

Joon. 16-3 kujutatud aseskeemide takistused

$$Z_1 = r_1 + jx_1; \quad Z_2 = r_2 + jx_2$$

sisaldavad aktiivtakistusi r_1, r_2 ja puisteinduktiivtakistusi x_1, x_2, mis praktiliselt ei erine nende takistuste väärtustest päri- ja vastujärgnevusvooludele.

Magneetimisahela takistus Z_{M0} mantel-, sammas-mantel ja grupitrafodel ei erine praktiliselt samuti magneetimisahela takistusest pärijärgnevusvooludele Z_M, sest vaadeldaval juhtumil nulljärgnevusvood kulgevad ka piki suletud terassüdamikku. Kui nulljärgnevusvoolud esinevad mõlemas mähises, siis sel juhtumil moodustab magneetimisvool vaid väikese osa summaarsest nulljärgnevusvoolust. Järelikult võib siin magneetimisvoolu jätta arvestamata, mispuhul saame lihtsustatud aseskeemid, nagu on näidatud joon. 16-3, *a* ja *c* alumises osas. Seejuures $Z_k = Z_1 + Z_2$.

Kolme sambaga trafol on Z_{M0} kümneid ja sadu kordi väiksem Z_M-st, sest nulljärgnevusvoog sulgub läbi õhu. Sel juhtumil on harilikult $Z_{M0} \approx (7 \ldots 15) Z_k$ ja võib ilma suurema veata samuti kasutada ligikaudseid aseskeeme joon. 16-3, *a* ja *c*.

Nulljärgnevus-põhivoost indutseeritud elektromotoorjõud $\dot{E}_{a0}$ võrdub vastupidise märgiga võetud pingega aseskeemi magneetimisahela klemmidel:

$$\dot{E}_{a0} = -Z_{M0}\dot{I}_{M0}. \qquad (16\text{-}8)$$

Kolmefaasilise trafo nulljärgnevustakistus Z_{0j} tervikuna kujutab endast trafo takistust nulljärgnevusvooludele, mis on mõõdetud ühes mähises juhtumil, kui kõik teise mähise väljastusklemmid

on lühistatud. Seejuures juhtumil joon. 16-3, *a* saadakse nulljärgnevustakistuse kaks väärtust, mis praktiliselt on võrdsed (eeldatakse, et mähised on taandatud ühesugusele keerdude arvule). Mantel-, sammas-mantel- ja grupitrafodel $Z_{M0} \gg Z_1 \approx Z_2$ ja seepärast

$$Z_{0j} \approx Z_1 + Z_2 = Z_k. \qquad (16\text{-}9)$$

Kuid ka sammastrafodel on seos (16-9) praktilisteks arvutusteks piisava täpsusega. Seega on neil juhtumitel Z_{0j} väike.

Joon. 16-3, *b* toodud skeemis ei ole takistuse Z_{0j} leidmisel Y-mähise poolsest küljest mõtet, sest $I_{A0} = 0$, aga Y_0-mähise poolt

$$Z_{0j} = Z_2 + Z_{M0} = Z_{00}. \qquad (16\text{-}10)$$

Seejuures mantel-, sammas-mantel- ja grupitrafol $Z_{M0} = Z_M$ ja sellepärast Z_{0j} on suur ning võrdub tühijooksutakistusega pärijärgnevusvooludele (vt. § 14-5):

$$Z_{0j} = Z_0. \qquad (16\text{-}11)$$

Kolme sambaga trafol on joon. 16-3, *b* kujutatud juhtumil $Z_k < < Z_{0j} < Z_0$.

Joon. 16-3, *c* juhtumil takistuse Z_{0j} määramisel △-mähise poolsest küljest ei ole samuti mõtet, sest liinivooludes nulljärgnevuskomponenti ei ole, Y_0-mähise poolsest küljest aga

$$Z_{0j} = Z_1 + \frac{Z_2 Z_{M0}}{Z_2 + Z_{M0}} \qquad (16\text{-}12)$$

või

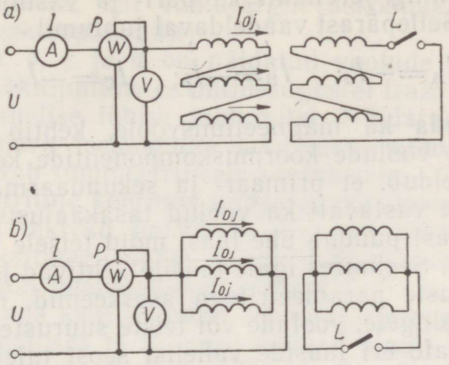
$$Z_{0j} \approx Z_1 + Z_2 = Z_k. \qquad (16\text{-}13)$$

Seega muutub erinevatel trafodel Z_{0j} väärtus piirides lühisetakistusest Z_k kuni tühijooksutakistuseni Z_0.

Z_{0j} eksperimentaalsel määramisel tuleb mähises tekitada voolud

$$\dot{I}_a = \dot{I}_b = \dot{I}_c = \dot{I}_{0j}. \qquad (16\text{-}14)$$

Selleks võib mähise kolm faasi ühendada järjestikku (joon. 16-4, *a*) või rööbiti (joon. 16-4, *b*). Esimene juhtum vastab pingeallika lülitamisele kolmnurga läbilõikekohale mähiste lahtises kolmnurgas, teine aga pingeallika lülitamisele tähtühenduses mähise nulljuhtmesse. Sekundaarmähise ühendusskeemil võib olla samuti kaks varianti. Esimene variant (joon. 16-4, *a*) on eelistatavam, sest võrdus (16-14) on seejuures täidetud kõikides tingimustes. Lüliti *P* joon. 16-4 skeemidel peab olema suletud juhtumil, kui sekundaarmähises võivad esineda nulljärgnevusvoolud (△- või Y_0-ühendus tühiselt väikese nulljuhtme takistusega), ja avatud Y-ühenduse puhul.



Joon. 16-4. Nulljärgnevustakistuste katselise määramise skeemid

Joon. 16-4, *a* toodud skeemis

$$z_{0j}=\frac{U}{3I}; \quad r_{0j}=\frac{P}{3I^2}; \quad x_{0j}=\sqrt{z_{0j}^2-r_{0j}^2}, \tag{16-15}$$

aga joon. 16-4, *b* skeemis

$$z_{0j}=\frac{3U}{I}; \quad r_{0j}=\frac{3P}{I^2}; \quad x_{0j}=\sqrt{z_{0j}^2-r_{0j}^2}. \tag{16-16}$$

Suure võimsusega trafodes on harilikult

$$r_{0j} \ll x_{0j} \quad \text{ja} \quad z_{0j} \approx x_{0j}.$$

16-2. TRAFODE MITTESÜMMEETRILISEL KOORMUSEL ESINEVAD FÜÜSIKALISED TÖÖTINGIMUSED

Mittesümmeetriline koormus nulljärgnevusvoolude puudumisel. Nulljärgnevusvoolud puuduvad juhtumil, kui elektrivõrk on null juhtmeta või kui see juhe on vooluta. Et päri- ja vastujärgnevusvoolud transformeeruvad ühest mähisest teise kõikidel juhtumitel ühtemoodi ja trafo takistused nendele vooludele on ühesugused, siis ka nende mõju võib arvestada koos. Sellepärast pole nulljärgnevusvoolude puudumisel vajadust voole ja pingeid sümmeetrilisteks komponentideks lahutada.

Kui $w_1 = w_2$ ja magneetimisvool lugeda nulliks, siis on päri-järgnevus-primaar- ja -sekundaarvoolud igas faasis suuruselt võrdsed ja märgilt vastassuunalised. See kehtib ka vastujärgnevus-

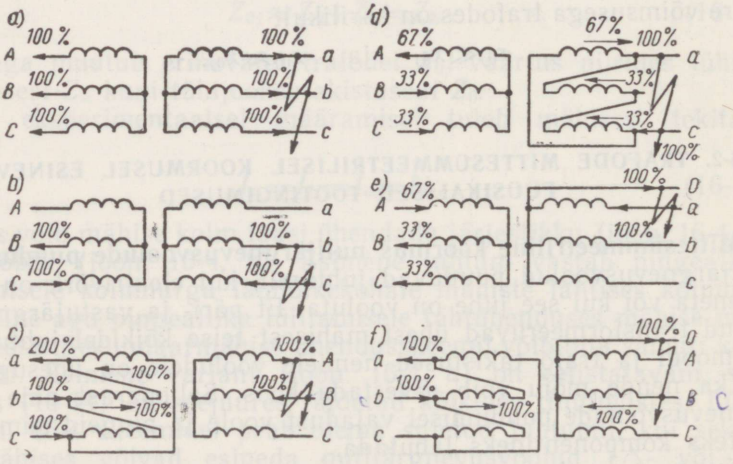
voolude kohta ning järelikult ka päri- ja vastujärgnevusvoolude summa kohta. Sellepärast vaadeldaval juhtumil

$$\dot{I}_A = -\dot{I}_a; \quad \dot{I}_B = -\dot{I}_b; \quad \dot{I}_C = -\dot{I}_c. \qquad (16\text{-}17)$$

Kui arvestada ka magneetimisvoole, kehtib võrdus (16-17) mõlema mähise voolude koormuskomponentide kohta.

Öeldust järeldub, et primaar- ja sekundaarmähiste magneetimisergutused ja vastavalt ka voolud tasakaalustuvad igas faasis eraldi. Sellepärast puudub ühe faasi mõju teisele ja iga faasi võib vaadelda eraldi. Seejuures igale faasile kehtivad joon. 14-5 ja 14-6 toodud ühesuguste parameetritega aseskeemid, mida võib kasutada iga faasi pingete, voolude või teiste suuruste vaheliste seoste arvutamisel. Trafo eri faaside vahelist seost tuleb aga tingimata vaadelda ainult liini- ja faasisuuruste vaheliste suhete leidmisel sõltuvalt mähiste ühendusskeemidest.

Mittesümmeetrilisel koormusel on pingelangud ΔU trafo eri faasides erinevad. Kui aga eri faaside voolud ei ületa nimiväärtusi, siis $I_{0j} = 0$ puhul on ΔU väärtused suhteliselt väikesed, sest trafo takistus Z_k on suhteliselt väike. Siit võib järeldada, et trafo mittesümmeetriline koormus $I_{0j} = 0$ puhul faasi- ja liinipingete sümmeetriat tunduvalt ei moonuta. Sellepärast ka $I_{0j} = 0$ puhul trafo töös suuri komplikatsioone ei teki. Märgime, et vastavalt ГОСТ 183-55 loetakse pingete või voolude kolmefaasiline süsteem prakti-



Joon. 16-5. Voolude jaotumine trafomähistes mähiste erinevate ühendusskeemide ja lühiste puhul

liselt sümmeetriliseks, kui vastujärgnevuskomponent ei ole üle 5% pärijärgnevuskomponendist.

Joon. 16-5, *a*, *b*, *c* ja *d* on näidatud voolude jaotumine trafo faasimähistes ja liinijuhtmetes mitmesugustel trafo sekundaarpoole liiniklemmide vahelise lühise juhtumitel. Näidatud voolujaotused kehtivad ka erineva iseloomuga koormuste puhul, kui $I_{0j} = 0$. Joon. 16-5, *a* vastab sümmeetrilisele koormusele.

Mittesümmeetriline koormus nulljärgnevusvoolude puhul. Nulljärgnevusvoolud tekivad harilikult siis, kui sekundaarmähis on ühendatud nulljuhtmega tähte ja nulljuhtme ning liinijuhtmete vahele on lülitatud ühefaasilised tarbijad.

On vaja eristada kaht juhtumit: 1) nulljärgnevusvoolud tekivad trafo mõlemas mähises ja 2) need tekivad ainult ühes mähises.

Esimesel juhtumil (trafod mähiste ühendusviisiga Y_0/Y_0 ja $\triangle/Y_0$) võib nulljärgnevus-magneetimisvoolu jätta arvestamata, sest see moodustab ainult väikese osa kogu nulljärgnevusvoolust ja

$$\dot{I}_{A0} = \dot{I}_{B0} = \dot{I}_{C0} = -\dot{I}_{a0} = -\dot{I}_{b0} = -\dot{I}_{c0}. \qquad (16\text{-}18)$$

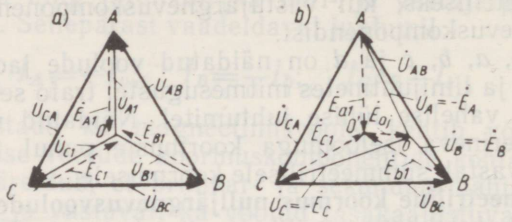
Sellepärast tasakaalustuvad nulljärgnevusvoolude magnetomotoorjõud vastastikku trafo igas faasis, nulljärgnevustakistus $Z_{0j} = Z_k$ ning sel juhtumil on rakendatav lihtsustatud aseskeem (joon. 16-3, *a* ja *c*, all). Et seetõttu kõikide järgnevustega voolud transformeeruvad ühest mähisest teise ühesuguselt ja neil on ka ühesuguste parameetritega ühesugused aseskeemid, siis antud juhtumil puudub samuti vajadus faaside koguvoolude ja pingete sümmeetrilisteks komponentideks lahutamiseks. Sekundaarpinge nulljärgnevuskomponendid $\dot{U}_{a0}$ tekivad antud juhtumil ainult suhteliselt väikeste pingelangude $Z_k\dot{I}_{A0}$ arvel. Sellepärast moonutub mittesümmeetriliselt koormatud $\triangle/Y_0$ ühenduses trafo kolmefaasiline pingesüsteem suhteliselt vähe.

Teisel juhtumil (Y/Y_0 ühenduses) esinevad nulljärgnevusvoolud I_{a0} ainult sekundaarmähises ja kujutavad endast magneetimisvoole, sest neid ei tasakaalusta primaarmähise voolud I_{A0}. Nulljärgnevuselektromotoorjõud

$$\dot{E}_{0j} = -Z_{M0}\dot{I}_{a0}$$

võivad seetõttu omada suuri väärtusi. Näiteks grupitrafo puhul, millel $Z_{M0} = Z_M$, on juba $I_{a0} = I_0 \approx (0{,}02 \ldots 0{,}05)\, I_N$ juures elektromotoorjõud $E_0 \approx U_N$. Selle tulemusena faasi elektromotoorjõudude ja -pingete süsteem moonutub tugevasti, milles võib veenduda alljärgneva põhjal.

Olgu Y/Y_0 ühenduses trafo primaarmähis (Y) lülitatud võrku, mille liinipinged U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} on sümmeetrilised ja on seega pärijärgnevuspingeteks. Primaarsete liini- ja faasipingete vektordiagramm tühijooksul on siis joon. 16-6, *a* näidatud kujuga. Faasi



Joon. 16-6. Faasipingete süsteemi moonutamine nulljärgnevusvoolude esinemisel Y/Y$_0$ lülituses

elektromotoorjõud $\dot{E}_{A1} \approx -\dot{U}_{A1}$, $\dot{E}_{B1} \approx -\dot{U}_{B1}$, $\dot{E}_{C1} \approx -\dot{U}_{C1}$ moodustavad samuti sümmeetrilise pärijärgnevussüsteemi (joon. 16-6, *a*). Sekundaarpingete süsteemi vektordiagramm tühijooksul on täpselt samasuguse kujuga.

Olgu nüüd sekundaarmähis (Y$_0$) koormatud mittesümmeetriliselt, sisaldades kõikide järgnevustega voole. Päri- ja vastujärgnevus-sekundaarvoolud transformeeruvad primaarmähisesse, tasakaalustuvad magnetiliselt ning tekitavad seetõttu ainult suhteliselt väikesi pingelange. Primaarmähise poolt tasakaalustamata nulljärgnevus-sekundaarvoolud indutseerivad mõlemas mähises elektromotoorjõud E_{0j}, mis liituvad pärijärgnevus-elektromotoorjõududele. Selle tulemusena on summaarsed faasi elektromotoorjõud

$$\dot{E}_A = \dot{E}_{A1} + \dot{E}_{0j};$$
$$\dot{E}_B = \dot{E}_{B1} + \dot{E}_{0j};$$
$$\dot{E}_C = \dot{E}_{C1} + \dot{E}_{0j}.$$

Primaarsete faasipingete süsteem on pingelange arvestamata määratud vektoritega:

$$\dot{U}_A \approx -\dot{E}_A; \quad \dot{U}_B \approx -\dot{E}_B; \quad \dot{U}_C \approx -\dot{E}_C$$

ja on tugevasti moonutatud. Nullpunkt aga nihkub diagrammil suuruse $\dot{E}_{0j}$ võrra ega ühti enam liinipingete kolmnurga raskuskeskmega (joon. 16-6, *b*). Analoogilise kujuga on ka sekundaarpingete diagramm. Vektorite $\dot{E}_{0j}$ suund sõltub voolude I_{a0} faasist ja on määratud koormuse tingimustega. $\dot{E}_{0j}$ joon. 16-6, *b* vastab juhtumile, kui sekundaarpoole *a* faas on koormatud aktiivvooluga ja $I_b = I_c = 0$. Nulljärgnevuspinged ei mõjuta liinipingete väärtusi, sest faasipingete vahedes $\dot{U}_{ab} = \dot{U}_a - \dot{U}_b$ jne. nulljärgnevuskomponendid kaovad.

Seega võivad trafodes mähiste ühendusviisiga Y/Y$_0$ nulljärgnevusvoolud tunduvalt moonutada faasipingete suurusi, mis pole

vastuvõetav ja on ohtlik ühefaasilistele tarbijatele. Grupi-, mantel- ja sammas-manteltüüpi trafodes mähiste ühendusviisi Y/Y_0 puhul faasipingete süsteem moonutub tugevasti juba nulljärgnevusvoolude tühise väärtuse puhul. Sellepärast nendes trafodes ühendusviisi Y/Y_0 harilikult ei kasutata. Kui aga erijuhtumitel mingite põhjuste tõttu on soovitav ühendada mõlemad mähised tähte, siis lisatakse igale faasile veel kolmas niinimetatud tertsiaarmähis, mis on ühendatud kolmnurka. Kui see mähis on määratud ainult nulljärgnevusvoolude tasakaalustamiseks, siis selle otsi välja ei viidagi. Kui see on aga arvestatud ka koormamiseks ja tema otsad on välja viidud, siis saadakse kolme mähisega trafo (vt. § 18-1). Märgime, et nulljuhtme või maanduse olemasolu trafo mõlemal poolel mähiste ühendusviisi Y_0/Y_0 puhul ei garanteeri nulljärgnevusvoolude tasakaalustumist, sest primaarkontuuri takistus nendele vooludele võib osutuda suureks.

Kolme sambaga trafode puhul mähiste ühendusviisiga Y/Y_0 on faasipingete süsteemi moonutumine nulljärgnevusvoolude esinemisel väiksem, sest $Z_{M0} < Z_M$. NSV Liidus ehitatakse selliseid trafosid võimsusega kuni 6000 kVA. Seejuures vastavalt ГОСТ 401-41 nõutakse, et vool nulljuhtmes ei ületaks 25% nimivoolust. Siis nulljärgnevusvoolud ei ületa $25 : 3 = 8{,}3\%$ nimivoolust.

Märgime, et trafod mähiste ühendusviisiga Y/Z_0 taluvad hästi nulljärgnevusvoole sisaldavaid koormusi, sest need voolud tasakaalustuvad sekundaarmähistes iga samba ulatuses (vt. joon. 12-22). Niisuguseid trafosid kasutatakse laialdaselt välismaal energeetikas.

Voolude jaotumine Y/Y_0 ja $\triangle/Y_0$ ühendusviisi puhul trafode primaar- ja sekundaarmähiste faaside vahel ühefaasiliste lühiste ja koormuste puhul on toodud joon. 16-5, *e* ja *f*.

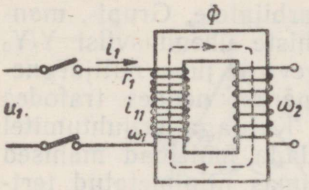
Seitsmeteistkümnes peatükk

SIIRDEPROTSESSID TRAFODES

17-1. TRAFO PINGESTAMINE

Siirdeprotsessid tekivad trafodes ja elektrimasinates nende töörežiimi järsul muutumisel (võrku lülitamine, koormuse muutumine, lühis jne.). Käesolevas peatükis vaadeldakse trafode kõige iseloomulikumaid siirdeprotsesse.

Vaatleme avatud sekundaarmähisega ühefaasilise trafo lülitamist võrku, mille pinge muutub siinuseliselt $u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \psi)$ (joon. 17-1).



Joon. 17-1. Tühijooksul töötava trafo võrku lülitamise skeem

Küllastumata trafo. Oletame alguses, et trafosüdamik pole üldsegi küllastunud ning seetõttu mähise induktiivsus $L_{11} = \text{const}$. Siis sisselülitamisel tekkiv siirdeprotsess väljendub võrrandiga:

$$U_{1m} \sin(\omega t + \psi) = r_1 i_1 + L_{11} \frac{di_1}{dt}. \quad (17\text{-}1)$$

Elektrotehnika teoreetiliste aluste kursusest on teada, et siirdeprotsessi voolu i_1 võib esitada kahe komponendi summana:

$$i_1 = i'_1 + i''_1, \quad (17\text{-}2)$$

millest esimene

$$i'_1 = I_{1m} \sin(\omega t + \psi - \varphi_0), \quad (17\text{-}3)$$

kus

$$\left.\begin{aligned} I_{1m} &= \frac{U_{1m}}{\sqrt{r_1^2 + \omega^2 L_{11}^2}}; \\ \varphi_0 &= \operatorname{arc\,tg} \frac{\omega L_{11}}{r_1}, \end{aligned}\right\} \quad (17\text{-}4)$$

kujutab endast siinuselist püsi- ehk sundvoolu, mis tekitatakse primaarklemmidele rakendatud pinge u_1 toimel, aga teine komponent

$$i''_1 = -I_{1m} \sin(\psi - \varphi_0) e^{-\frac{t}{T_1}} \quad (17\text{-}5)$$

on aperioodilise iseloomuga niinimetatud vabavool, mis ei säili välise elektromotoorjõudude allika toimel, ning sumbub seetõttu (nullini) ajakonstandiga $T_1 = \frac{L_{11}}{r_1}$.

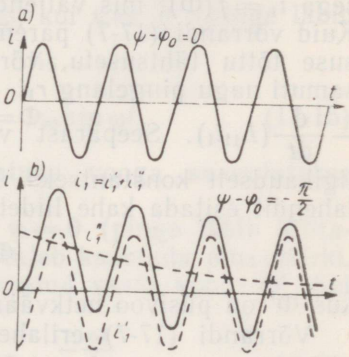
Toodud lahenduse õigsuses võib veenduda, asetades i_1 väärtused avaldistest (17-2) ... (17-5) avaldisse (17-1). Seejuures i'_1 rahuldab võrrandit (17-1), aga i''_1 — võrrandit

$$0 = r_1 i_1 + L_{11} \frac{di_1}{dt}.$$

Ilmselt on näha, et $t = 0$ korral on ka $i_1 = i'_1 + i''_1 = 0$. Seega on vabavoolu algväärtus alati suuruselt võrdne ja vastupidise märgiga püsivoolu algväärtusele. Kui lülitamine toimub niisuguse algfaasiga ψ pinge korral, et $\psi - \varphi_0 = 0$, siis $i''_1 = 0$ ning ahelas tekib kohe püsirežiim (joon. 17-2, *a*). Kui aga $\psi - \varphi_0 =$

$= \pm\frac{\pi}{2}$, siis i''_1 saavutab maksimaalse võimaliku väärtuse, mis võrdub $t = 0$ korral vahelduvvoolu amplituudiga I_{1m} (joon. 17-2, *b*). Voolu maksimaalne hetkväärtus saabub umbes poole perioodi möödumisel lülitamishetkest. Küllalt suure T_1 korral $i_{1\,max} \approx 2I_{1m}$.

Esitatust järeldub, et vabavool tekib siis, kui püsi- ehk sundvool lülitamishetkel $t = 0$ ei läbi nulli ning omab mõningat lõplikku väärtust i'_{10}. Seejuures on vabavoolu algväärtus $i''_{10} = -i'_{10}$ niisugune, et voolu koguväärtus $t = 0$ korral võrdub, vastavalt lülitamise algtingimustele, nulliga.



Joon. 17-2. Küllastumata trafo lülitusvool

Vaadeldud vahelduvvoolu induktiivahela lihtsaim siirdeprotsess on oma olemuselt iseloomulik ka keerukamatel juhtumitel. Ahela töörežiimi igasugusel rikkumisel ilmnevas siirdeprotsessis tekib vaba aperioodiline vool, mis sumbub energia hajumise tagajärjel aktiivtakistustes. Aperioodilise voolu algväärtus on seejuures võrdne alg- (eelneva) ning uue (järgneva) režiimi püsivoolude hetkväärtuste vahega režiimi muutva tõukeimpulsi (näiteks pingeimpulsi) rakendamise momendil. Vabavool on seega induktiivsust omava inertse ahela reaktsioon impulsile, mis püüab muuta ahela režiimi. See vabavool silub üleminekut uuele režiimile, lubamata voolu hetkelisi suuruselt lõplikke muutumisi, mis inertses ahelas ei ole võimalikud. Esitatud seisukohti illustreerivaid näiteid võib leida allpool antud peatükis ning raamatu järgnevates osades.

Küllastunud trafo. Reaalse trafo korral on vaja tingimata arvestada südamiku märgatavat küllastatust. Seepärast $L_{11} \neq$ $\neq$ const ning võrrandi (17-1) viimase liikme asemel tuleb kirjutada

$$\frac{d(L_{11}i_1)}{dt},$$

kusjuures

$$L_{11}i_1 = \Psi = w_1\Phi \qquad (17\text{-}6)$$

kujutab mähise aheldusvoogu.

Antud juhtumil on otstarbekohane võtta muutuva voolu i_1 asemel kasutusele muutuv voog Φ. Vastavalt avaldisele (17-6)

$$i_1=\frac{w_1\Phi}{L_{11}};\qquad \frac{d(L_{11}i_1)}{dt}=w_1\frac{d\Phi}{dt}$$

ning seepärast saame (17-1) asemel

$$\frac{U_{1m}}{w_1}\sin(\omega t+\psi)=\frac{r_1}{L_{11}}\Phi+\frac{d\Phi}{dt}. \qquad (17\text{-}7)$$

Selle võrrandi integreerimine on küllalt raske seetõttu, et siin $L_{11}\neq$ const. Viimane on määratav keeruka mittelineaarse seosega $i_1=f(\Phi)$, mis väljendub trafo magnetilise karakteristikuga. Kuid võrrandi (17-7) parempoolse poole esimene liige on r_1 väiksuse tõttu tähtsusetu, võrreldes selle võrrandi teise liikmega, samuti nagu pingelang r_1i_1 on väike, võrreldes elektromotoorjõuga $-\frac{d}{dt}(L_{11}i_1)$. Seepärast võib (17-7) integreerimisel L_{11} võtta ligikaudselt konstantseks. Neil tingimustel võib võrrandi (17-7) lahendit esitada kahe liidetava summana:

$$\Phi=\Phi'+\Phi'', \qquad (17\text{-}8)$$

kus Φ' on püsivoo hetkväärtus ja Φ'' — vabavoo hetkväärtus.

Võrrandi (17-7) erilahend kujutab endast voogu

$$\Phi'=\Phi_m\sin(\omega t+\psi-\varphi), \qquad (17\text{-}9)$$

kus

$$\Phi_m=\frac{L_{11}U_{1m}}{w_1\sqrt{r_1^2+\omega^2L_{11}^2}}; \qquad (17\text{-}10)$$

$$\varphi=\operatorname{arc\,tg}\frac{\omega L_{11}}{r_1}\approx\frac{\pi}{2}. \qquad (17\text{-}11)$$

Voog Φ'' määratakse võrrandi

$$0=\frac{r_1}{L_{11}}\Phi''+\frac{d\Phi''}{dt}$$

lahendiga ja võrdub

$$\Phi''=Ce^{-\frac{r_1t}{L_{11}}}, \qquad (17\text{-}12)$$

kus C on algtingimustega määratav integreerimiskonstant.

Lülitamishetkel võib südamikus esineda mõningane jääkvoog $\pm\Phi_0$. Seepärast, võttes edaspidi $\varphi=\frac{\pi}{2}$, saame valemite (17-8), (17-9) ja (17-12) alusel hetke $t=0$ jaoks

$$[\Phi]_{t=0}=[\Phi'+\Phi'']_{t=0}=-\Phi_m\cos\psi+C=\pm\Phi_0,$$

millest

$$C = \Phi_m \cos\psi \pm \Phi_0$$

ja järelikult

$$\Phi'' = (\Phi_m \cos\psi \pm \Phi_0) e^{-\frac{r_1 t}{L_{11}}}. \qquad (17\text{-}13)$$

Seega valemite (17-8), (17-9) ja (17-13) alusel saame

$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t + \psi) + (\Phi_m \cos\psi \pm \Phi_0) e^{-\frac{r_1 t}{L_{11}}}. \qquad (17\text{-}14)$$

Kõige soodsam lülitamishetk on siis, kui $\psi = \frac{\pi}{2}$ (pinge läbib lülitamishetkel maksimumi) ja $\Phi_0 = 0$. Siis

$$\Phi = -\Phi_m \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = \Phi_m \sin\omega t, \qquad (17\text{-}15)$$

s. t. normaalrežiim siinuseliselt muutuva vooga saavutatakse hetkeliselt ning siirdeprotsess puudub.

Kõige ebasoodsam on juhtum, kui $\psi = 0$ (pinge läbib lülitamishetkel nulli ning avaldises (17-14) tuleb kasutada plussmärki, s. t. kui voog Φ_0 on hetkel $t = 0$ suunatud vastu voole Φ'. Sel juhtumil, vastavalt (17-14)-le

$$\Phi = -\Phi_m \cos\omega t + (\Phi_m + \Phi_0) e^{-\frac{r_1 t}{L_{11}}}. \qquad (17\text{-}16)$$

Kõvera $\Phi = f(t)$ kuju antud juhtumi jaoks on esitatud joon. 17-3. Voog Φ saavutab maksimaalväärtuse umbes pool perioodi pärast sisselülitamist, s. t. kui $\omega t \approx \pi$. Seejuures

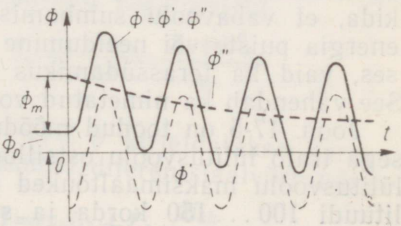
$$e^{-\frac{r_1 t}{L_{11}}} = e^{-\frac{r_1 \pi}{\omega L_{11}}} \approx 1, \qquad (17\text{-}17)$$

sest et harilikult $r_1 \ll \omega L_{11}$. Seepärast (17-16) alusel

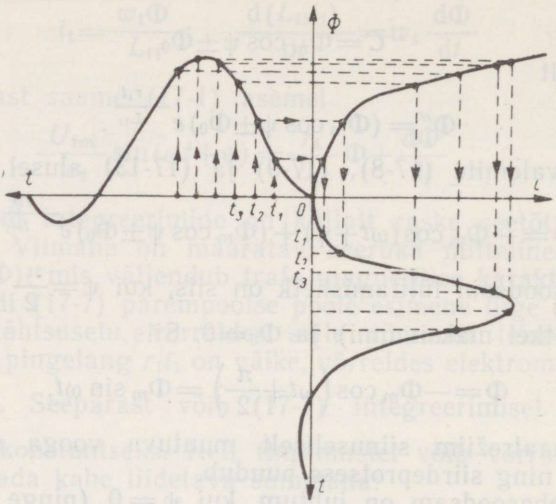
$$\Phi_{max} \approx 2\Phi_m + \Phi_0. \qquad (17\text{-}18)$$

Seega Φ_{max} ületab üle kahe korra töövoo normaalväärtust ja järelikult südamik küllastub erakordselt tugevasti, mis omakorda põhjustab küllalt suuri magneetimisvoole.

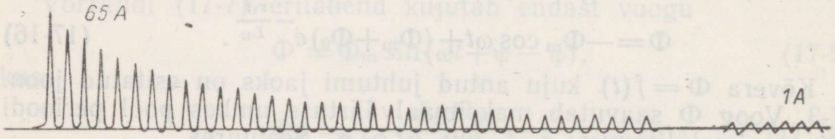
Kui trafo magneetimiskõver $\Phi = f(i)$ (parempoolne veerand joon. 17-4) ning voo muutumise kõver $\Phi = f(t)$ vastavalt avaldisele (17-16) (vasakpoolne osa joon. 17-4) on tuntud,



Joon. 17-3. Magnetvoo $\Phi = f(t)$ muutumine trafo mittesoovitaval hetkel võrku lülitamisel



Joon 17-5 Trafo lülitusvoolu ostsillogramm



Joon. 17-4. Lülitusvoolu kõvera konstrueerimine

siis saab konstrueerida lülitusvoolu muutumise kõverat $i = f(t)$ (alumine osa joon. 17-4).

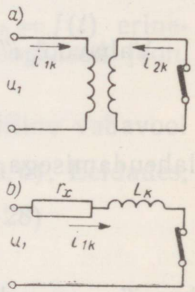
Kuigi ülal vaadeldi ühefaasilise trafo lülitamist, on protsessid kolmefaasilise trafo puhul samasuguse iseloomuga. Tuleb märkida, et vabavoolu sumbumise põhjustab vabavoo magnetvälja energia puiste või neeldumine mitte üksnes mähise aktiivtakistuses, vaid ka terassüdamikus seal tekkiva pöörisvoolukao tõttu. See vähendab ka nimetatud voolu sumbumise ajakonstanti.

Joon. 17-5 on toodud mõõduka küllastusega keskmise võimsusega trafo lülitusvoolu ostsillogramm. Paljudel juhtumitel võivad lülitusvoolu maksimaaltõuked ületada tühijooksu püsivoolu amplituudi 100 ... 150 korda ja sellele vastavalt saavutada mitmekordse nimivoolu amplituudiväärtuse. Niisugused lülitusvoolu tõuked põhjustavad raskusi trafosid kaitsvate voolureleede konstrueerimisel ja seadistamisel, sest need võivad trafo võrku lülita-

misel esile kutsuda nende releede vale rakendumise. Samal ajal aga, nagu räägiti eespool, võib küllastuse puudumisel lülitusvoolu maksimaalne tõuge ületada tühijooksu püsivoolu amplituudi ainult kaks korda.

17-2. TRAFO JÄRSK LÜHIS

Lühisevoolud. Paragrahvis 14-5 vaadeldi lühise püsirežiimi trafo sekundaarklemmidel. Lühis tekib ekspluatatsioonitingimustes harilikult järsku, mitmesuguste rikete tõttu elektrivõrkudes (elektriläbilöök või isolatsiooni mehaaniline vigastus, personali ekslik tegevus jne.). Seejuures tekib trafos järsk siirdeprotsess, millega kaasnevad suured voolud. Need võivad põhjustada trafo vigastumise ohu. Vaatleme järsu lühise protsessi ühefaasilise trafo sekundaarklemmidel (joon. 17-6, *a*), eeldades seejuures, et primaarpinge efektiivväärtus U_1 jääb muutumatuks. Selle protsessi iseärasused on iseloomulikud ka lühisele kolmefaasilise trafo sekundaarklemmidel.



Joon. 17-6. Trafo lühise skeem

Püsilühisel on magneetimisvool, võrreldes mähise koguvooluga (vt. § 14-5) küllalt väike. Nii on see ka järsul lühisel. Peale selle on lühisevoolu suure väärtuse tõttu pingelang primaarmähise aktiivtakistusel r_1 ning puiste-induktiivtakistusel x_1 ka küllaltki suur. Tõepoolest, harilikult $z_1 \approx z'_2$ ning vastavalt skeemile joon. 14-6 on lühisel $I_1 z_1 \approx 0{,}5E_1$. Seepärast on elektromotoorjõud E_1 ning südamiku voog Φ peaaegu kaks korda väiksemad oma normaalväärtusest ning südamik ei ole küllastunud. Samadel põhjustel võib järsul lühisel samuti jätta arvestamata ka magneetimisvoolu ja võtta seega arvutuse aluseks trafo lihtsustatud aseskeemi (joon. 17-6, *b*). Selle skeemi parameetrid

$$r_k = r_1 + r'_2; \qquad L_k = \frac{x_k}{\omega} = \frac{x_1 + x'_2}{\omega}$$

võib lugeda konstantseks.

Vastavalt skeemile joon. 17-6, *b* kirjeldatakse järsu lühise protsessi trafo sekundaarklemmidel diferentsiaalvõrrandiga

$$U_{1m} \sin(\omega t + \psi) = r_k i_{1k} + L_k \frac{\mathrm{d}i_{1k}}{\mathrm{d}t}. \qquad (17\text{-}19)$$

See võrrand on täiesti analoogiline võrrandiga (17-1), mis on ka loomulik, sest need mõlemad võrrandid vastavad oma olemuselt konstantsete parameetritega reaktiivpooli lülitamisele siinus-

pingele. Vaadeldaval juhtumil lühisevool i_{1k} koosneb samuti kahest komponendist: püsivoolust i'_{1k} ja vabavoolust i''_{1k}, s. t.

$$i_{1k}=i'_{1k}+i''_{1k}. \tag{17-20}$$

Seejuures vastavalt seostele (17-3) ja (17-4) on püsivool

$$i'_{1k}=I_{1km}\sin(\omega t+\psi-\varphi_k); \tag{17-21}$$

$$\left.\begin{aligned} I_{1km}&=\frac{U_{1m}}{\sqrt{r_k^2+x_k^2}};\\ \varphi_k&=\operatorname{arc\,tg}\frac{x_k}{r_k}. \end{aligned}\right\} \tag{17-22}$$

Vabavool i''_{1k} määratakse võrrandi

$$0=r_k i''_k+L_k\frac{\mathrm{d}i''_k}{\mathrm{d}t}$$

lahendamisega, millest leiame

$$i''_{1k}=i''_{1k0}\,e^{-\frac{r_k t}{L_k}}, \tag{17-23}$$

kus i''_{1k0} on vabavoolu väärtus $t=0$ korral.

Üldjuhtumil, kui trafo oli enne lühist koormatud,

$$[i_{1k}]_{t=0}=[i'_{1k}+i''_{1k}]_{t=0}=i_{10}, \tag{17-24}$$

kus

$$i_{10}=I_{1krmm}\sin(\psi-\varphi_{krm}) \tag{17-25}$$

kujutab endast koormusvoolu hetkväärtust lühise tekkimise hetkel. On loomulik, et $I_{1krmm}<I_{1km}$.

Asetades avaldisse (17-24) i'_{1k}, i''_{1k} ja i_{10} väärtused (17-21), (17-23) ja (17-25)-st, leiame

$$i''_{1k0}=I_{1krmm}\sin(\psi-\varphi_{krm})-I_{1km}\sin(\psi-\varphi_k). \tag{17-26}$$

Avaldiste (17-20), (17-21), (17-23) ja (17-26) alusel on kogu lühisevool

$$i_{1k}=I_{1km}\sin(\omega t+\psi-\varphi_k)-[I_{1km}\sin(\psi-\varphi_k)-$$
$$-I_{1krmm}\sin(\psi-\varphi_{krm})\,e^{-\frac{r_k t}{L_k}}]. \tag{17-27}$$

Kui lühis toimus tühijooksul, siis $I_{1krmm}=0$ ja (17-27) asemel saame

$$i_{1k} = I_{1km} \sin(\omega t + \psi - \varphi_k) - I_{1km} \sin(\psi - \varphi_k) e^{-\frac{r_k t}{L_k}}. \quad (17\text{-}28)$$

Lühisevool on induktiivse iseloomuga ning $0 < \psi_k < 90°$. Harilikult on trafo koormus induktiivse iseloomuga ning seetõttu $0 < \varphi_{krm} < 90°$. Neil tingimustel, nagu nähtub avaldisest (17-26), põhjustab eelnev koormus aperioodilise vabavoolu vähenemise ning sellega ka lühisevoolu tippväärtuse vähenemise. Vastupidi — mahtuvusliku iseloomuga eelneval koormusel i''_{1k0} suureneb. Praktikas trafodel peaaegu ei esine mahtuvuslikku koormust ning seetõttu osutub võrdusega (17-28) väljendatav lühis tühijooksul kõige ebasoodsamaks. Seda juhtumit me peamegi edaspidi silmas.

Sõltuvalt nurga $\psi - \varphi_k$ suurusest evib kõver $i_{1k} = f(t)$ erinevaid kujusid. Iseloomulikumad juhtumid on analoogilised joon. 17-2 esitatuga.

Suuruse $\psi - \varphi_k = \pm\frac{\pi}{2}$ korral omavad aperioodiline vabavool ning voolu tipud suurimaid väärtusi (vt. joon. 17-2, *b*), Eeldades, et $\psi - \varphi_k = -\frac{\pi}{2}$, saame vastavalt avaldisele (17-28)

$$i_{1k} = -I_{1km} \cos \omega t + I_{1km} e^{-\frac{r_k t}{L_k}}. \quad (17\text{-}29)$$

Voolu maksimaal- ehk löökväärtus $i_{1k\,l}$ saavutatakse ligikaudu $\omega t = \pi$ korral ehk ajavahemiku $t = \frac{\pi}{\omega}$ järel pärast lühise teket. Seejuures vastavalt avaldisele (17-29)

$$i_{1k\,l} = I_{1km}\left(1 + e^{-\frac{\pi r_k}{x_k}}\right). \quad (17\text{-}30)$$

Selle avaldise sulgudes olevat kordajat

$$k_l = 1 + e^{-\frac{\pi r_k}{x_k}} \quad (17\text{-}31)$$

nimetatakse l ö ö g i t e g u r i k s. Viimane näitab kui mitu korda on lühise löökvool suurem lühise püsivoolu amplituudiväärtusest. Sõltuvalt suurusest r_k/x_k võib see tegur muutuda piirides $k_l = 1 \ldots 2$. Võimsatel trafodel $k_l = 1{,}7 \ldots 1{,}8$, väikestel aga $k_l = 1{,}2 \ldots 1{,}3$. Näiteks trafol võimsusega 1000 kVA võrduvad lühisepinge ja selle komponendid järgmiste suurustega:

$$u_{k\%} = 6{,}5\%, \quad u_{ka\%} = 1{,}5\% \quad \text{ja} \quad u_{kr\%} = 6{,}32\%.$$

Seejuures

$$k_l = 1 + e^{-\frac{\pi r_k}{x_k}} = 1 + e^{-\frac{\pi u_{ka}}{u_{kr}}} = 1 + e^{-\frac{1{,}5\pi}{6{,}32}} = 1 + e^{-0{,}745} = 1{,}475$$

ning löökvool on

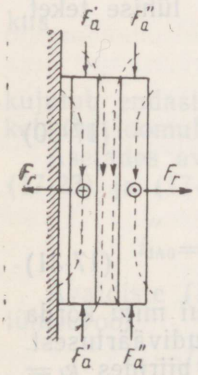
$$\frac{100}{u_{k\%}} k_l = \frac{100}{6{,}5} \cdot 1{,}475 = 22{,}7$$

korda suurem nimivoolu amplituudiväärtusest.

Trafosiseste lühiste korral, kui isolatsiooni vigastumise tagajärjel osa trafomähise keerdudest lühistub, on voolu kordsused mähise vigastatud osas veelgi suuremad, sest et mähise selle osa pinge või elektromotoorjõud vähenevad võrdeliselt keerdude arvu esimese astmega, induktiivtakistus aga väheneb võrdeliselt keerdude arvu ruuduga.

Lühisevoolude toime väljendub trafomähiste suuremas soojenemises ning mähistele mõjuvate suurte elektromagnetiliste jõudude tekkes.

Kaasaegsetes elektrisüsteemides ja -võrkudes kasutatakse kiiretoimelist releekaitset või sulavkaitsmeid ning võrgu vigastatud osad ja vigastatud seadmestik lülitatakse sekundi murdosa vältel pärast lühise algust võrgust välja. Seetõttu välislühistel trafomähised ei jõua soojeneda ohtliku temperatuurini. Kuid siselühistel lühistatud keerdude traadid harilikult sulavad ära ja trafo rikneb.



Joon. 17-7. Puistemagnetvälja iseloom ning elektromagnetilised jõud trafos lühise korral

Joon. 17-7 on näidatud kontsentriliste silindermähistega trafo puistemagnetvälja pilt. Sellelt pildilt järeldub, et mähistele mõjuvad kahesugused elektromagnetilised jõud: 1) radiaaljõud F_r, mis püüavad sisemist mähist radiaalsuunas kokku suruda ning välimist mähist laiali tõmmata ja 2) aksiaaljõud F_a, mis püüavad mähiseid pikisuunas kokku suruda. Osa keerdude kõrvaldamisel (näiteks pinge reguleerimisel) muutub puistevälja jaotumise iseloom, mis muudab samuti ka mõjuvaid elektromagnetilisi jõude. Seejuures kasvavad tunduval määral just aksiaaljõud.

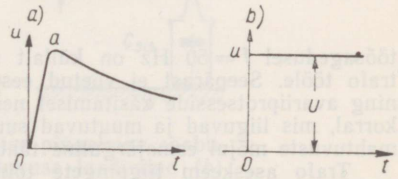
Mähisele mõjuvad elektromagnetilised jõud on võrdelised voolu ruuduga ning lühistel on nad üsna suured. Seoses sellega osutub trafo projekteerimisel üheks tähtsamaks ülesandeks küllaldase mähiste kinnituse (toestuse) tagamine.

Magnetväljade keeruka iseloomu tõttu on mähisele mõjuvate elektromagnetiliste jõudude täpne arvutus keeruline. Nende jõudude arvutamise ligikaudsed valemid tuuakse ulatuslikumates elektrimasina- ja trafoalastes käsiraamatutes ning trafode arvutamise ja projekteerimise õpikutes.

17-3. LIIGPINGED TRAFODES

Üldandmeid liigpingetest. Elektrivõrkude töötamisel tekivad neis lühiaegsed pingeimpulsid, mille suurused võivad mitu korda ületada normaalseid tööpingeid. Niisuguseid pingeimpulsse nimetatakse liigpingeteks. Liigpinged tekivad mitmesugustel põhjustel: 1) kommutatsioonioperatsioonid (liinide, trafode ja pöörlevate elektrimasinate sisse- ja väljalülitamine); 2) maaühendused elektrikaare tõttu; 3) atmosfäärilised välgulahendused vahetult ülekandeliinides või nende läheduses. Viimasel juhtumil indutseeritakse kõrge pinge elektriülekandeliini juhtmetes välguvoolu tagajärjel. Kõige ohtlikumateks osutuvad harilikult atmosfäärilised liigpinged, mida põhjustavad välgulahendused. Atmosfääriliste liigpingete amplituudid saavutavad väärtusi, mida mõõdetakse megavoltides.

Liigpingetel on lühiajaliste aperioodiliste või perioodiliste impulsside või lainete iseloom. Võrgu mingis osas tekkivad liigpingelained levivad elektriülekande õhuliinides valguse kiirusele lähedase kiirusega ja jõuavad alajaamadesse seal ülesseatud seadmestikuni, sealhulgas ka trafodeni. Elektrivõrkude ja alajaamade kaitsmiseks liigpingete eest seatakse üles lahendid, mille oluliseks osaks on sädevahemikud. Sädelahendite ühed poolused on ühendatud liiniga, teised maaga. Liigpingete korral lüüakse sädevahemik läbi ning liigpingelaine elektrilaeng juhitakse maasse. Liigpingelaine ei kao seejuures täielikult, sest sädevahemiku suurus valitakse parajasti selline, et pärast liigpingelaine laengu juhtimist maasse ei tekiks seal elektrikaart võrgu normaalse tööpinge toimel. Selle kaare tekkimist võimaldab sädevahemiku ioniseerumine liigpingelaine laengu mõjul. Seetõttu tagavad lahendid liigpingelainete amplituudi vähenemist ainult teatava väärtuseni, mis ikkagi ületab 4...5-kordselt normaalse tööpinge. Niisugused liigpingelained jõuavadki trafodeni.

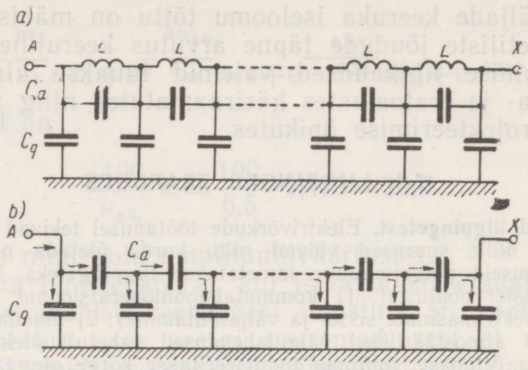


Joon. 17-8. Liigpinge aperioodiline (*a*) ja ristküliklaine (*b*)

Liigpingelaine iseloomuliku kujuna on joon. 17-8, *a* näidatud aperioodiline impulss. Kiiresti ehk järsult tõusvat algusosa *Oa* nimetatakse lainelaubaks, langevat osa laineseljaks. Laine toimekestus on harilikult kümneid mikrosekundeid, lainelauba kestus aga vaid mõni mikrosekund või koguni alla mikrosekundi. Seega võib liigpingelainet vaadelda kui mingit küllalt suure sagedusega ($f \approx 10\,000 \ldots 50\,000$ Hz) perioodilise pinge esimest poollainet. Küsimuse ligikaudsel analüüsimisel võib järsu laubaga laine (joon. 17-8, *a*) asendada ristkülikpingega (joon. 17-8, *b*).

Trafomähiste aseskeem liigpingetel. Mähiste üksikute keerdude ja poolide, kuid samuti nende ja trafo maandatud osade (südamik, paak jne.) vahel esinevad kindlad mahtuvused, mis šunteerivad nimetatud mähiseelemente. Need mahtuvused on niivõrd väikesed, et vastavad mahtuvustakistused

$$x_C = \frac{1}{\omega C}$$



Joon. 17-9. Trafomähise lihtsustatud aseskeem (*a*) ja mahtuvusahel (*b*)

töösagedusel $f = 50$ Hz on küllalt suured ning ei avalda märgatavat toimet trafo tööle. Seepärast ei võetud eespool normaalsagedusel kulgevate normaalning avariiprotsesside käsitamisel neid mahtuvusi arvesse. Kuid liigpingelainete korral, mis liiguvad ja muutuvad suure kiiruse või suure sagedusega, on nende mahtuvuste mõjul esmajärguline tähtsus.

Trafo aseskeem liigpingete toime hindamiseks, mis arvestab igat laadi sidestusi (konduktiiv-, induktiiv-, mahtuvus-) mähiste üksikute elementide, aga samuti nende elementide ning maa vahel, osutub erakordselt keerukaks. Sel põhjusel on trafos liigpingete korral toimuvate protsesside täpne analüüs küllalt raske. Seepärast me piirdumegi laineprotsesside korral trafo mähise lihtsustatud aseskeemi vaatlemisega (joon. 17-9, *a*), mis võimaldab selgitada tekkivate nähtuste põhilisi iseärasusi.

Joon. 17-9, *a* kujutab induktiivsus *L* endast mähise elementide (keerdude ja poolide) induktiivsusi, C'_d — mahtuvusi nende elementide vahel ehk nn. p i k i m a h t u v u s i, C'_q aga mahtuvusi samade elementide ja maa vahel ehk nn. r i s t m a h t u v u s i. Mähise elementide aktiivtakistusi skeemil joon. 17-9, *a* ei arvestata.

Seega esitatakse mähis vastavalt joon. 17-9, *a* homogeense elektriahelana, mille summaarne pikimahtuvus on

$$C_d = \frac{1}{\sum \frac{1}{C'_d}}$$

ning summaarne ristmahtuvus

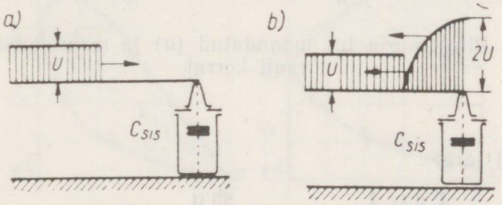
$$C_q = \sum C'_q.$$

Sisendmahtuvuse laadimine. Liigpingelaine jõudmisel trafo klemmidele kasvab pinge seal lainelauba järskuse tõttu väga kiiresti. See protsess on niivõrd kiire, et laine elektrilaengu poolt tekitatud vool mähise suure induktiivsuse tõttu alguses ei kulge piki mähise keerde, vaid selle mahtuvusahelat mööda (joon. 17-9, *b*). Seetõttu käitub trafo tervikuna laine kohalejõudmise hetkel kui mingi mahtuvus C_{sis}, mida nimetatakse s i s e n d m a h t u v u s e k s.

Mähise mahtuvusahela laadimisprotsess (joon. 17-9, *b*) kestab laine kohale-

jõudmisel vaid mikrosekundi murdosa. Seda protsessi nimetatakse *sisendmahtuvuse laadimiseks* ning selle tulemusena kujunevat potentsiaalide- või pingejaotust piki mähise ahelat — *pinge algjaotuseks*. Selle protsessi alguses (joon. 17-10) langeb pingelaine trafo klemmidel nullini, seejärel laine peegeldub ning pinge klemmidel kasvab laine amplituudi U kahekordse väärtuseni.

Pinge algjaotus. Nagu nähtub joon. 17-9, *b*, jaotuvad mähise alglaadimisel voolud ja elektrilaengud pikimahtuvuste ahelas ebaühtlaselt, sest et pingelaine liikumise tõttu mähise algusest A selle lõpu X poole järjest rohkem voole ja laenguid eraldub ristmahtuvuste kaudu maasse. Seetõttu läbib mähise algusele A lähimaid ristmahtuvusi suur vool ning neil mahtuvustel on suured elektrilaengud, mähise lõpu X poole aga ristmahtuvuste laengud vähenevad. Selle tulemusena vähenevad ka pingelangud ristmahtuvuste elementidel mähise algusest A mähise lõpu X poole, mistõttu pinge algjaotus piki mähist on ebaühtlane.



Joon. 17-10. Ristkülikukujulise pingelaine saabumine trafosse (*a*) ja mahtuvuse laadimine (*b*)

On võimalik näidata, et mähise lõpu maandamise korral pingejaotus maa suhtes piki mähist on

$$u_x = U_A \frac{\operatorname{sh} \alpha x}{\operatorname{sh} \alpha}, \tag{17-32}$$

ning maandamata mähise korral

$$u_x = U_A \frac{\operatorname{ch} \alpha x}{\operatorname{ch} \alpha}, \tag{17-33}$$

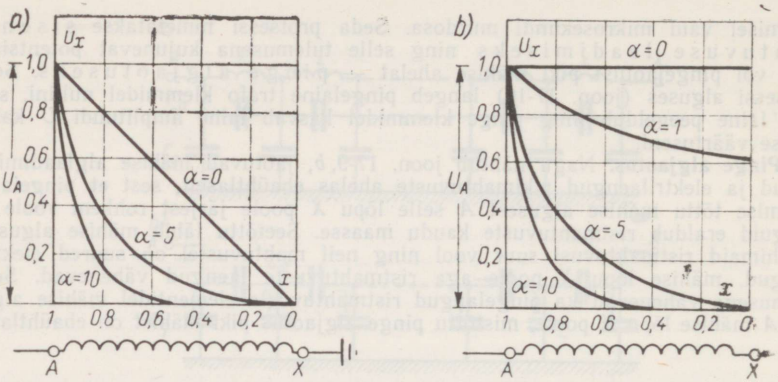
kusjuures mähise pikkus on võetud võrdseks ühega ja

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_q}{C_d}}. \tag{17-34}$$

Pinge algjaotus piki mähist [vt. avaldisi (17-32) ja (17-33)] erinevatel α väärtustel on toodud joon. 17-11, *a* ja *b*. Harilikult $C_q > C_d$ ning $\alpha = 5 \ldots 15$. Nagu nähtub joon. 17-11, on niisugustel α väärtustel pinge jaotus maandatud ja maandamata mähiste korral praktiliselt ühesugune. Peale selle on $\alpha \geqslant 5$ korral pinge jaotus piki mähist üsna ebaühtlane.

Pingekõvera tõus või pingegradient on mähise alguses ($x = 1$) valemi (17-32) järgi võrdne

$$\left[\frac{\mathrm{d}u_x}{\mathrm{d}x}\right]_{x=1} = \alpha U_A \frac{\operatorname{ch} \alpha}{\operatorname{sh} \alpha} = \alpha U_A \operatorname{cth} \alpha$$



Joon. 17-11. Pinge algjaotus maandatud (*a*) ja maandamata (*b*) neutraali korral

ja valemi (17-33) järgi

$$\left[\frac{du_x}{dx}\right]_{x=1} = \alpha U_A \frac{\operatorname{sh}\alpha}{\operatorname{ch}\alpha} = \alpha U_A \operatorname{th}\alpha.$$

Suuruse $\alpha \geqslant 3$ korral võib suure täpsusega võtta $\operatorname{th}\alpha = \operatorname{cth}\alpha = 1$. Seepärast mõlemal korral

$$\left[\frac{du_x}{dx}\right]_{x=1} = \alpha U_A,$$

samal ajal kui pinge ühtlasel jaotusel ($\alpha = 0$)

$$u_x = xU_A \quad \text{ja} \quad \frac{du_x}{dx} = U_A.$$

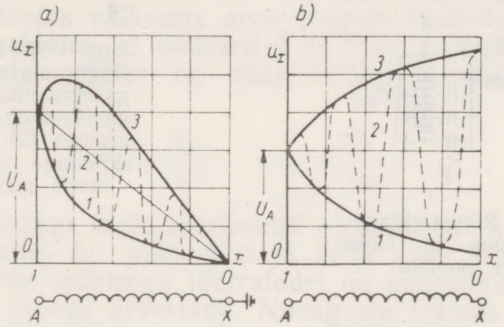
Pinge ebaühtlasel algjaotusel on näiteks $\alpha = 10$ korral esimeses poolis pinge 10 korda suurem kui ühtlasel jaotusel. Sel põhjusel tuleb keerdude ja poolide vahelist isolatsiooni mähise alguses tingimata tugevdada.

Elektromagnetiline kõrgsagedusvõnkumine. Nagu näidati eespool, ei saa liigpingelaine saabumise alghetkel laengud läbi aseskeemi (joon. 17-9, *a*) induktiivelementide tungida, mille tagajärjel tekibki pinge ebaühtlane algjaotus (kõverad *1* joon. 17-12). Kuid pingelaine edasisel liikumisel läbivad elektrilaengud ka induktiivsusi ning mõninga aja järel kujuneb välja lõplik pinge jaotus (kõverad *2* joon. 17-12). Maandatud neutraali korral pinge alaneb ühtlaselt mähise lõpu suunas, kuid maandamata mähisel on potentsiaal kogu pikkuses ühesugune.

Induktiivsuste ja mahtuvuste olemasolu tõttu mähise aseskeemis (joon. 17-9) kujutab mähis tervikuna, samuti ka selle osad, kiiresti kulgevate elektromagnetiliste protsesside suhtes võnkeringe. Üleminek pinge algjaotuselt (kõverad *1* joon. 17-12) lõplikule (kõverad *2* joon. 17-12) toimub kõrgsagedusvõnkumise näol. Kadude tõttu (elektriline kadu mähises, dielektrikuskadu isolatsioonis ning teraseskadu südamikus) see võnkumine sumbub, mille tagajärjel kujunebki välja lõplik pinge jaotus.

Võnkeamplituud suvalises võnkesüsteemis määratakse häire suurusega või süsteemi lõpp- ja algoleku koordinaatide vahega. Näiteks vedru külge riputatud raskuse võnkeamplituud määratakse lisakoormuse suurusega, mis lisatakse algkoormusele, või vedru venimise (deformatsiooni) suurusega lisakoormuse toimel. Seejuures toimub võnkumine koormuse (võnkesüsteemi) lõppasendi ümber.

Pingete võimaliku võnkumise amplituud trafomähise igas punktis võrdub joon. 17-12 toodud kõverate *1* ja *2* ordinaatide vahega. See võnkumine toimub lõpliku jaotuse sirge *2* suhtes ning seetõttu mähise erinevate punktide maksimaalpinged maa suhtes määratakse kõveratega *3* (joon. 17-12), mis osutuvad kõverate *1* peegelkujutisteks sirgete *2* suhtes.



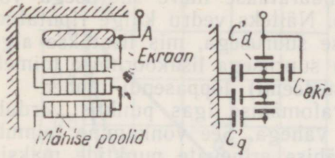
Joon. 17-12. Siirdeprotsessid trafomähises ristkülikukujulise liigpingelaine toimel maandatud (*a*) ja maandamata (*b*) neutraali korral

Seega võnguvad mähise erinevate punktide pinged kõverate *1* ja *3* vahel. Kuid pingete maksimaalväärtusi, mis määratakse kõveratega *3* võnkumise sumbuva iseloomu tõttu, faktiliselt ei saavutata.

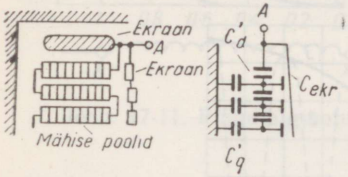
Joon. 17-12 näitavad kriipsjoonega tähistatud kõverad pinge jaotuse iseloomu võnkeprotsessi mingil hetkel. Nagu nähtub neist kõveraist, tekivad võnkumise ajal suured pingevahed ka mähise lõpus, mille tõttu tuleb keerdude- ja poolidevahelist isolatsiooni tugevdada ka mähise lõpus. Võimalik on ka tunduvate pingevahede teke mähise keskosas. Peale selle võib mähise üksikutes osades tekkiv pinge maa suhtes osutuda suuremaks mähisele langevast pingelainest U_A. Näiteks maandamata neutraali korral mähise lõpus pinge peaaegu kahekordistub, sest liigpingelaine peegeldub mähise otsast peaaegu kahekordse amplituudiga.

Trafode kaitsmine liigpingete eest. Esitatust selgub, et trafoni jõudvad liigpingelained võivad põhjustada trafo isolatsiooni vigastumist, mistõttu on vajalik selle ohuga võidelda. Sel eesmärgil valmistatakse trafo kõrgepingemähiste algus- ja lõpupoolid tugevama isolatsiooniga, 35 kV ja kõrgema pingega mähiste neutraalid aga maandatakse kas vahetult või läbi takistuste, mille väärtused kõrgsageduslikele võnkeprotsessidele on väikesed. Peale selle võetakse tarvitusele abinõud, mis on suunatud kas osalisele või siis võimalust mööda täielikule elektromagnetilise võnkumise välistamisele mähises. Selleks on vaja pinge algjaotuse kõvera sellist muutmist, et see võimalikult läheneks lõppjaotuse kõverale. Seda on võimalik saavutada mähise mahtuvuslike sidestuste muutmisega.

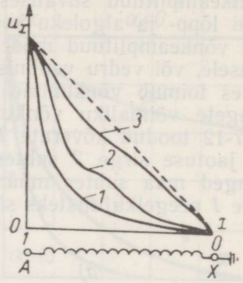
Lihtsaimaks seda sihti taotlevaks võtteks osutub mahtuvuslike rõngas-



Joon. 17-13. Rõngasekraan mähise alguses



Joon. 17-15. Rõngasekraanid mähise alguses ja ümber esimeste poolide



Joon. 17-14. Mähise pinge algjaotus rõngasekraanita (1), rõngasekraaniga mähise alguses (2) ja rõngasekraaniga ümber esimeste poolide (3)

ekraanide kasutamine 35 kV ja kõrgema pingega mähiste alguses (joon. 17-13). Niisugune rõngas kujutab endast metalliga kaetud pappketast, mis on raadiust mööda lõhki lõigatud, et vältida lähiskeeru teket. Ketas on elektriliselt ühendatud mähise algusega. Selle rõnga mahtuvus alguspooli keerdude suhtes on kujutatud mähise mahtuvusahela skeemil (joon. 17-13) mahtuvusena C_{ekr}. See mahtuvus šunteerib lõpupooli keerdude ristmahtuvused ning tõstab nende potentsiaali (joon. 17-14).

Parimaid tulemusi võib saada, kui peale eelkirjeldatu haarata rõngasekraanidega ka rida järgnevaid mähisepoole (joon. 17-15), ühendades kõik need rõngad mähise algusega. Nende rõngaste mahtuvuste jaotus mähiste mahtuvusahelas on näidatud samal joonisel. Niisuguste rõngaste olemasolu suurendab mähise algus- ja järgnevate poolide potentsiaali, kusjuures on võimalik saada peaaegu ühtlast pinge algjaotust (joon. 17-14, kõver *3*).

Niisuguste rõngaste toimet võib selgitada järgmisel viisil.

Kui õnnestub valida rõngasekraanide mahtuvused nii, et voolud läbi nende mahtuvuste võrduvad mahtuvusahelate laadimisel tekkivate vooludega läbi vastavate aseskeemi ristmahtuvuste elementide, siis voolud läbi pikimahtuvuste elementide vähenevad ning muutuvad üksteisega võrdseks. Selle tulemusena muutuvad pingelangud nendes pikimahtuvuste elementides samuti väiksemaks ning üksteisega võrdseks, mis viibki pingejaotuskõvera õgvendumisele. Käsitletud trafode mahtuvuskaitse mooduse (joon. 17-15) töötasid välja S. I. Rabinovitš, C. J. Kronhaus, A. M. Tšertin ning A. G. Perlin (Moskva Transformaatoritehas) ning seda kasutatakse kodumaistes trafodes pingega 110 kV ja rohkem. Taolise kaitsega trafosid nimetatakse kas äikesekindlaiks või mitteresoneeruvaiks, kuna neis on praktiliselt kõrvaldatud tunduvate elektromagnetiliste resonantsvõnkumiste tekke oht liigpingelainete toimel.

On välja töötatud ka teisi meetodeid trafode kaitseks võitluseks liigpingete kahjuliku toimega.

Kaheksateistkümnes peatükk

ERITÜÜPI TRAFOD

18-1. KOLME MÄHISEGA TRAFOD

Energeetikas kasutatakse laialdaselt kolme mähisega trafosid (joon. 18-1), millel on üks primaar- ja kaks sekundaarmähist. Neid trafosid tarvitatakse elektri- ja alajaamades erinevate nimipingetega jaotusvõrkude toiteks ning need annavad ökonoomiat kapitaalmahutustes väiksema arvu trafode ülesseadmise arvel.

Edaspidi eeldame, et mähised *2* ja *3* on taandatud mähise *1* keerdude arvule, milleks on sisse viidud taandamis- või ülekandesuhe:

$$k_{12}=\frac{w_1}{w_2}; \quad k_{13}=\frac{w_1}{w_3}. \tag{18-1}$$

Kolme mähisega trafo aseskeemil on erinevalt kahe mähisega trafo aseskeemist (vt. joon. 14-5 ja 14-6) kaks sekundaarahelat. Võimsatel kolme mähisega jõutrafodel on magneetimisvool väike ning seda ei pruugi arvestada. Niisuguste trafode aseskeem on toodud joon. 18-2. Jooniselt nähtub, et ühe sekundaarmähise koormuse muutmine mõjub teise sekundaarmähise pingele, sest seejuures muutub primaarmähise pingelang $Z_1 I_1$.

Kolme mähisega trafo vektordiagramme võib koostada aseskeemi joon. 18-2 alusel ning neil on joon. 18-3 näidatud kuju.

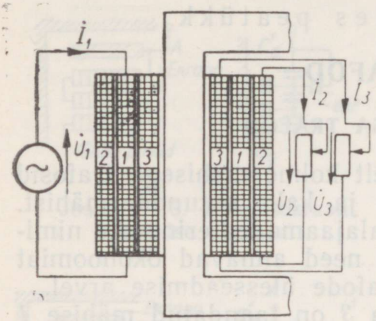
Aseskeemi joon. 18-2 parameetreid võib määrata arvutustega või kolme mähisega trafo (joon. 18-4) kolme lühisekatse andmetest. Lühisetakistuste katseliste väärtuste järgi

$$\left.\begin{aligned} Z_{k12}&=Z_1+Z_2=r_{k12}+jx_{k12}=(r_1+r_2)+j(x_1+x_2);\\ Z_{k13}&=Z_1+Z_3=r_{k13}+jx_{k13}=(r_1+r_3)+j(x_1+x_3);\\ Z_{k23}&=Z_2+Z_3=r_{k23}+jx_{k23}=(r_2+r_3)+j(x_2+x_3) \end{aligned}\right\} \tag{18-2}$$

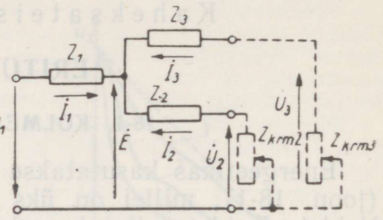
võib leida

$$\left.\begin{aligned} Z_1&=\frac{Z_{k12}+Z_{k13}-Z_{k23}}{2};\\ Z_2&=\frac{Z_{k12}+Z_{k23}-Z_{k13}}{2};\\ Z_3&=\frac{Z_{k13}+Z_{k23}-Z_{k12}}{2}. \end{aligned}\right\} \tag{18-3}$$

Analoogiliste valemitega väljenduvad Z_{k12}, Z_{k13} ja Z_{23} aktiivning induktiivkomponentide kaudu ka r_1, r_2, r_3 ja x_1, x_2, x_3.



Joon. 18-1. Kolme mähisega trafo

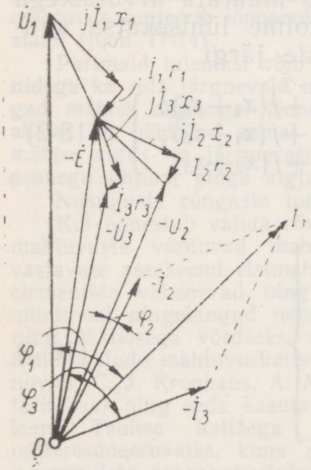


Joon. 18-2. Kolme mähisega trafo lihtsustatud aseskeem

Mähiste *2* ja *3* vahelise lühisekatse andmed peab taandama primaarpoolele ülekandesuhtega

$$k_{12}=\frac{w_1}{w_2}\approx\frac{U_{1N}}{U_{2N}}. \qquad (18\text{-}4)$$

Lühisekatsetel määratakse samuti lühisepinged u_{k12}, u_{k13}, u_{k23}, mille suhtelised väärtused võrduvad vastavate mähiste lühisetakistustega. Tuleb märkida, et kahe äärmise mähise vahel asuva mähise puisteinduktiivtakistus on lähedane nullile või omab isegi väikest negatiivset väärtust, mis formaalselt on ekvivalentne mahtuvustakistusega. Negatiivsete puisteinduktiivtakistuste esinemise võimalust saab seletada sellega, et need määratakse vastavalt seostele (14-31) ja (14-32) kahe mähisega trafode korral kahe (üldjuhtumil — mitme) suuruse vahega ning see vahe võib osutuda negatiivseks.



Joon. 18-3. Kolme mähisega trafo vektordiagramm

Kolme mähisega trafo mähiste võimsused avalduvad

$$S_1=mU_1I_1; \quad S_2=mU_2I_2; \quad S_3=mU_3I_3. \qquad (18\text{-}5)$$

Juhtumil, kui mähis *1* on primaarmähis, on need võimsused järgmises seoses

$$S_1\leqslant S_2+S_3,$$

sest et võimsustegurid $\cos\varphi_2$ ja $\cos\varphi_3$ on harilikult teineteisest erinevad, voo-

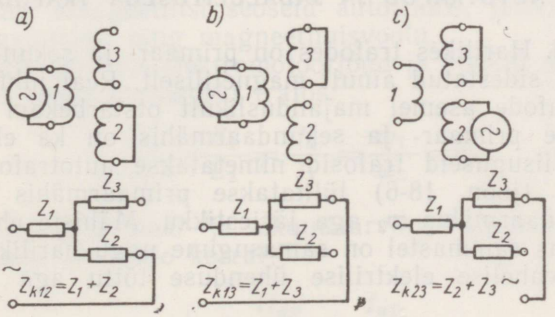
lud I_2 ja I_3 on seega faasis nihutatud ning järelikult $I_1 < I_2 + I_3$.

ГОСТ 401-41 näeb ette kolme mähisega jõutrafode tootmise järgmiste kolme mähise nimivõimsuste suhete variantidega:

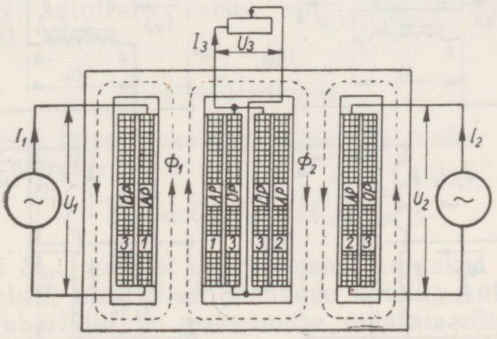
1) 100%, 100%, 100%;
2) 100%, 100%, 67%;
3) 100%, 67%, 100%;
4) 100%, 67%, 67%.

Lühisepinged u_{k12}, u_{k13}, u_{k23} määratakse vooludel, mis vastavad kõige võimsama (primaar-) mähise nimivõimsusele.

Kolmefaasilisi kolme mähisega trafosid valmistatakse lülitusrühmadega $Y_0/Y_0/\triangle$-12-11 või $Y_0/\triangle/\triangle$-11-11, ühefaasilisi aga lülitusrühmaga I/I/I-12-12.



Joon. 18-4. Kolme mähisega trafo lühisekatsete skeemid



Joon. 18-5. Kahe primaarmähisega kolme mähisega trafo

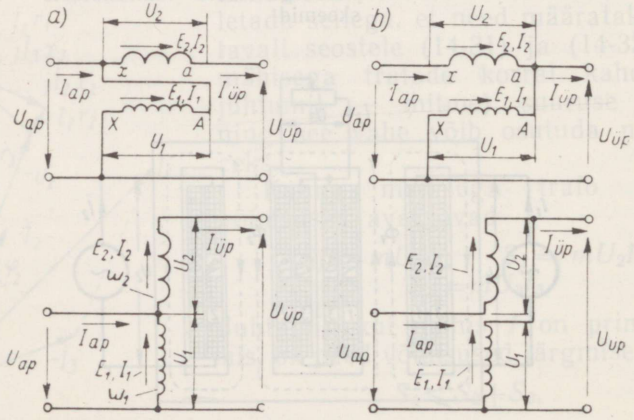
Kolme mähisega trafosid kahe primaar- ja ühe sekundaarmähisega (joon. 18-5) kasutatakse võimsates elektrijaamades. Seejuures on primaarmähistel ühesugune nimipinge ning kummagi külge ühendatakse üks võimas generaator, kaht paralleelharu omav sekundaarmähis aga ühendatakse läbi alajaama ülekandeliinidega. Trafod valmistatakse ühefaasilistena ning lülitatakse kolmefaasilisse gruppi.

Niisuguse ehitusega trafode korral lihtsustub suure vooluga primaarmähiste valmistamine ning ühe generaatori klemmidel tekkiva lühise korral jääb kahe generaatori vahele trafo kahe primaarmähise aktiiv- ja induktiivtakistus, mis vähendab lühisevoolu.

18-2. AUTOTRAFOD JA JADALÜLITUSEGA TRAFOD

Autotrafod. Harilikes trafodes on primaar- ja sekundaarmähised omavahel sidestatud ainult magnetiliselt. Real juhtumitel on niisuguste trafode asemel majanduslikult otstarbekam kasutada trafosid, mille primaar- ja sekundaarmähis on ka elektriliselt ühendatud. Niisuguseid trafosid nimetatakse autotrafodeks.

Autotrafos (joon. 18-6) lülitatakse primaarmähis w_1 võrku rööbiti, sekundaarmähis w_2 aga järjestikku. Mähiste ehitus ning nende paigutus sammastel on samasugune nagu harilikus trafos, mähiste omavahelise elektrilise ühenduse tõttu aga peab iga



Joon. 18-6. Ühefaasiliste autotrafode skeemid

mähise isolatsioon olema kere suhtes arvestatud kõrgema pingega ($U_{üp}$) võrgu pingele.

Joon. 18-6 on näidatud kaks võimalikku trafomähiste ühendamise skeemi, kusjuures kumbki skeem on esitatud kahel erineval kujul. Joon. 18-6, *a* lülitatakse primaarmähis madalama pingega U_{ap} võrku, joon. 18-6, *b* aga kõrgema pingega $U_{üp}$ võrku. Mõlemal korral liitub sekundaarmähise pinge U_2 pingega U_{ap} ning pingelangude mittearvestamisel

$$U_{üp} = U_{ap} + U_2. \tag{18-6}$$

Autotrafot võib kasutada nii pinge tõstmiseks kui ka madaldamiseks. Esimesel juhtumil osutub võrk pingega U_{ap} joon. 18-6 primaarseks ning energia antakse sellest võrgust üle teise võrku pingega $U_{üp}$. Teisel juhtumil osutub primaarseks võrk pingega $U_{üp}$ ning energia ülekande suund osutub vastupidiseks.

Vaatleme energeetilisi seoseid autotrafos, jättes arvestamata kaod, pingelangud ning magneetimisvoolu.

Autotrafo mähiste elektromotoorjõud ja voolud on samasugustes seostes nagu harilikuski trafos:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{w_1}{w_2} = k_a. \tag{18-7}$$

Teiselt poolt primaar- ja sekundaarvõrgu pingete ning voolude ülekandesuhe autotrafo korral

$$k_{tr} = \frac{U_{üp}}{U_{ap}} = \frac{I_{ap}}{I_{üp}} \tag{18-8}$$

erineb keerdude arvude w_1 ja w_2 suhtest.

Primaarmähisest sekundaarmähisesse magnetvälja poolt vahetult ülekantav autotrafo «sise- või arvutusvõimsus» võrdub nagu harilikuski trafos:

$$S_{arv} = E_1 I_1 = E_2 I_2. \tag{18-9}$$

Ühest võrgust teise ülekantav autotrafo «välis- või läbilaskevõimsus», mis võrdub

$$S_{läb} = U_{ap} I_{ap} = U_{üp} I_{üp} \tag{18-10}$$

on suurem kui S_{arv}, sest et osa võimsust kantakse ühest võrgust teise üle vahetult, elektrilise ühenduse kaudu. Autotrafo materjalide kulu, gabariidid ja maksumuse määrab võimsus S_{arv}, ja et autotrafol $S_{arv} < S_{läb}$, siis põhimõtteliselt on autotrafode kasutamine tulusam harilikest trafodest, millel $S_{arv} = S_{läb}$.

Skeemil joon. 18-6, *a*

$$\frac{S_{arv}}{S_{läb}} = \frac{E_2 I_2}{U_{üp} I_{üp}} = \frac{(U_{üp} - U_{ap}) I_{üp}}{U_{üp} I_{üp}} = \frac{k_{tr} - 1}{k_{tr}}, \qquad (18\text{-}11)$$

aga skeemil joon. 18-6, *b*

$$\frac{S_{arv}}{S_{läb}} = \frac{E_2 I_2}{U_{üp} I_{üp}} = \frac{(U_{üp} - U_{ap}) I_{ap}}{U_{üp} I_{üp}} = k_{tr} - 1. \qquad (18\text{-}12)$$

Saadud seostest nähtub, et skeemi joon. 18-6, *a* korral S_{arv} on muude võrdsete tingimuste korral k_{tr} korda väiksem kui skeemi 18-6, *b* puhul. See on tingitud sellest, et mõlemas skeemis on sekundaarmähise pinge U_2 ühesugune, kuid skeemis joon. 18-6, *b* on see mähis koormatud k_{tr} korda suurema vooluga. Seepärast eelistatakse praktikas joon. 18-6, *a* toodud skeemi.

Tabelis 18-1 on toodud suhte $S_{arv}/S_{läb}$ väärtused k_{tr} mitmesugustel väärtustel mõlemale joon. 18-6 skeemile.

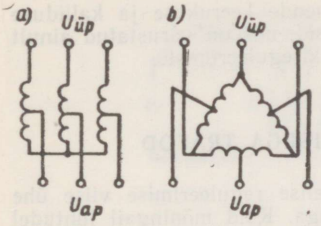
Selle tabeli andmeist on näha, et autotrafode kasutamine on seda otstarbekam, mida lähedasem ühele on k_{tr}. Harilikult kasutatakse autotrafosid $k_{tr} \leqslant 2{,}5$ korral. Viimasel ajal leiavad need üha laiemat rakendamist erinevate pingetega (110, 154, 220, 330, 500 kV) kõrgepingevõrkude omavaheliseks ühendamiseks energiasüsteemides. Neid kasutatakse samuti mitmesugustes raadiotehnilistes seadmetes ja mõnedel teistel juhtumitel.

Lühisekadu ja -pinge autotrafo sekundaarmähise nimipinge ja nimiarvutusvõimsuse kohta on ligikaudu samasugused nagu harilikeski trafodes. Kui aga lühisekadu ja -pinge taandada läbilaskevõimsusele ja võrgu nimipingele, siis on need suurused harilike trafode omadest ligikaudu $S_{läb}/S_{arv}$ korda väiksemad. Seepärast suureneb autotrafode kasutamisel energia ülekande kasutegur,

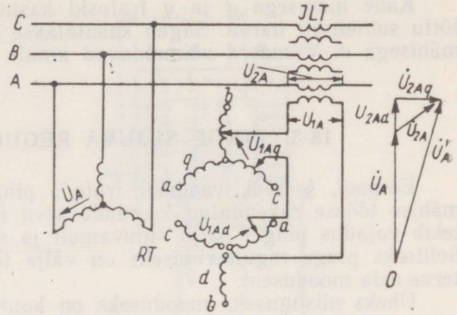
Tabel 18-1

Autotrafode arvutus- ja läbilaskevõimsuste suhe

k_{tr}	$S_{arv}/S_{läb}$	
	Skeem *a* joonisel 18-6	Skeem *b* joonisel 18-6
1,00	0	0
1,25	0,20	0,25
1,50	0,33	0,50
1,75	0,43	0,75
2,00	0,50	1,00
2,50	0,60	1,50
3,00	0,67	2,00
4,00	0,75	3,00
5,00	0,80	4,00



Joon. 18-7. Kolmefaasiliste autotrafode skeemid



Joon. 18-8. Jadalülitusega trafo

kuid pingelangud vähenevad. Koos sellega suurenevad ka lühisevoolud.

Kolmefaasilistes seadmetes ühendatakse autotrafode mähised tähte (joon. 18-7, *a*), kusjuures voogudest ja faasielektromotoorjõududest kolmandate harmooniliste kõrvaldamiseks kasutatakse kolmnurka ühendatud väikesevõimsuselist tertsiaarmähist. Mähise ühendamisel kolmnurka (joon. 18-7, *b*) võib ülekandesuhe muutuda piirides $k_{tr} = 1 \ldots 2$. Seda skeemi kasutatakse erandjuhtumeil. Energiasüsteemides kasutatakse kolme mähisega trafosid, mille ülem- ja keskpingemähistel on autotrafosidestus ja mis ühendatakse tähte, alampingemähisel on aga teiste mähistega trafosidestus ja see ühendatakse kolmnurka.

Jadalülitusega trafo. Eespool, § 15-3, vaadeldi trafo sekundaarpinge reguleerimisviisi selle mähise lisaväljaviikude abil. Mõningatel juhtumitel (näiteks piirvõimsuse ja -pinge trafod) on niisugune pinge reguleerimine raskendatud. Mõnikord nõutakse suletud kõrgepingevõrkude üksikute harude pinge täiendavat reguleerimist nende harude vahel võimsuste ümberjaotamise eesmärgil. Niisugustel juhtumitel kasutatakse jadalülitusega trafosid *JLT* (joon. 18-8), mille sekundaarmähis lülitatakse võrku järjestikku ja primaarmähist toidetakse spetsiaaltrafost *RT*, mis on koormusel reguleeritav. Üldjuhtumil on spetsiaaltrafol kaks sekundaarmähist *d* ja *q*. Üks neist (mähis *d*) loob pinge pikikomponendi U_{1Ad}, mis on faasis võrgu vaadeldava faasi pingega või on selle suhtes nihutatud 180°, teine aga (mähis *q*) loob pinge ristkomponendi U_{1Aq}, mis on võrgu vaadeldava faasi pinge suhtes 90° võrra nihutatud. Pingeid U_{1Ad} ja U_{1Aq} võib reguleerida teineteisest sõltumatult ning selle tulemusena trafo *JLT* primaarpinge

$$\dot{U}_{1A} = \dot{U}_{1Ad} + \dot{U}_{1Aq},$$

aga samuti võib selle sekundaarpinget $\dot{U}_{2A}$, mis liitub võrgu pingega $\dot{U}_A$, muuta suuruselt ja faasilt. Võrgupinge *JLT* järel $\dot{U}'_A = \dot{U}_A + \dot{U}_{2A}$. Kõikide faaside pingeid muudetakse üheaegselt.

Kahe mähisega *d* ja *q* trafosid kasutatakse nende keerukuse ja kalliduse tõttu suhteliselt harva. Sageli kasutatakse ka trafosid, mis on varustatud ainult mähisega *d*. Viimased võimaldavad ainult pinge pikireguleerimist.

18-3. PINGE SUJUVA REGULEERIMISEGA TRAFOD

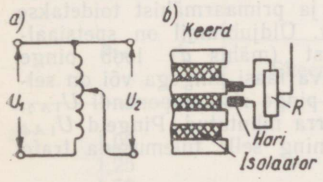
Eespool, § 15-3, vaadeldi trafode pinge astmelise reguleerimise viise ühe mähise töösse rakendatud keerdude arvu muutmisega. Kuid mõningail juhtudel tekib vajadus pinget palju sujuvamalt ja sealjuures laiades piirides reguleerida. Selliseks pinge reguleerimiseks on välja töötatud ja ka praktikasse juurutatud terve rida mooduseid.

Üheks niisuguseks mooduseks on kontaktharjade kasutamine, mis libisevad mööda mähise isoleerimata välispinda (joon. 18-9, *a*) ja millega saavutatakse mähise töösse lülitatud keerdude arvu sujuv muutmine. Niisugust meetodit rakendatakse väikese võimsusega laboratoorsetes autotrafodes. Võimsamate kahe mähisega trafode ja autotrafode korral on vaja tingimata kasutada harjade kaksikkomplekti koos takistiga, et piirata harjade kaudu naaberkeerdude lühistamisel tekkivat lühisevoolu (joon. 18-9, *b*). Niisugused trafod ehitatakse võimsustele kuni 250 kVA ning neid kasutatakse teatrilavade valgustamiseks ja mõningatel teistel juhtumitel.

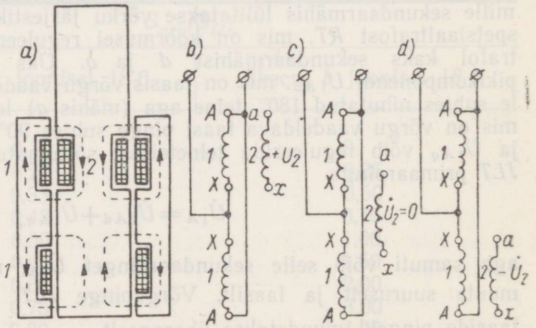
Mõningat rakendamist leiavad ka liikuvate mähiste ja südamikega trafod. Joon. 18-10 on kujutatud trafo kahe rööbiti lülitatud primaarmähisega *1* ja liikuval südamikul paikneva sekundaarmähisega *2*. Südamiku liikumisel joon. 18-10, *a* näidatud asendist allapoole muutub mähise *2* aheldusvoog sujuvalt ning sama sujuvalt muutub ka pinge väärtuselt $+U_2$ südamiku äärmises ülemises asendis kuni $-U_2$-ni südamiku äärmises alumises asendis.

Viimasel ajal laieneb alalisvooluga eelmagneeditavate elementidega trafode kasutamine. On soovitatud suurel hulgal taoliste trafode erikonstruktsioone. Suurt tööd sellel alal NSV Liidus on teinud A. M. Bamdas. Vaatleme näitena üht niisugust trafot (joon. 18-11).

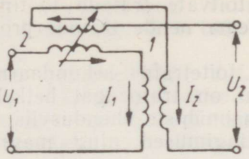
Joon. 18-11 on toodud kahe trafo jadalülitus, kusjuures trafo *2* südamik eelmagneeditakse alalisvooluga, tema sekundaarmähis lülitatakse trafo *1* sekundaarmähisega vastassuunaliselt. Sekundaarpinge U_2 määratakse nende kahe mähise elektromotoorjõudude vahena. Trafo *2* südamiku eelmagneetimisel selle magnetiline läbitavus väheneb, mille tõttu väheneb ka trafo vahelduv magnetvoog ja elektromotoorjõud. Samal ajal suurenevad $U_1 = \text{const}$ korral trafo *1* mähiste elektromotoorjõud. Neil põhjustel U_2 kasvab.



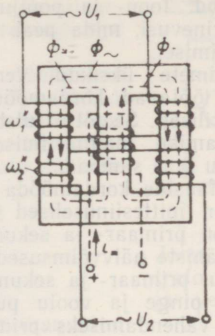
Joon. 18-9. Liugkontaktidega trafo



Joon. 18-10. Liikuva sekundaarmähisega trafo



Joon. 18-11. Kahe trafo jadalülituse skeem



Joon. 18-12. Alalisvoolueelmagneetimisega trafo

Trafo 2 ehitus on näidatud joon. 18-12. Mähistega w''_1 ja w''_2 loodav vahelduv magnetvoog $\Phi_\sim$ sulgub äärmiste sammaste kaudu. Alalisvoolumähisega w_{al} loodav voog $\Phi_=$ küllastab täiendavalt voo $\Phi_\sim$ magnetahela osi, mis põhjustab mähiste w''_1 ja w''_2 vastastikuse induktiivsuse vähenemise. Voog $\Phi_\sim$ mähisega w_{al} ei aheldu ning seetõttu alalisvooluahelas ei indutseerita vahelduvelektromotoorjõudu. Küllastunud magnetahel osutub mittelineaarseks ja seetõttu indutseeritakse siinuseliste voolude korral mähistes w_1'' ja w''_2 elektromotoorjõu kõrgemad harmoonilised. Kuid et vasak- ja parempoolses sambas (joon. 18-12) vood $\Phi_\sim$ ja $\Phi_=$ igal hetkel liituvad erinevate märkidega, siis elektromotoorjõu kõrgemad harmoonilised poolmähiste w''_1 ja w''_2 jadaahelates kompenseeruvad tunduval määral.

18-4. TEISI TRAFODE TÜÜPE

Keevitus- ja ahjutrafod. Kaarkeevitusel kasutatakse trafosid sellise sekundaarpingega, mis kindlustab kaare kindla süttimise ja stabiilse põlemise. Käsikeevitusel kasutatakse trafosid tühijooksupingega 60 ... 75 V, mis nimikoormusel langeb 30 V-ni. Keevitusvoolu piiramiseks lühisel ning kaare stabiilseks põlemiseks peab trafol olema järsult langev väliskarakteristik $U_2 = f(I_2)$ (vt. § 11-1), keevitusahelas aga tunduv induktiivsus ($\cos\varphi = 0{,}4 \ldots 0{,}5$). Keevitusvoolu suuruse reguleerimiseks peab trafo induktiivsus olema reguleeritav.

Laialdaselt kasutatakse keevitustrafosid täiendava reguleeritava paispooliga (joon. 18-13). Vastava mehhanismi abil õhupilu δ vähendamisel pooli magnetahelas selle induktiivsus kasvab.

Käsikeevitusel kasutatavaid ilma paispoolita trafosid valmistatakse võimsusega kuni 20 kVA, automaatkeevituseks aga kuni 100 kVA ja rohkem. Puutekeevituseks lastakse välja trafosid võimsusega kuni 1000 kVA, tühijooksupingega kuni 36 V.

Terasesulatamise kaarahjude juures kasutatakse vastavalt ГОСТ 7207-54 kolmefaasilisi trafosid võimsusega kuni 25 000 kVA sekundaarpinge astmelise reguleerimisega piirides 110 ... 420 V. Pinget reguleeritakse järgmiste võtete kombineerimisega: 1) primaarmähise ümberlülitamisega tähest kolmnurka; 2) väljavõtete tegemisega primaarmähisest; 3) sekundaarkeerdude üksikute gruppide ümberlülitamisega rööpühendusest jadaühendusse.

Alalditrafod. Ioon- ja pooljuhtalaldeid toitvate trafode töötingimustel on rida olulisi erinevusi, mida peab tähele panema nende trafode projekteerimisel ja ekspluateerimisel.

Alaldiseadmete üksikud ventiilid ja toitetrafo sekundaarmähise vastavad faasid töötavad kordamööda. Seetõttu on trafo igal hetkel koormatud mittesümmeetriliselt. Seetõttu tuleb valida faasimähiste ühendusviis, mis kindlustaks trafosüdamiku magneetimise normaaltingimused ning magneetimisergutuste tasakaalu igas sambas.

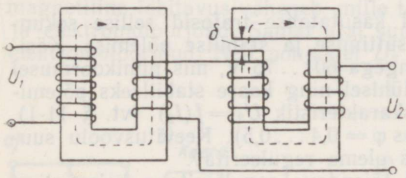
Üksikute faaside kordamööda töötamise tagajärjel trafo sekundaar- ja primaarvoolud on mittesiinuselised ja sisaldavad seega kõrgemaid harmoonilisi. Üldjuhtumil on primaar- ja sekundaarvoolude harmooniliste koosseis erinev ja seetõttu on mähiste näivvõimsused *mUI* ka erinevad. Trafo nimivõimsuseks võetakse sel puhul primaar- ja sekundaarmähise näivvõimsuste poolsumma.

Alaldatud pinge ja voolu pulseerimise vähendamiseks, aga samuti voolu harmooniliste vähendamiseks primaarmähises on otstarbekas suurendada trafo sekundaarmähise faaside arvu.

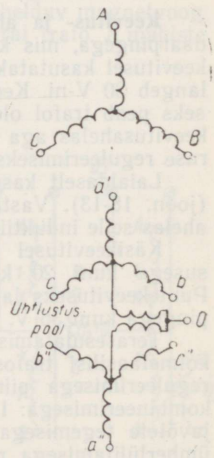
Mitmeanoodilistes ioonventiilides on võimalik nn. tagasisüüde, s. o. elektrikaare teke üksikute anoodide vahel, mis on samaväärne lühisega. Seejuures on võimalikud primaar- ja sekundaarmähiste magneetimisergutuste tasakaalu rikkumised. See põhjustab küllalt suurte mähistele mõjuvate elektromagnetiliste jõudude tekke. Seepärast peab alalditrafode mähiste kinnitus olema eriti kindel.

NSV Liidus kasutatakse võimsates tööstusseadmetes kõige rohkem kuuefaasilise sekundaarmähisega trafosid (joon. 18-14), ühtlustava paispooliga sekundaarmähise kolmefaasiliste päri- ja vastujärgnevusgruppide neutraalide vahel. Selle pooli ülesanne seisneb selles, et see tagab igal hetkel kahe ventiili ja sekundaarmähise kahe 60° nihet omava elektromotoorjõuga «naaberfaasi» paralleeltöö. Sellega saavutatakse trafo parem ärakasutamine. Niisugune tööreţiim kindlustatakse sellega, et pooli kahes pooles indutseeritavad elektromotoorjõud ühtlustavad pinged kahe üheaegselt töötava faasi ahelates.

Mõõtetrafod. Voolu- ja pingetrafosid kasutatakse: 1) mõõteriistade ja kaitsereleede ahelate eraldamiseks kõrgepingeahelast teenindamise ohutuse ja mõõteriistade voolu juhtivate osade isolatsiooni vähendamise eesmärgil ning 2) voolu ja pinge transformeerimiseks suurusteni, mida saab mõõta standardsete mõõte-



Joon. 18-13. Paispooliga keevitustrafo



Joon. 18-14. Ühtlustuspooliga kuuefaasilise alaldustrafo skeem

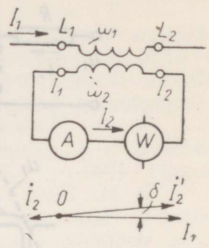
riistadega [ampermeetrid (voolule) 1 ja 5 A, voltmeetrid kuni 100 V]. Voolutrafosid valmistatakse sekundaarmähiste nimivõimsustega 5...100 VA, pingetrafosid aga 25...1000 VA.

Voolutrafo primaarmähis L_1L_2 ($Л_1Л_2$) lülitatakse mõõteahelasse järjestikku, sekundaarmähis I_1I_2 ($И_1И_2$) suletakse väikest sisetakistust omavate ja teineteisega järjestikku ühendatavate mõõteriistade- ja kaitseseadistega (joon. 18-15). Seepärast töötab voolutrafo lühisele lähedases režiimis.

Vastavalt trafo aseskeemile (joon. 14-5, *b*)

$$\dot{I}'_2 = -\frac{Z_M}{Z_M + Z'_2 + Z'_{krm}}\dot{I}_1,$$

kus Z'_{krm} — koormuse (aparatuuri) takistuse taandatud väärtus sekundaarahelas.



Joon. 18-15. Voolutrafo lülitusskeem ja vektordiagramm

Ideaalses olukorras, kui $Z'_2 = Z'_{krm} = 0$ või $\dot{I}'_2 = -\dot{I}_1$, trafo voolu- ja nurgaviga δ on võrdsed nulliga. Seepärast tuleb jõuda selleni, et summa $Z'_2 + Z'_{krm}$ oleks tunduvalt väiksem kui Z_M.

Voolutrafosid valmistatakse täpsusklassiga 0,2; 0,5; 1; 3 ja 10. Need numbrid näitavad lubatavat vooluviga protsentides nimivoolu korral. Nurgaviga ei tohi kolmes esimesena näidatud klassis ületada vastavalt 10, 40 ja 80 minutit, klassidele 3 ja 10 seda viga ei normeerita.

Voolutrafo magnetvoog tööreŽiimil on küllalt väike, mistõttu selle südamik ei ole küllastunud. See asjaolu vähendab magneetimisvoolu vähenemise tõttu mõõtevigu. Voolutrafo sekundaarmähist ei tohi katkestada, sest siis sekundaarvoolu demagneetiv toime kaob ning trafo voog kasvab kümneid ja sadu kordi. Sekundaarpoolel tekib eluohtlik pinge, trafo ise aga võib isolatsiooni läbilöögi või südamiku liigse kuumenemise tagajärjel magnetiliste kadude suurenemise tulemusena rivist välja langeda.

Sõltuvalt primaarpinge ja -voolu suurusest, samuti ka töötingimustest (välis- ja siseseadmed, laboratoorsed trafod jne.) on voolutrafode konstruktiivne lahendus üsna mitmekesine. Sageli on neil mitu sekundaarmähist, mis on mähitud erinevatele sammastele ning on erinevate täpsusklassidega.

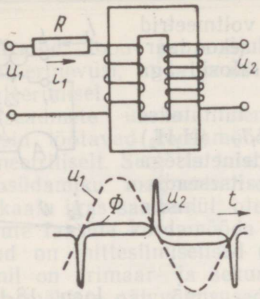
Pingetrafost toidetavad mõõteriistad ja kaitseaparatuur lülitatakse trafo sekundaarmähiste külge rööbiti. Pingetrafod töötavad tühijooksule lähedastes tingimustes, s. t. nende koormustakistus Z'_{krm} on mähiste takistustega Z_1 ja Z'_2 võrreldes suur. Seejuures on pingelangud trafomähistes suhteliselt väikesed ning trafo viga on ka väike. Trafo konstrueerimisel taotletakse mähiste takistuste Z_1 ja Z'_2 võimalikku vähendamist. Pingetrafosid valmistatakse täpsusklassiga 0,2; 0,5; 1 ja 3. Nende trafode konstruktiivne lahendus on ka üsna mitmepalgeline.

Tiputrafod (joon. 18-16) annavad sekundaarpinge järsu, küllalt lühikese impulsina ja neid kasutatakse kaare süütamiseks tüüritavates ioonseadmetes (türatronid, ignitronid jt.). Sekundaarpinge selline kuju saadakse küllalt tugevasti küllastunud trafosüdamiku kasutamise tulemusena, mistõttu magnetvoog on peaaegu kogu poolperioodi vältel enam-vähem konstantne ja muutub järsku ainult oma suuna vahetamisel.

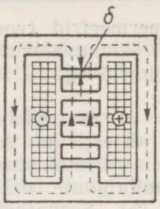
Voo konstantsusel ($\Phi = \text{const}$)

$$e_1 = w_1 \frac{d\Phi}{dt} \approx 0$$

ning voolu i_1 piiramiseks viiakse skeemi joon. 18-16 takisti R.



Joon. 18-16. Tiputrafo lülitusskeem ja pingete muutumise kõverad



Joon. 18-17. Terassüdamiku ja õhupiluga δ reaktori konstruktsioon

Terassüdamikuga reaktorid ja paispoolid ei ole oma olemuselt trafod, kuid ehituselt on nendega analoogilised. Neil on ainult üks mähis ja kasutatakse neid elektrivõrkudes voolu piiravate induktiivtakistustena ja reaktiivvõimsuse tarbijaina. Suurtel võimsustel nimetatakse niisuguseid paispoole reaktoreiks.

Võib endale ette kujutada, et paispool saadakse trafost selle sekundaarmähise eemaldamise tulemusena. Seejuures töötab paispool nagu trafo tühijooksul. Kuid niisugusel poolil on suhteliselt väike võimsus $S = mUI$, sest et trafo tühijooksuvool on väike. Seejuures ei kasutata pooli aktiivmaterjale täielikult ära, ja peale selle ei ole pooli induktiivsus konstantne ning siinuspingel ei ole vool siinuseline. Parimaid tulemusi saadakse, kui magnetahelas mittemagnetilised õhupilud teha isoleermaterjalist vahekutena (joon. 18-17). Siis pooli vool ja võimsus suurenevad, südamiku magnetilise karakteristiku mittelineaarsus kaotab tähtsuse, sest et niisuguse südamiku magnetiline takistus määratakse peamiselt õhupilude takistusega. Ühe pilu asemel tehakse harilikult mitu väiksemat, et vältida magnetvälja tugevat paisumist südamikku ümbritsevasse ruumi.

Reaktoreid ja paispoole valmistatakse nii ühe- kui ka kolmefaasilistena. Mõningatel juhtudel valmistatakse neid ka reguleeritava induktiivtakistusega. See saavutatakse kas keerdude arvu muutmisega või muutes õhupilude suurust südamike osade teljesuunalise nihutamisega. Kasutatakse ka südamiku alalisvoolu-eelmagneetimisega paispoole (vt. § 18-3). Sel juhtumil valmistatakse südamikud õhupiludeta.

KIRJANDUS

М. П. Костенко и Л. М. Пиотровский, Электрические машины, ч. I, Машины постоянного тока. Трансформаторы, «Энергия», 1964; ч. II, Машины переменного тока, «Энергия», 1965.

Г. Н. Петров, Электрические машины, ч. I, Введение. Трансформаторы, Госэнергоиздат, 1956; ч. II, Асинхронные и синхронные машины, Госэнергоиздат, 1963; ч. II, Коллекторные машины постоянного и переменного тока, Госэнергоиздат, 1947.

Р. Рихтер, Электрические машины, т. I, Расчетные элементы общего значения. Машины постоянного тока, ОНТИ, 1935; т. II, Синхронные машины и одноякорные преобразователи, ОНТИ, 1936; т. III, Трансформаторы, ОНТИ, 1935; т. IV, Индукционные машины, ОНТИ, 1939; т. V, Коллекторные машины однофазного и многофазного переменного тока. Регулировочные агрегаты, Госэнергоиздат, 1961.

Справочная книга для электротехников (СЭТ), под редакцией М. А. Шателена, В. Ф. Миткевича и В. А. Толвинского, т. V, Электрические машины (общая часть). Машины постоянного тока. Синхронные машины. Трансформаторы, КУБУЧ, 1934; т. VI, Индукционные машины. Коллекторные машины переменного тока. Вращающиеся преобразователи. Специальные типы машин и трансформаторов, КУБУЧ, 1934.

М. П. Костенко, Электрические машины, специальная часть, Госэнергоиздат, 1949.

Ю. С. Чечет, Электрические микромашины автоматических устройств, «Энергия», 1964.

А. И. Бертинов, Электрические машины авиационной автоматики, Оборонгиз, 1961.

Н. П. Ермолин, Электрические машины малой мощности, «Высшая школа», 1962.

Д. А. Завалишин, С. И. Бардинский, О. Б. Певзнер, Б. В. Фролов, В. В. Хрущев, Электрические машины малой мощности, Госэнергоиздат, 1963.

Р. Г. Гемке, Неисправности электрических машин, Госэнергоиздат, 1963.

Б. Геллер и А. Веверка, Волновые процессы в электрических машинах, Госэнергоиздат, 1960.

Г. Готтер, Нагревание и охлаждение электрических машин, Госэнергоиздат, 1961.

И. М. Постников, Проектирование электрических машин, Гостехиздат УССР, 1960.

Н. В. Виноградов, Производство электрических машин, Госэнергоиздат, 1961.

И. М. Постников, Проектирование электрических машин, Гостехиздат УССР, 1960.

Н. В. Виноградов, Ф. А. Горяинов и П. С. Сергеев, Проектирование электрических машин, Госэнергоиздат, 1956.

С. Н. Вешеневский, Расчет характеристик и сопротивлений для электродвигателей, Госэнергоиздат, 1955.

Я. Кучера, И. Гапл, Обмотки электрических вращательных машин, Изд-во Чехословацкой Академии наук, Прага, 1963.

В. И. Зимин, М. Я. Каплан, А. М. Палей, И. Н. Рабинович, В. П. Федоров, П. А. Хаккен, Обмотки электрических машин, Госэнергоиздат, 1961.

Л. М. Пиотровский и Е. А. Паль, Испытание электрических машин, ч. I, Общая часть и испытание машин постоянного тока, Госэнергоиздат, 1949.

Л. М. Пиотровский, С. Б. Васютинский, Е. Д. Несговорова, Испытание электрических машин, ч. II, Трансформаторы и асинхронные машины, Госэнергоиздат, 1960.

Н. В. Астахов, Б. Л. Крайз, Е. М. Лопухина, Г. С. Сомихина, Ф. М. Юферов, Лабораторные работы по электрическим микромашинам, изд. Московского энергетического института, 1962.

Г. К. Жерве, Промышленные испытания электрических машин, Госэнергоиздат, 1959.

Б. Нюрнберг, Испытание электрических машин, Госэнергоиздат, 1959.

В. А. Толвинский, Электрические машины постоянного тока, Госэнергоиздат, 1956.

Ф. А. Горяинов, Электромашинные усилители, Госэнергоиздат, 1962.

О. Г. Вегнер, Теория и практика коммутации машин постоянного тока, Госэнергоиздат, 1961.

Н. П. Ермолин, Переходные процессы в машинах постоянного тока, Госэнергоиздат, 1951.

А. Е. Алексеев, Тяговые электродвигатели, Трансжелдориздат, 1961.

А. Б. Иоффе, Тяговые электрические машины, «Энергия», 1965.

Я. С. Гурин и М. Н. Курочкин, Проектирование машин постоянного тока, Госэнергоиздат, 1961.

Л. М. Шницер, Трансформаторы, Госэнергоиздат, 1956.

П. М. Тихомиров, Расчет трансформаторов, Госэнергоиздат, 1962.

А. В. Сапожников, Конструирование трансформаторов, Госэнергоиздат, 1950.

ГОСТ 183-55, Машины электрические. Общие технические требования.

ГОСТ 2852-50, Машины электрические постоянного тока тяговые. Технические условия.

ГОСТ 184-53, Электродвигатели постоянного тока крановые, подъемно-транспортные и металлургические.

ГОСТ 10159-62, Машины электрические постоянного тока. Методы испытаний.

ГОСТ 401-41, Трансформаторы силовые масляные.

ГОСТ 8008-56, Трансформаторы силовые. Методы испытаний.

SISUKORD

Eessõna eestikeelsele väljaandele 3
Sissejuhatus 5
S-1. Elektrimasinad ja nende tähtsus rahvamajanduses 5
S-2. Üldandmeid elektrimasinatest 6
S-3. Mõõtühikute süsteemid 8
S-4. Elektrimasinates kasutatavad materjalid 11

Esimene osa

Esimene peatükk. **Alalisvoolumasinate töötamispõhimõte ja ehitus** . . . 21
1-1. Alalisvoolumasina töötamispõhimõte 21
1-2. Alalisvoolumasina ehitus 27
Teine peatükk. **Alalisvoolumasina magnetahel tühijooksul** 32
2-1. Magnetahela arvutusmetoodika 32
2-2. Ühupilu magnetväli ja magneetimisergutus 34
2-3. Hambatsooni magnetväli ja magneetimisergutus 39
2-4. Ankrusüdamiku pooluste ja ikke magneetimisergutus . . . 42
2-5. Masina summaarne magneetimisergutus ja -kõver 44
Kolmas peatükk. **Alalisvoolumasinate ankrumähised** 46
3-1. Üldandmeid alalisvoolumasinate ankrumähistest 46
3-2. Sektsioonide elektromotoorjõud 51
3-3. Lihtsilmusmähis 56
3-4. Liitsilmusmähis 65
3-5. Lihtlainemähis 72
3-6. Liitlainemähis 76
3-7. Kombineeritud mähis 79
3-8. Mähise tüübi valik 82
Neljas peatükk. **Elektromagnetilised põhiseosed** 83
4-1. Ankru elektromotoorjõud ja elektromagnetiline moment . . . 83
4-2. Põhilised elektromagnetilised koormused ja masina konstant . . 86
4-3. Geomeetriliste mõõtmete mõju masina tehnilis-majanduslikele näitajatele 90
Viies peatükk. **Masina magnetväli koormusel** 91
5-1. Ankrureaktsioon ja selle liigid 91
5-2. Ankrureaktsiooni mõju masina magnetvoole 94
5-3. Pinged kommutaatorilestade vahel ja kompensatsioonimähis . . 101
Kuues peatükk. **Kommutatsioon** 103
6-1. Harikontakti olemus 103
6-2. Kommutaatori sädelemine 105
6-3. Kommutatsiooniprotsess 107
6-4. Elektromotoorjõud kommuteeruvas sektsioonis 114
6-5. Reaktiiv-elektromotoorjõu määramine 117
6-6. Kommutatsiooni parandamise viisid 122
6-7. Kommutatsiooni ankrureaktsioon 129

6-8. Kommutatsiooni eksperimentaalne kontrollimine ja seadistamine . 131
6-9. Alalisvoolumasina piirvõimsus 134
Seitsmes peatükk. **Elektrimasinate kaod ja kasutegur** 135
7-1. Kaod 135
7-2. Kasutegur 140
Kaheksas peatükk. **Elektrimasinate soojenemine ja jahutus** 143
8-1. Soojusülekanne elektrimasinates 143
8-2. Ideaalse homogeense tahke keha soojenemine ja jahtumine . . 146
8-3. Elektrimasinate põhilised nimitöörežiimid ning lubatavad ületemperatuurid 150
8-4. Elektrimasinate soojenemine erinevatel töörežiimidel 152
8-5. Elektrimasinate ventilatsioon 155
Üheksas peatükk. **Alalisvoolugeneraatorid** 161
9-1. Üldandmeid alalisvoolugeneraatoreist 161
9-2. Suhteliste suuruste süsteem 165
9-3. Sõltumatu ergutusega generaatorid 167
9-4. Haruvoolugeneraator 175
9-5. Peavoolugeneraator 181
9-6. Kompaundgeneraator 181
9-7. Alalisvoolugeneraatorite paralleeltöö 183
Kümnes peatükk. **Alalisvoolumootorid** 188
10-1. Üldandmeid alalisvoolumootorite kohta 188
10-2. Alalisvoolumootorite käivitamine 190
10-3. Mootori pöörlemiskiiruse reguleerimine ja töö stabiilsus . . . 193
10-4. Haruvoolumootorid 198
10-5. Peavoolumootorid 203
10-6. Kompaundmootorid 207
10-7. NSV Liidu elektrimasinatehastes valmistatavad normaalkonstruktsiooniga alalisvoolumasinad 208
Üheteistkümnes peatükk. **Erituüpi alalisvoolumasinad** 211
11-1. Erituüpi alalisvoolugeneraatorid ja -muundurid 211
11-2. Täiturmootorid ja tahhogeneraatorid 215
11-3. Elektrimasinvõimendid 218
11-4. Alalisvoolu magnetohüdrodünaamilised masinad 220

Teine osa

Kaheteistkümnes peatükk. **Üldandmeid trafodest** 223
12-1. Trafode tüübid ja töötamispõhimõte 223
12-2. Trafode magnetsüdamikud 226
12-3. Trafomähised 232
12-4. Trafomähiste skeemid ja lülitusrühmad 235
12-5. Õlitrafode konstruktsioonielemendid ja jahutus 240
Kolmeteistkümnes peatükk. **Trafosüdamike magneetimine** 244
13-1. Trafosüdamike magneetimisel esinevaid nähteid 244
13-2. Trafo magnetahela arvutus 248
Neljateistkümnes peatükk. **Trafo aseskeem ja selle parameetrid** . . . 251
14-1. Trafomähiste induktiivsused ja elektromagnetiline puiste . . 251
14-2. Trafo pingevõrrandid 255
14-3. Kahe mähisega trafo aseskeemid 259
14-4. Trafo aseskeemi parameetrite arvutuslik määramine . . . 267
14-5. Trafo aseskeemi parameetrite katseline määramine 272
Viieteistkümnes peatükk. **Trafo töö koormusel** 278
15-1. Trafo koormusrežiimi füüsikaline olemus, vektor- ja energeetilised diagrammid 278

15-2. Trafo pingemuutus 283
15-3. Trafo pinge reguleerimine 285
15-4. Trafo kasutegur 288
15-5. Trafode paralleeltöö 291
Kuueteistkümnes peatükk. **Trafode mittesümmeetriline koormus** . . . 296
16-1. Sümmeetriliste komponentide meetodi rakendamine 296
16-2. Trafode mittesümmeetrilisel koormusel esinevad füüsikalised töötingimused 303
Seitsmeteistkümnes peatükk. **Siirdeprotsessid trafodes** 307
17-1. Trafo pingestamine 307
17-2. Trafo järsk lühis 313
17-3. Liigpinged trafodes 317
Kaheksateistkümnes peatükk. **Eritüüpi trafod** 323
18-1. Kolme mähisega trafod 323
18-2. Autotrafod ja jadalülitusega trafod 326
18-3. Pinge sujuva reguleerimisega trafod 330
18-4. Teisi trafode tüüpe 331
Kirjandus 335

Александер Вольдек. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ. На эстонском языке. Перевели с русского А. Пярлист, Э. Валласте. Художественное оформление А. Сяде. Издательство «Валгус». Таллин, Пярнуское шоссе, 10. Toimetaja P. Sarevet. Kunstiline toimetaja M. Niin. Tehniline toimetaja I. Vahtre. Korrektor M. Lõokene. Laduda antud 20. VII 1971. Trükkida antud 22. V 1972. Läti NSV Staicele Paberivabriku trükipaber nr. 1, 60×90/16. Trükipoognaid 21,25. Arvestuspoognaid 21,62. Trükiarv 7000. Tellimuse nr. 4629. Hans Heidemanni nim. trükikoda, Tartu, Ülikooli 17/19. II.

Hind rbl. 1.—

A M Cohrammèire emy f voduoawand
A G ehitus pt too pohimotte
A M magneetimoscover f kallatiskegel lekk

1K 295 .K3
K293 K11

1.
A
32591

TÜ RAAMATUKOGU
1 0300 00308824 4