

Kuno Janson • Ants Kallaste

ELEKTRIMASINATE ALUSED

TTÜ Kirjastus

2017

Esikaanel on kujutatud 1930ndatel Rootsi firma ASEA poolt valmistatud üheankrumuundur. See on kiirusel 1500 p/min töötav sünkroonmasin, mis muudab kolmefaasilise vahelduvvoolu alalisvooluks ja ka vastupidi. Enne pooljuhtmuundurite tulekut kasutati elektrimasinmuundureid. Üheankrumuundur on kasutatav nii vahelduvvoolumootorina kui ka alalisvoolumootorina. Samuti ka vahelduvvoolugeneraatorina või alalisvoolugeneraatorina, kui ta siduda võlli kaudu jõumasinaga.

Tagakaanel on kujutatud tänapäevane firma ABB poolt valmistatav õhkjahutusega lühisrootoriga asünkroonmootor. Tegemist on NXR-tüüpi standardmootoriga võimsusega 355 kW, pöörlemiskiirusega 1500 pöört minutis ja nimipingega 6 kV. Antud tüüpi mootoreid kasutatakse peamiselt erinevate pumba- ja ventilatsioonirakendustes.

Käesoleva raamatu väljaandmist toetasid Elering AS ja ABB AS.

Toimetanud Tiiu Sakkos

Autoriõigus:

Kuno Janson, Ants Kallaste,

Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut, 2017

ISBN 978-9949-83-150-4

SAATEKS

Tänapäeva maailm on mehhaniseeritud, automatiseeritud ja üha enam ka robotiseeritud. Selles tehnikaga küllastunud maailmas on põhiliseks liikumise tekitajaks elektrimootor. Igal inseneril peaks olema vähemalt üldine ettekujutus, mida elektrimootor teeb – mida see mootor suudab ja mida ei suuda.

Kahekümnenda ja kahekümne esimese sajandi vahetus oli infotehnoloogia arengu kõrgeaeg. Elektrimasinate arengu kõrgeaeg oli umbes sada aastat tagasi. Mehaanika arendati põhijoontes välja veel enne seda. Elektrotehnika ei ole vähem komplitseeritud kui infotehnoloogia. Mehaanika pole vähem komplitseeritud kui elektrotehnika. Oleks hea, kui iga insener tunneks nii mehaanikat, elektrotehnikat kui ka infotehnoloogiat. Selline teadmiste maht hakkab aga ületama inimese võimekuse piire.

Sada aastat tagasi pani elektrimasinate õpiku autor sinna kirja kõik, mida ta teadis. Ta võis seda teha, sest siis õppisid elektrotehnikat need vähesed, kellel oli võimalust, huvi ja annet. Vanad elektrimasinate õpikud ei ole aegunud. Tänapäeval kasutatavad elektrimasinad olid tuntud ka sada aastat tagasi. Kuid tänapäeva tudengitel ei ole enam võimalik kulutada nii palju energiat elektrimasinate õppimiseks, kui seda varem tehti. Juurde on tulnud terve uus ja oluline valdkond – infotehnoloogia. Kuid samuti ka elektroonika. Vaja on uut, vähem mahukat elektrimasinate õpikut, kus aga üldpõhimõtted oleksid alles. Seda on käesoleva õpiku kirjutamisel arvestatud. Detaile on võimalik suhteliselt lihtsalt internetist leida, kui üldised põhimõtted on teada.

Kõige kontsentreeritumal ja täpsemal kujul on üldised põhimõtted valemites. Kuid valemites on see info kodeeritud kujul. Valemite dekodeerimiseks on vaja tunda valemites olevate sümbolite tähendust. Samuti on vaja üldjuhtumilt üksikjuhtumile ülemineku oskust. See üleminek tekib valemis olevate sümbolite mõttelisel või kirjalikul asendamisel arvvaartustega. Ilma selle üleminekuta on valem kasutu. Seda üleminekut saab trennida ülesannete lahendamisega.

Üks valem kirjeldab suhteliselt väikest osa elektrinasinates toimuvatest protsessidest. Vaja on tunda kõiki olulisi protsesse, nende vahelisi seoseid ja ka konstruktiivseid detaile, millest masin koosneb. Kõikide oluliste protsesside tundmisel tekib süsteemne arusaam ja areneb üldine tehniline taiplikkus. Tekib pilt, kuidas tehnika maailmas asjad käivad. Taiplikkus põhineb alateadvusel, mis on väga kiire, kuid üsna ebatäpne. Probleemide lahendamisel on taiplikkus siiski väga tähtis, sest selle abil jäetakse kiiresti kõrvale ebaoluline ja keskendutakse olulisele.

Nii elektrimasinate kui ka trafode juures on olulisteks mõisteteks energia, mehaaniline võimsus, elektrivõimsus (sealhulgas aktiivvõimsus, reaktiivvõimsus ja näivvõimsus), soojusvõimsus, pöördemoment, pöörlemiskiirus, sünkroonne pöörlemiskiirus, pöörlev magnetväli, magnetvoog, magnetvoo tihedus, magnetvälja tugevus, magnetahel, magnetiline takistus, puisteinduktiivsus, indutseeritud elektromotoorjõud, indutseeritud mehaaniline jõud, magnetiline läbitavus, magneetimiskõver ja selle hüsterees, hüstereesikaod ja pöörisvoolukaod, tühijooksuvool, lühisevool, nimivool ja nimipinge, üleminek mootoritalitlusest generaatoritalitlusse. Trafode juures lisaks veel lühisepinge, lülitusrühm, pingemuutus ja askeem. Süsteemi teine pool on ülevaade kasutatavate elektrimasinate ja trafode tüüpidest, nende konstruktsioonist ja tööpõhimõtetest.

Elektrimasinates toimuvate protsesside kirjeldamiseks on vaja tunda ka energetikast, mehaanikast, elektrotehnikast ja füüsika elektromagnetismi osast pärit seadusi. Õpitava aine sisulise mõistmise huvides on õpiku algusosas ära toodud lühikesed käsitlused nende distsipliinide elektrimasinatega seotud osadest. Silmas on peetud õppijatele süsteemse tehnilise maailmapildi kujundamist. Süsteemitud teadmised on kasutatud.

SISUKORD

| | | |
|--------|---|----|
| 1 | ALGTEADMISED ELEKTRIMASINATEST JA TRAFODEST | 9 |
| 1.1 | Elektrimasina ja trafo roll elektrienergia tootmises, kasutamises ja ülekandes | 9 |
| 1.1.1 | Milleks on elektrimasinad ja trafod vajalikud? | 9 |
| 1.1.2 | Mida kujutavad endast energia ja võimsus, mida elektrimasinad annavad ja muundavad? | 12 |
| 1.2 | Elektrimasinate mehaanilised ja elektrilised komponendid | 18 |
| 1.3 | Pöörleva liikumise mehaanika | 21 |
| 1.4 | Väljad ja ruum. Püsिमagnet ja elektromagnet | 26 |
| 1.5 | Konstruktiiivne magnetpoolus ja voopoolus | 31 |
| 1.6 | Samm-mootorite ehitus ja tööpõhimõte | 33 |
| 1.7 | Liikuvad magnetvoo poolused paigalseisvas magnetahelas | 36 |
| 1.8 | Sünkroonmasina konstruktsioon ja tööpõhimõte | 41 |
| 1.9 | Alalisvooluahela põhimõisted | 47 |
| 1.9.1 | Elektriliste protsesside interpreteerimine mehaaniliste vastetega | 47 |
| 1.9.2 | Ideaalne ja reaalne pingesallikas | 48 |
| 1.9.3 | Pingesallika aktiiv- ja passiivtalitus | 50 |
| 1.10 | Elektrimasinas toimuvate protsesside kirjeldus | 51 |
| 1.10.1 | Elektromotoorjõu ja mehaanilise jõu teke magnetväljas | 51 |
| 1.10.2 | Lineaarse alalisvoolumasina käivitamine mootorina | 54 |
| 1.10.3 | Lineaarne alalisvoolumasin mootorina | 55 |
| 1.10.4 | Lineaarne alalisvoolumasin generaatorina | 57 |
| 1.10.5 | Alalisvoolumasina käivitusvoolu piiramise vajadus | 59 |
| 1.10.6 | Ülevaade energiamuundusprotsessidest elektrimasinas | 59 |
| 1.11 | Trafo konstruktsioon ja tööpõhimõte. Elektrienergia muundamine ideaaltrafos | 62 |
| 1.11.1 | Trafode magnetahelad | 65 |
| 1.11.2 | Trafo mähised | 67 |
| 2 | ELEKTROMAGNETISM | 68 |
| 2.1 | Magnetväli ja selle tekitamine | 68 |
| 2.1.1 | Pika sirge juhtme magnetväli | 68 |
| 2.1.2 | Magnetvoo tiheduse väli ja magnetvoog | 69 |
| 2.1.3 | Magnetvoo, elektrivoolu ja vedelikuvoolu tekkeprotsesside analoogia | 71 |
| 2.1.5 | Elektrimasinatele sobiv väli ja selle juhtimine õhupilusse | 73 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 2.1.6 | Koguvoolu seadus (Ampère'i seadus) ja pooli magnetväli | 74 |
| 2.1.7 | Magnetahelate arvutamine | 76 |
| 2.1.8 | Ferromagnetiliste materjalide magnetilised omadused | 77 |
| 2.2 | Ajas muutuva magnetvälja poolt indutseeritud pinge | 84 |
| 2.2.1 | Faraday seadus ja Lenzi reegel | 84 |
| 2.2.2 | Endainduktsioon ja induktiivsus | 86 |
| 2.2.3 | Induktiivpool kui energiat salvestav element elektriahelas | 88 |
| 2.2.4 | Ajas muutuva magnetvoo saamine homogeenses magnetväljas pöörleva raami abil. Siinuspinge ja siinusvool | 93 |
| 2.2.5 | Faasivektorite diagramm ehk faasordiagramm | 96 |
| 2.2.6 | Faasinurk ja faasinihe | 97 |
| 3 | VAHELDUVVOOLUAHELATE PÕHIMÕISTED | 99 |
| 3.1 | Induktiivsus ja mahtuvus vahelduvvooluahelas. Reaktiivtakistus | 99 |
| 3.2 | Segataktistus vahelduvvooluahelas. Näivtakistus | 101 |
| 3.3 | Vahelduvvooluvõimsus | 104 |
| 3.4 | Kolmefaasilised ahelad | 107 |
| 3.4.1 | Kolmefaasilise süsteemi tähtühendus | 108 |
| 3.4.2 | Kolmefaasiline süsteem kolmnurkühenduses | 109 |
| 4 | TRAFOD | 111 |
| 4.1 | Kadudeta trafo tühijooks | 111 |
| 4.2 | Primaarvoolu koormuskomponendi tekkimine sekundaarvoolu mõjul ... | 116 |
| 4.3 | Trafode üldlevinud kasutusvaldkonnad ja konstruktsioonid | 119 |
| 4.3.1 | Trafode magnetahelate ehitus | 119 |
| 4.3.2 | Trafo mähiste tüübid | 123 |
| 4.4 | Trafo parameetrid ja mudel | 124 |
| 4.4.1 | Vool, pinge ja võimsus ideaaltrafos | 126 |
| 4.4.2 | Näivtakistuse ehk impedantsi muutmine ideaaltrafoga | 128 |
| 4.4.3 | Ideaalset trafot sisaldava ahela arvutamine | 129 |
| 4.5 | Trafo aseskeem | 134 |
| 4.6 | Suhteliste ühikute süsteemi kasutamine | 136 |
| 4.7 | Trafo lühis ja lühisekatse | 138 |
| 4.7.1 | Miks on vaja uurida trafo lühisetalitlust? | 138 |
| 4.7.2 | Lühisekatse tegemine | 140 |
| 4.7.3 | Lühisekatsel saadud andmete kasutamine | 141 |
| 4.8 | Trafo tühijooksukatse | 145 |
| 4.9 | Trafo pingemuutus | 147 |

| | | |
|--------|---|-----|
| 4.10 | Trafo pingereguleerimine | 150 |
| 4.11 | Koormusvoolu muutumise mõju trafotööle | 152 |
| 4.12 | Kolmefaasiliste trafode mähiste ühendusskeemid ja lülitusrühmad. Trafode rööptöö | 154 |
| 4.12.1 | Ühendusklemmide tähised ja ühendusskeemid | 154 |
| 4.12.2 | Trafode rööpühendus. Ühtlustusvoolude teke | 157 |
| 4.12.3 | Lülitusrühma mõiste | 160 |
| 4.12.4 | Trafode rööptööle lülitamise tingimused | 162 |
| 4.13 | Mittesümmeetriline koormus kolmefaasilistes trafodes | 163 |
| 4.14 | Autotrafod | 166 |
| 4.15 | Pinge ja voolu mõõtmise trafod | 168 |
| 4.16 | Siirdeprotsessid trafodes | 170 |
| 4.16.1 | Trafo pingestamine | 170 |
| 4.16.2 | Trafo järsk lühis | 174 |
| 5 | ASÜNKROONMASINAD | 177 |
| 5.1 | Asünkroonmasina ehitus ja tööpõhimõte | 177 |
| 5.2 | Asünkroonmasina staatori elektrilise tasakaalu võrrand | 183 |
| 5.3 | Asünkroonmasina rootori elektromotoorjõud ja vool | 183 |
| 5.4 | Asünkroonmootori aseskeem ja faasordiagramm | 184 |
| 5.5 | Asünkroonmootori võimsuste bilanss | 187 |
| 5.6 | Asünkroonmootori pöörlemoment | 188 |
| 5.7 | Asünkroonmootorite käivitamine | 190 |
| 5.8 | Asünkroonmootorite pöörlemiskiiruse muutmine | 194 |
| 6 | SÜNKROONMASINAD | 200 |
| 6.1 | Sünkroonmasina otstarve | 200 |
| 6.2 | Sünkroongeneraatori pingete tasakaal | 205 |
| 6.3 | Sünkroonmasina moment | 208 |
| 6.4 | Sünkroonmootori tüübid ja omadused | 209 |
| 6.4.1 | Klassikaline elektrilise ergutusega sünkroonmootor | 210 |
| 6.4.2 | Püsimagnetitega sünkroonmootorid | 211 |
| 6.4.3 | Sünkroonreluktantsmootorid | 213 |
| 6.4.4 | Sünkroonmootorite pöörlemiskiiruse reguleerimine | 214 |
| 6.5 | Sünkroongeneraatori töö üksikuna | 217 |
| 6.6 | Sünkroongeneraatorite paralleeltöö | 219 |
| 6.6.1 | Paralleeltööle lülitamise vajalikud tingimused | 220 |
| 6.6.2 | Võrgus töötava sünkroongeneraatori aktiiv- ja reaktiivvõimsuse reguleerimine | 222 |

| | |
|--|-----|
| 7 ALALISVOOLUMASINAD | 226 |
| 7.1 Alalisvoolumasinate ehitus ja tööpõhimõte | 226 |
| 7.2 Alalisvoolumasina talitlused | 238 |
| 7.3 Alalisvoolumootori pöörlemiskiiruse reguleerimine | 240 |
| 7.4 Vahelduvvoolu servomootor ehk harjadeta alalisvoolumootor | 244 |
| LISA 1 Väiketrafoode lihtne arvutus | 248 |
| LISA 2 Firma ABB lühisrootoriga asünkroonmootorite kataloogiandmed | 255 |
| LISA 3 Firma ABB sagedusmuundurite ACS880-01 kataloogiandmed | 257 |
| KIRJANDUS | 259 |

1 ALGTEADMISED ELEKTRIMASINATEST JA TRAFODEST

20. sajandil kasvas maailma elektrienergia toodang ligikaudselt 10 teravatt-tunnilt 15 000 teravatt-tunnini aasta kohta ehk 1500 korda. See oli elektri kasutuselevõtu sajand. 2010. aastal oli elektrienergia tarbimine Eestis ühe elaniku kohta 19,8 kWh päevas. Elektri kasutuselevõtt on muutnud inimeste eluviisi.

Kui alles paarsada aastat tagasi said inimesed ilma elektrita edukalt hakkama, siis nüüd on elukorraldus suurel määral muutunud ja toimetulek ilma elektrita on väga problemaatiline. Elektri vajalikkusest saame täiel määral aru ainult siis, kui elekter äkki kaob. 2003. aasta 14. augustil juhtus USAs suur elektrikatkestus. Ühe tunni jooksul läks rivist välja üle 500 elektrijaama ja vooluta jäi umbes 50 miljonit inimest. 350 000 inimest olid lõksus rongides, liftides või metroos. Kõik hakkasid helistama ja mobiilivõrgud lõpetasid ülekoormuse tõttu töö. Sularahaautomaatidest ei saanud enam raha. Poed ei saanud enam müüa, sest kassaaparaadid ei töötanud. Veevärgist kadus surve ja ka WC-d ei töötanud enam. Loomulikult seiskusid ka kõik tootmisettevõtted. Kogu elukorraldus oli väga tõsiselt häiritud. Tekkinud kahju hinnati 6 miljardile dollarile.

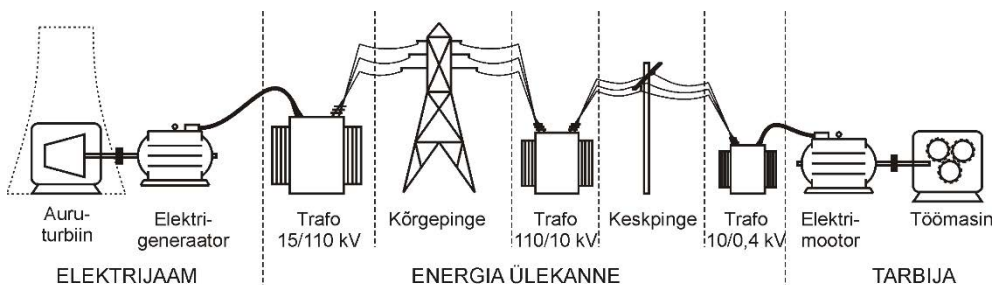
1.1 Elektrimasina ja trafo roll elektrienergia tootmises, kasutamises ja ülekandes

1.1.1 Milleks on elektrimasinad ja trafod vajalikud?

Selles, et elekter on meil igapäevaselt olemas, on elektrimasinatel ja trafodel üsnagi oluline roll. 98% elektrienergiast toodetakse elektrigeneraatoritega. Üle 60% elektrienergiast tarbivad elektrimootorid. Enamik tänapäeval kasutatavatest mehhanismidest pannakse liikuma elektrimootorite jõul. Elektrimootor on puhas, lihtsalt käivitata ja reguleeritav. Elektrimootor ei vaja pidevat õhu ja kütuse lisamist nagu sisepõlemismootor. Ta sobib ka kohtades, kus põlemisega seotud heitmed ei ole soovitatavad. Soojusenergia või mehaanilise energia saab muundada elektriliseks energiaks sobivas kohas ja edastada siis kaugete vahemaade taha.

Elektrimootorite pöörlemiskiirus ja moment on reguleeritavad palju suuremates piirides kui soojusjõumasinatele, kusjuures elektrimootori kasutegur langeb reguleerimisel oluliselt vähem. Näiteks vajab bensiinimootoriga auto libistussidurit, kuid elektriauto mootor arendab momenti ka nullkiirusel ja sidurit ei vaja.

Elektrimootorid vajavad aga toidet elektrivõimsuse allikalt, milleks on tavaliselt elektrivõrk. Elektrivõrk on energiavoo ülekandja. Elektrivõrku annab võimsust elektrijaamas olev generaator (joonis 1.1). Elektrigeneraatori võlli paneb pöörlema kas soojuselektrijaamas olev auruturbiin, mis on soojusjõumasin, või ka mõni teine jõumasin. Elektrigeneraatori, elektrivõrgu ja elektrimootori kaudu antakse auruturbiini mehaanilist energiat edasi tarbija töömasinale. Kuid elektrivõrgu kaudu antakse energiat ka mitmesugustele teistele seadmetele, nagu valgustus, küttekehad ja muud.



Joonis 1.1. Elektrienergia tootmine ja tarbijale kättetoimetamine

Elektrijaamast antakse toidet suurele hulgale tarbijatele, mis asuvad elektrijaamast sadade kilomeetrite kaugusel. Nii pikkade elektriliinide takistus kujuneb üsna suureks. Palju tarbijaid võtab ühtekokku palju voolu. Suur vool suure takistusega liinis tekitab aga suure energiakao. Kaovõimsus kasvab proportsionaalselt voolu ruuduga

$$P_{\text{kadu}} = I^2 r_l, \quad (1.1)$$

kus P_{kadu} – kaovõimsus liinis;

I – vool liinis;

r_l – liini takistus.

Liinikadude vähendamiseks, ilma et ülekantav võimsus väheneks, saab kasutada pinget tõstmist. Kui tõsta pinget näiteks 100 korda, väheneb vool 100 korda (võimsus jääb samaks) ja liinikadu väheneb 10 000 korda. Kõrgel pingel vähenevad kaod väga palju. Kuid ohutuse seisukohalt 10 000-voldist pinget tупpa tuua siiski ei tohi. Sellepärast kasutatakse tarbimisel väiksemat pinget ja ülekandel suuremat pinget. Pinge nivoo muutmiseks kasutatakse transformaatoreid.

Elektrijaama generaatoreid ei suudeta ehitada kõrgemale pingele kui 10...20 kV. Seepärast on elektrijaama juures pinget tõstev trafoalajaam (joonis 1.1). Põhivõrgu pikkadel liinidel kasutatakse 110- või 330-kilovoldist kõrgepinget. Lühemate liinide ja hargnemistega jaotusvõrgus kasutatakse 10...36 kV keskpinget. Tarbijad saavad toite 0,4/0,23 kV madalpingel. Pinge nivoosid muutvad transformaatoreid on elektrivõrgus hädavajalikud. Elektrimasinatele ja transformaatoreile on iseloomulik, et neis mõlemas toimub energiavoo ülekande magnetvälja vahendusel läbi õhu. Peale elektriahelate on neis ka magnetahelad.

Elektrijaama võimsuse antud ajamomendil määrab tarbijate võimsuste summa, mis muutub ajas juhuslikult vastavalt tarbijate sisse- ja väljalülitamistele. Elektrijaam peab suutma oma võimsust muuta vastavalt tarbijate nõudlusele. Tal peab alati olema teatud võimsuse varu ehk reservvõimsus. Kui tarbijate võimsuste summa ületab jaama maksimaalse võimsuse, siis ei ole jaam enam võimeline töötama ja lülitub automaatselt välja. Kõik tarbijad jäävad siis ilma vooluta. Sellist olukorda kirjeldati eespool.

Ülesanne 1.1

Alalisvoolu liin kannab pingel 400 V üle 80 kW suurust võimsust. Sealjuures on liinil tekkiv kaovõimsus 5% ülekantavast võimsusest. Mitu korda on vaja tõsta liini pinget, et kaovõimsus liinil oleks 10 korda väiksem?

Lahendus

1. Esialgne kaovõimsuse suurus on

$$P_{\text{kadu } 1} = 0,05P = 0,05 \cdot 80 = 4 \text{ kW} .$$

2. Alalisvoolu võimsus on määratud valemiga $P = U \cdot I$. Siit saame esialgse voolu

$$I_1 = P/U_1 = 80\,000/400 = 200 \text{ A} .$$

3. Elektriliini takistus on valemi (1.1) järgi

$$r_{\text{liin}} = P_{\text{kadu } 1}/I_1^2 = 4000/200^2 = 0,1 \Omega .$$

4. Voolu liinis, mille puhul kadu on 10 korda väiksem, saame samuti valemi (1.1) järgi, kui võtame, et $P_{\text{kadu } 2} = 0,1P_{\text{kadu } 1}$:

$$I_2 = \sqrt{\frac{0,1P_{\text{kadu } 1}}{r_1}} = \sqrt{\frac{0,1 \cdot 4000}{0,1}} = 63,25 \text{ A} .$$

5. Pinge liinis uuel voolu väärtusel on

$$U_2 = P/I_2 = 80\,000/63,25 = 1265 \text{ V} .$$

6. Pinget on vaja tõsta

$$U_2/U_1 = 1265/400 = 3,16 \text{ korda} .$$

Kontrollküsimused

1. Mis juhtub, kui linnas kaob kolmeks päevaks pinge kogu elektrivõrgus?
2. Kus ja milliste masinate abil toodetakse elektrienergiat?
3. Millised masinad tarbivad ära üle poole toodetud elektrienergiast?
4. Kuidas toimub elektrienergia kättetoimetamine tarbijatele?
5. Mis määrab elektrijaama võimsuse igal ajahetkel ja kuidas see võimsus ajas muutub?
6. Miks kasutatakse elektrienergia ülekandel suuremat pinget kui tarbijad seda vajavad?
7. Milliseid seadmeid kasutatakse elektripinge nivoo muutmiseks?
8. Millised on tavalised pingenihood elektrijaama generaatoritel, põhivõrgu ülekandeliinidel ja jaotusvõrgus?

1.1.2 Mida kujutavad endast energia ja võimsus, mida elektrimasinad annavad ja muundavad?

Enne elektrimasinate juurde asumist on vaja omandada üldine ettekujutus energiast ja võimsusest. On vaja tundma õppida, mis on elektrivõimsus ja elektrienergia, mehaaniline võimsus ja mehaaniline energia. Samuti ka soojusvõimsus ja soojusenergia, mida elektrimasinate juures nimetatakse ka kaovõimsuseks ja energia-kaoks.

Majandusteadus käsitleb energiat põhiliselt kaubana, mida toodetakse, müüakse ja tarbitakse ära. Termodünaamika seaduste kohaselt ei saa aga energiat üldse tekitada ja seega ka toota. Energias saab ainult muundada ühelt kujult teisele. Sellepärast ei saa energiat ka ära tarbida. Nii tootmine kui ka tarbimine on rangemalt võttes siiski ainult muundamised.

Rahvakeeles öeldakse, et külmkapp tarbib võrgust elektrienergiat. Korrektne oleks aga öelda, et külmkapp saab võrgu kaudu elektrivõimsust, mille annab võrku elektrijaam. Milles on erinevus? Kui külmkapp lülitas ennast sisse ja hakkas võrgust võtma elektrivõimsust 100 W, siis selsamal ajamomendil suurendas elektrijaam oma võimsust 100 W pluss kadude võrra. Võrgus ei ole energiavaru. Elektrienergia tarbitakse samal ajahetkel kui toodetakse. Võrk ilma elektrijaamata (või elektrigeneraatorita) ei saa võimsust välja anda. Elektrijaam, ülekandev elektrivõrk ja tarbijad moodustavad energiasüsteemi. Seega külmkapp tarbib energiat energiasüsteemist ja võimsust elektrivõrgust.

Kõige lihtsam on kirjeldada alalisvooluvõimsust, mis avaldub kujul

$$P = U \cdot I, \quad (1.2)$$

kus P – elektriline võimsus vattides, W;

U – pingevoltides, V;

I – vool ampères, A.

Elektrienergia on määratletud kui elektrivõimsuse integraal aja järgi. Ajas muutumatu võimsuse korral

$$W_{el} = P \cdot \Delta t = U \cdot I \cdot \Delta t, \quad (1.3)$$

kus W_{el} – elektrienergia vattsekundites, Ws;

Δt – ajavahemik tarbimise lõpu ja alguse vahel sekundites, s.

Valem (1.3) näitab teatud ajavahemiku vältel elektrienergia läbinud energiahulka vattsekundites ehk džaulides, mis on elektrienergia juba väljunud ja on mingis teises kohas ja mingil teisel kujul (soojus, mehaaniline energia või mõni muu energialiik). See energia kogus on hõlpsasti mõõdetav elektrienergia arvestiga. Arvestites kasutatav mõõtühik on tavaliselt kilovatt-tund (kWh); $1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Ws}$.

Tavalise kauba kogust on võimalik kaalumisega hetkeliselt määrata ja kaup on alles ka pärast kaalumist. Elektrienergia arvesti aga tegeleb elektrienergia koguse mõõtmisega kogu selle ajavahemiku jooksul, kui elektrivõimsust tarbitakse. Kui

mõõtmise on lõpetatud, siis mõõdetud elektrienergiat ei olegi enam kusagil. See on ära tarbitud (täpsemalt muundatud teisele kujule). Veel enamgi, ka mõõtmise ajal ei ole võimalik näidata kohta, kus mingi kogus elektrienergiat asub. Elektrienergia on eriline ja ei ole hästi võrreldav tavalise materiaalse objektiga. Ka valemis (1.3) olevad pinged, vool ja aeg ei ole materiaalsed objektid.

Elektrienergia all mõistetakse mingist energiaallikast elektrivõrgu või elektri-ahela vahendusel tarbijale antud energiat, mis on mõõdetud kas elektrienergia arvestiga või kaudselt. Elektrienergia on elektrivõrku läbinud energia, mitte elektrivõrgus olev energia.

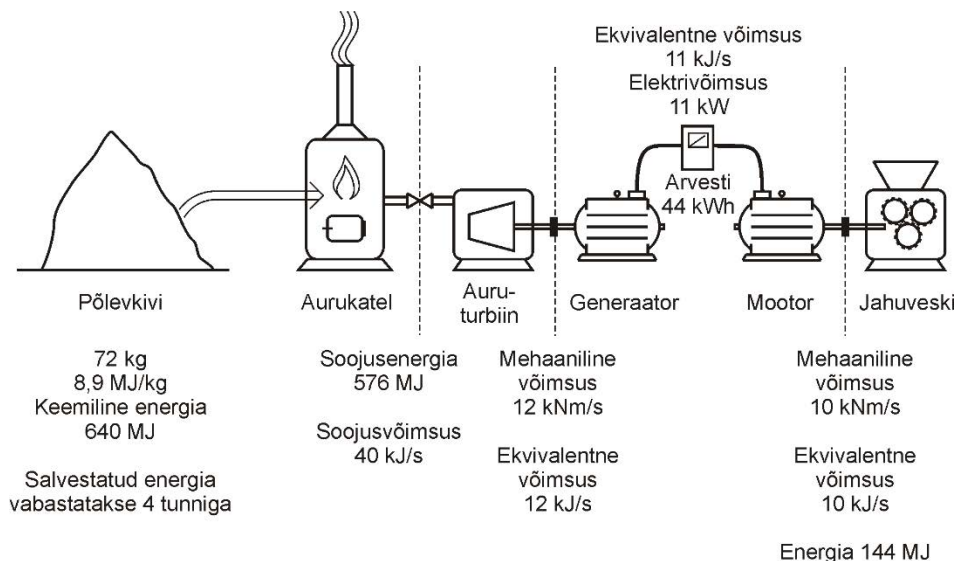
Läbi võrgu käib elektrivõimsus. Kui võimsus on näiteks 10 kW, siis läbib igas sekundis võrku 10 000 vattsekundit ehk džauli energiat. Kuid paradoksaalsel kombel ei asu ka see kogus elektrienergiat ühelgi ajamomendil elektrivõrgus. Võimsus on energiavoo intensiivsuse määr. Piltlikult võib seda võrrelda vee voolu intensiivsusega läbi toru. Elektrivõrk on nagu ilma põhjata ämber. Niipalju kui pealt sisse valad, tuleb alt ka välja. Energia aga on piltlikult vee kogus ämbris, mis on sinna torust voolanud. Väike ebatäpsus on siin selles, et igal ajamomendil on torus teatud kogus vett, kuid elektrivõrgus ei ole elektrienergiat ühelgi ajamomendil.

Kontrollküsimused

1. Kuidas saab leida alalisvooluvõimsust?
2. Kuidas muutub alalisvooluvõimsus, kui vool suureneb kaks korda ja pinge jääb samaks?
3. Kuidas muutub alalisvooluvõimsus, kui vool väheneb kaks korda ja pinge tõuseb kaks korda?
4. Kuidas on määratud alalisvooluenergia?
5. Millise seadmega mõõdetakse elektrienergiat?
6. Millised on elektrienergia mõõtühikud?
7. Ühe tunni jooksul läbis elektrienergia arvestit 2 kWh elektrienergiat. Seejärel tarbimine lõpetati. Kus võiks nüüd asuda need 2 kWh elektrienergiat?
8. Mis kuulub elektrivõrku ja mis kuulub energiasüsteemi?
9. Millega iseloomustatakse elektrivõrgu kaudu ülekantava energiavoo suurust?
10. Tarbija lülitas sisse 100 W võimsusega elektrilambi. Kuidas see mõjutab elektrijaama võimsust?
11. Kui suurt energiakogust on võimalik salvestada elektrivõrku endasse?
12. Miks energia ei ole võrreldav materiaalsete objektidega?
13. Mis juhtub, kui elektrivõrku toidavad võimsusega ainult elektrituulikud ja tuul kaob?

Vaatleme nüüd ühe konkreetse näite põhjal energiat ja võimsust elektrimasinate juures. Elektrimasinad on kas mootorid või generaatorid. Elektrimootori ülesandeks on midagi liikuma panna. Elektrimootori võlliga on ühendatud töomasin

(näiteks jahuveski joonisel 1.2), mis teeb mehaanilist tööd ja kulutab selleks mehaanilist võimsust 10 kNm/s (elektriline ekvivalentvõimsus on 10 kW). Elektrimootor saab veskit ringi ajada sellepärast, et mootor ise saab juhtmete kaudu elektrivõimsust 11 kW. Sellest võimsusest läheb 1 kW mootoris kaduma, sest tööd tehes mootor soojeneb. Mootor muundab elektrivõimsuse veskile vajalikuks mehaaniliseks võimsuseks. Mootor on võimsuse muundur.



Joonis 1.2. Energia muundamise ja ülekande ahel, mille kaudu antakse põlevkivisse salvestatud keemiline energia jahuveskile

Selleks, et elektrivõimsust saada, on teine elektrimasin. See on generaator. Generaator saab mingilt jõumasinalt (joonisel 1.2 auruturbiinilt) mehaanilist võimsust 12 kNm/s ja muudab selle elektrivõimsuseks 11 kW ja soojuskadudeks 1 kJ/s. Generaator on samuti võimsuse muundur nagu mootorgi. Kuid generaator muundab võimsust mootorile vastupidises suunas – mehaanilise võimsuse muudab ta elektrivõimsuseks. Elektrimasinate võimsusmuundamise protsessis läheb alati osa võimsust ka kaduma (masinas tekivad soojuskaod).

Salvestatud energia ja võimsus

Ka mehaanilist võimsust on vaja kusagilt saada. Seda võib saada kütusesse salvestunud keemilise energia muundamisega (põletamisega), nagu on näidatud joonisel 1.2. Põlevkivi põletamisel saadakse soojust. Vaatame seda näidet detailsemalt.

Toodud näites põletatakse aurukatla koldes 4 tunni jooksul 72 kg põlevkivi kütteväärtusega 8,9 MJ/kg ja vabastatakse 640 MJ soojusenergiat. Põhiline osa soojusest (576 MJ) antakse katlas suitsugaasidelt üle veele, mis aurustub. Väiksem osa soojust väljub korstna kaudu koos suitsuga. Aur antakse auruturbiinile, mis muundab 30% auru soojusenergiast mehaaniliseks tööks (nelja tunni jooksul 173 MJ). Pöörlev turbiin arendab seejuures mehaanilist võimsust 12 kNm/s, mis antakse võlli kaudu generaatorile. Edasi muudab generaator mehaanilise võimsuse elektrivõimsuseks,

nagu me eespool nägime. Algul oli energia põlevkivi sees muutumatus olekus ja see muutumatu olek oli kestnud juba väga kaua. Öeldakse, et energia oli salvestatud põlevkivi sisse. Põlevkivi nimetatakse energiakandjaks. Osa põlevkivis salvestatud kujul olevast energiast anti antud näites mitme muundusastme kaudu jahuveskile. Suurem osa läks aga kaduma. Kaod on paratamatud. Kadude suurust hinnatakse kasuteguri järgi. Antud juhul oli kasulik tulemus mehaaniline võimsus 10 kNm/s nelja tunni jooksul. Korrutades võimsuse ajaga (neljas tunnis on 14 400 sekundit) saame 144 000 kNm mehaanilist energiat ehk tööd, mis on ekvivalentne 144 MJ energiaga. Kasutegur on kulutatud energia (640 MJ) suhe kasuliku energiasse (144 MJ), mis on protsentides 22,5%.

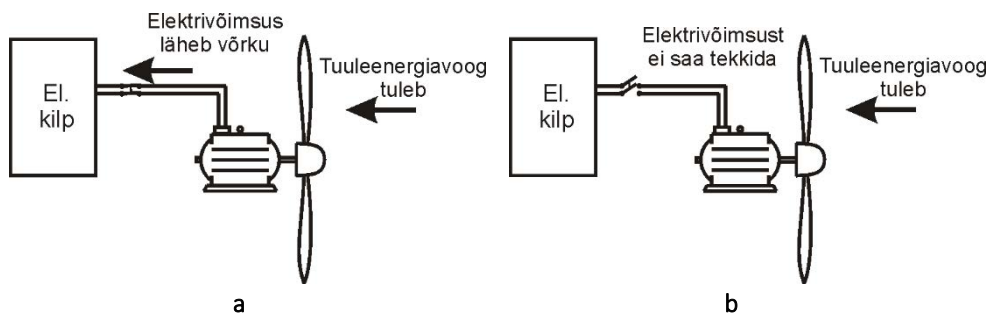
Sellest näitest on oluline meelde jätta, et igal energialiigil on oma mõõtühikud, et muundamise intensiivsust iseloomustatakse võimsusega, et igal muundamisel tekivad soojuskaod, ja ka see, et peab olema mingi energiaallikas, millest muundatavat energiat hangitakse ja mingi lõpptarbija, mis selle energiavoo vastu võtab. Ülekantava energia kogused aga määratakse ära vastava võimsuse ja aja korrutisega.

Põlevkivi pole parim energiakandja. Bensiin on parem, sest tema põletamisel ei teki tuhka. Auto sisepõlemismootoris muudetakse bensiini keemiline energia mehaaniliseks võimsuseks, mis paneb auto liikuma. Kuid auto võib liikuma panna ka elektrimootori abil, mis saab toite akust. Aku on energia salvesti. Salvesti on eriline energiakandja. Salvestisse saab energiat soovikohaselt sisse panna ja välja võtta. Akust läheb elektrivõimsus juhtmeid pidi elektrimootorile, mis muundab selle mehaaniliseks võimsuseks.

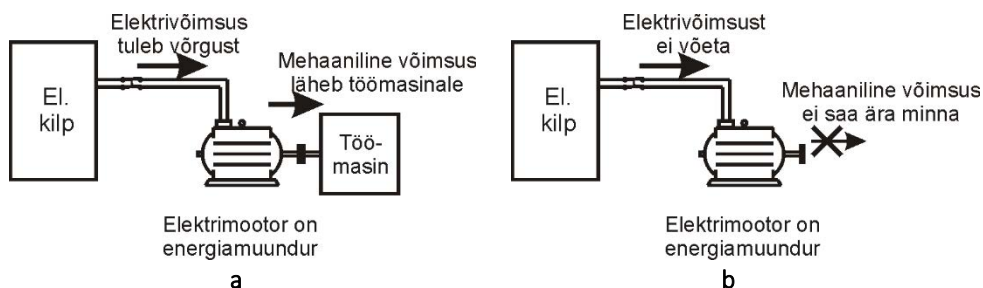
Tühijooks ja elektrimasina koormamine

Elektrigeneraator saab võimsust ja ka energiat ainult siis välja anda, kui on tarbija, mis elektrivõimsust tarbib (muundab elektrienergia mingiks teiseks energialiigiks). Üks selline olukord on kujutatud joonisel 1.3,a. Tuule mehaaniline energia paneb pöörlema tiiviku, mis on elektrigeneraatori võllil. Generaator muudab mehaanilise võimsuse elektrivõimsuseks ja annab selle juhtmete kaudu võrku. Kui aga generaator lülitati abil elektrivõrgust lahti ühendada (joonis 1.3,b), siis ei saa ta enam tuules olevat võimsust muundada. Siis töötab generaator tühijooksul. Tuuleenergiat tuleb peale küll, kuid elektrivõimsuse tarbija puudub. Muundusprotsess ei saa tekkida. Muundusprotsessis muutub üks energialiik teiseks ainult ekvivalentsetes kogustes. Nullvõimsus ühel pool muundurit põhjustab nullvõimsuse ka teisel pool muundurit ja seda sõltumata muundusprotsessi suunast.

Elektrimootor annab mehaanilist võimsust välja ainult nii palju, kui töömasin seda ära tarbib. Seda on näidatud joonisel 1.4,a. Elektrimasina võlliga on ühendatud töömasin. Mehaaniline jõumoment elektrimasina võllil on täpselt nii suur, kui on töömasina takistusmoment. Kui koormusmasin mootori võlli küljest lahti ühendada (joonis 1.4,b), siis mehaaniline võimsus ei saa võlli kaudu ära minna. Mootor pöörleb küll, kuid elektrienergiat mehaaniliseks energiaks ei muunda. Sellise olukorra kohta öeldakse, et mootor töötab tühijooksul. See, et mootori sildile on võimsuseks kirjutatud 10 kW, ei loe midagi. Võimsus 10 kW ütleb ainult seda, et töömasin ei tohi mootorit rohkem koormata.



Joonis 1.3. a – tuulegeneraatorile tuleb tuuleenergia. Tiivik muudab selle pöörlevaks mehaaniliseks võimsuseks. Generaator muudab selle mehaanilise võimsuse elektrivõimsuseks, mis läheb juhtmete kaudu elektrivõrku; b – tuul paneb tiiviku koos generaatoriga pöörlema, kuid elektriahelas on lüliti lahti ja elektrivõimsust ei saa tekkida. Generaator on tühijooksul



Joonis 1.4. a – elektrimootorile tuleb võrgust juhtme kaudu elektrivõimsus. Mootor muudab selle mehaaniliseks võimsuseks, mille annab vööli kaudu töomasinale; b – elektrimootor ei saa elektrivõimsust muundada, kui mehaaniline võimsus ei saa vööli kaudu ära minna. Elektrimootor on tühijooksul

Mis on erinevatel energialiikidel ühist ja mille poolest nad erinevad?

Salvestatud energia olemasolu ei tarvitse olla märgatav. Kui aga energia muundub ühest liigist teise, siis kaasnevad sellega mitmesugused märgatavad nähtused (liikumine, temperatuuri muutus, elektrivool jne). Energia ongi mõõdetav nende muundamisel tekkivate nähtuste ja nende kestuse kaudu. Erinevatel energialiikidel on sellepärast ka erinevad mõõtühikud. Elektrienergiat mõõdetakse vattsekundites (Ws) või kilovatt-tundides (kWh), mehaanilist energiat mõõdetakse njuutonmeetrites (Nm), soojusenergiat mõõdeti varem kalorites (cal) ja teatud määral tehakse seda ka praegu. Kuid on ka üks ühine mõõtühik džaul (J), mida võib kasutada kõikide energialiikide puhul. Kehtib võrdus

$$1 \text{ Ws} = 1 \text{ Nm} = 0,24 \text{ cal} = 1 \text{ J}. \quad (1.4)$$

Seda võrdust tuleb lugeda nii, et 1 Ws elektrienergia muundamisel me saame 1 Nm mehaanilist energiat ja selle veelkordsel muundamisel saame 0,24 cal soojusenergiat ning kõik kolm energiakogust on ekvivalentsed energiaga 1 J. Võrdus (1.4) kehtib siis, kui muunduskadusid ei ole. Elektrienergia, mehaaniline energia ja soojusenergia on oma olemuselt väga erinevad, kuid võrduses (1.4) on nende

vahele pandud võrdusmärk sellepärast, et need energiakogused on muundamisel ekvivalentsed. Näiteks 1 Ws elektrienergiat annab muundamisel 1 Nm mehaanilist energiat.

Analoogiliselt võib vesi esineda vedelikuna, jääna või veeauruna, mis on samuti väga erinevad asjad. Vee puhul me teame, mis on vee kolmel olekul ühist – see on vee molekul H_2O . Energia puhul me aga ei tea, mis on elektrienergia, mehaanilisel energial ja soojusenergiat ühist. „Energia molekul“ pole senini avastatud.

Mis asi on see energia sisuliselt, mis juhtmete kaudu elektrimootorisse tuleb ja pöörleva võlli kaudu seal välja läheb ja mida ei saa tekitada ega hävitada – see pole teada. See on väljaspool inimkonna teadmiste piire. Arvatakse, et energial peaksid olema mingid algosakesed ja et need on väga palju väiksemad kõikidest tuntud elementaarosakestest. Energiamuundusprotsessid esinevad ka kvanttasandil. Tuuma ümber tiirlevad elektronid võivad orbiiti vahetada ja sealjuures ühe valguskvandi energiat välja kiirata. Valguskvandi energia on elektrimasinaid läbivate energiakogustega võrreldes tühiselt väike.

Ülesanne 1.2

Elektriauto peab viima kauba 75 km kaugusele ja tagasi tulema. Auto sõidab kiirusega $v = 90$ km/h ja sellel kiirusel peab tema elektrimootor arendama võimsust $P = 40$ kW. Elektrimootori kasutegur on $\eta_M = 0,92$ ning mootori ja aku vahelise muunduri kasutegur on $\eta_{con} = 0,94$. Kui palju energiat võetakse akust selle sõidu jaoks?

Lahendus

1. Teekonna kogupikkus s on

$$s = 75 \cdot 2 = 150 \text{ km} .$$

2. Sõiduaeg t on

$$t = s/v = 150/90 = 1,67 \text{ tundi} .$$

3. Sõidu kestel elektrimootori poolt tarbitud energia W_M on

$$W_M = P \cdot t = 40 \cdot 1,67 = 66,67 \text{ kWh} .$$

4. Akudest võetav energia W_{aku} on

$$W_{aku} = W_M / (\eta_M \cdot \eta_{con}) = 66,67 / (0,92 \cdot 0,94) = 77,09 \text{ kWh} .$$

Kontrollküsimused

1. Millised on need kolm võimsuse liiki, mida elektrimasinad töötamisel muundavad?
2. Milline elektrimasin muundab elektrivõimsuse mehaaniliseks võimsuseks?
3. Milline elektrimasin muundab mehaanilise võimsuse elektrivõimsuseks?
4. Miks toimub elektrimasinates võimsuse ja energia muundamine ka soojuseks ja kas see on kasulik või kahjulik?

5. Mis on elektrimasina kasutegur?
6. Kuidas saadakse mehaanilist võimsust ja energiat soojuselektrijaamas?
7. Millisel kujul viiakse energia soojuselektrijaama?
8. Kus esineb salvestatud energiat?
9. Kuhu läheb elektrimootori poolt arendatav võimsus?
10. Mis määrab elektrimootori poolt arendatava võimsuse?
11. Milline on elektrimootori poolt arendatav võimsus, kui selle võlliga ei ole töömasinat ühendatud, kuid elektrimootor pöörleb?
12. Milline on generaatori võimsus, kui see pöörleb, kuid ühtki tarbijat pole generaatoriga ühendatud?
13. Milline mehaanilise energia kogus on ekvivalentne 1 Ws elektrienergiaga?
14. Milline soojusenergia kogus on ekvivalentne 1 Ws elektrienergiaga?
15. Mis on ühist mehaanilisel energial, elektrienergial ja soojusenergial?

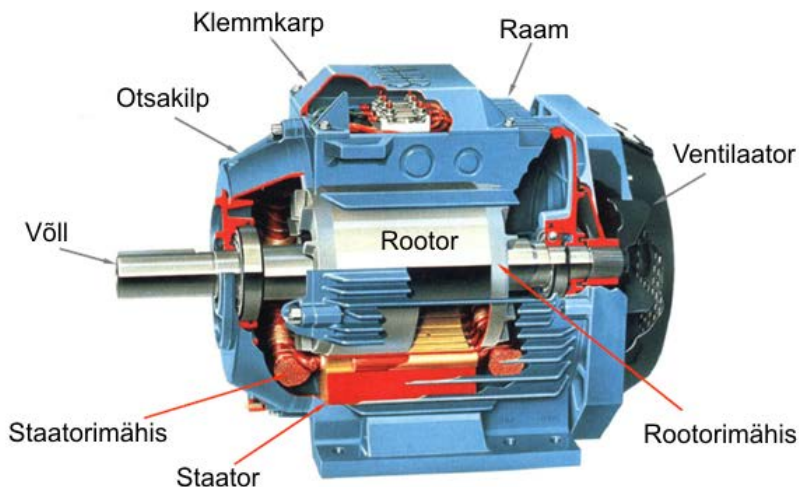
1.2 Elektrimasinate mehaanilised ja elektrilised komponendid

Me vaatasime, et elektrimasinate ülesanne on mehaanilise võimsuse muundamine elektrivõimsuseks ja ka vastupidi – elektrivõimsuse muundamine mehaaniliseks võimsuseks. Nüüd vaatame, milliseid komponente peab elektrimasin üldiselt sisaldama ja kuidas ta on ehitatud, et ta neid ülesandeid täita saaks.

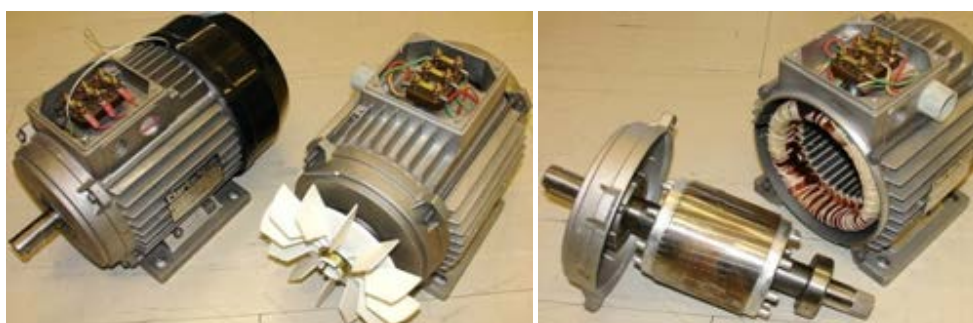
Enim kasutatavad elektrimasinate tüübid on **alalisvoolumasin**, **sünkroonmasin** ja **asünkroonmasin**. Kõiki neid elektrimasinaid saab ehitada nii **pöörleva liikumisega** kui ka **kulgeva liikumisega** (viimaseid nimetatakse **lineaarseteks elektrimasinateks**). Valdavalt kasutatakse siiski pöörlevaid elektrimasinaid.

Ühe keskmise võimsusega pöörleva asünkroonmootori vaade on toodud joonisel 1.5. Mootori korpusesse, staatorisse ja rootorisse on tehtud lõikeid, et osaliselt näidata ka sisemist ehitust. Klemmkarbis on klemmid, mille külge ühendatakse elektrivõrku minevad 3 faasijuhet ja kaitsemaandus. Faasijuhtmete pingestamisel hakkab elektrimootori rootor koos võlliga pöörlema. Võll toetub kuullaagritele, mis asuvad otsakilpides. Väljaulatuv võlliots on töömasinaga ühendamiseks. Võlli teises otsas on jahutusventilaator. Osaliselt on näha ka mootori mähiseid, kus laupühendused on läbi lõigatud. Täit ülevaadet asünkroonmootori ehitusest joonis 1.5 siiski ei anna, sest elektrimootorid on üsna keeruka ehitusega.

Joonisel 1.6 on näidatud üks teine asünkroonmootor osaliselt lahti võetuna. Joonisel 1.6,b on elektrimasina põhiosad staator ja rootor eraldi näha. Staator kujutab endast paigal seisvat õõnessilindrit, mis asub korpuse sees ja on nähtav ainult otsast. Rotor on pöörlev silinder, mis paigutatakse staatori sisse.



Joonis 1.5. Asünkroonmootori vaade



a

b

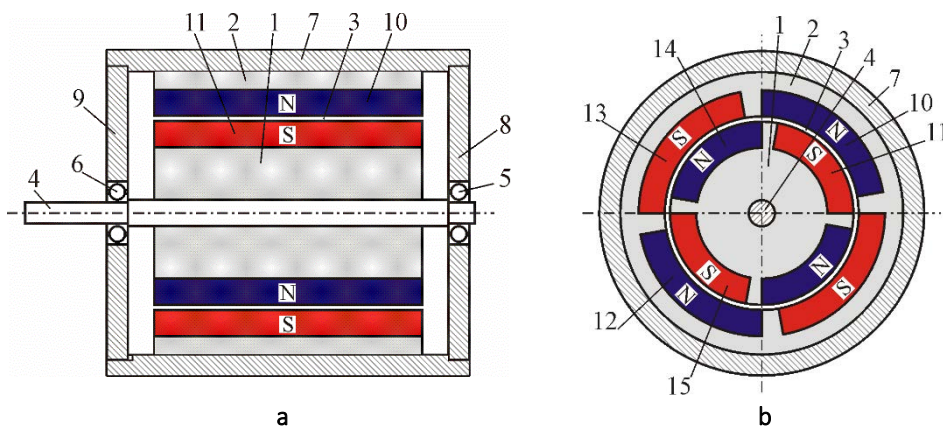
Joonis 1.6. a – asünkroonmootor ventilaatori kattega ja ilma selleta;
b – asünkroonmootori rootor koos võlli, ühe otsakilbi ning laagritega
ja staator koos korpusega

Alalisvoolumasinate ja sünkroonmasinate erinevad asünkroonmasinast, kuid elektrimasinate põhitüübid on konstruktsioonilt piisavalt sarnased, nii et nende põhiosid võib kirjeldada üheskoos.

Rootor 1 paigutatakse staatori 2 sisse nii, et staatori ja rootori vahele jääb õhupilu 3 (joon. 1.7,a,b). Rootorit 1 läbib võll 4, mis asetseb laagritel 5 ja 6. Õõnessilindri kujuline staator 2 on pressitud veel ühe teise õõnessilindri 7 sisse, mida nimetatakse elektrimasina korpuseks. Korpuse 7 välispind ei tarvitse alati silindriline olla. Sellel pinnal võivad olla näiteks ribad soojuse paremaks ära juhtimiseks nagu joonisel 1.5 oleval asünkroonmootoril. Korpuse välispind võib olla ka risttahuka-kujuline. Laagrid on otsakilpide 8 ja 9 sees ja need otsakilbid on kinnitatud korpuse 7 külge. Laagritel asetsev võll saab pöörelda koos rootoriga.

Staatori 2 sisepinnal on staatorimähis 10. Rootori 1 välispinnal on rootorimähis 11. Mõnel masina tüübil võib kas staatorimähis 10 või rootorimähis 11 olla asendatud

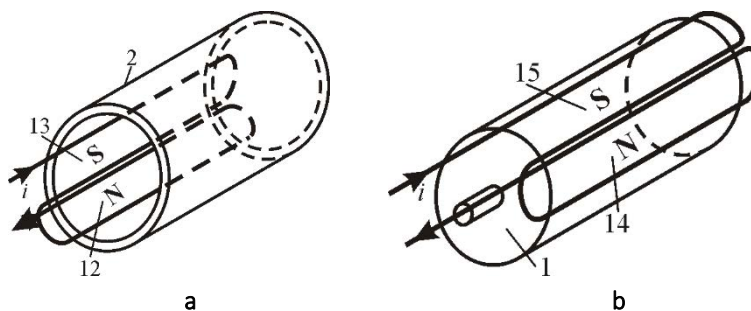
püsimagnetitega. Mähistest läbimineva voolu tõttu või püsimagnetite paigutamise tõttu tekivad rootori 1 välispinnal ja staatori 2 sisepinnal **magnetpooluste paarid**. Pooluspaari moodustavad üks põhjapoolus ja üks lõunapoolus, näiteks **põhja-poolus** 12 ja **lõunapoolus** 13. Joonisel 1.7 on nii rootoril kui ka staatoril kaks pooluspaari. Kõige väiksem pooluspaaride arv on üks ja tavaliselt võrdub elektrimasina rootoril olevate pooluspaaride arv tema staatoril olevate pooluspaaride arvuga. Pooluspaaride arv ei ole piiratud.



Joonis 1.7. Üldlevinud silindrilise kujuga elektrimasina lõige piki pöörlemistelge (a) ja lõige pöörlemisteljega risti (b)

Põhjapooluse ja lõunapooluse vahel on magnetitel tõmbejõud. Kuna rootor 1 saab staatori 2 suhtes pöörelda, siis võtab rootor sisse sellise asendi, kus staatori iga põhjapooluse vastas on rootori lõunapoolus ja staatori iga lõunapooluse vastas on rootori põhjapoolus.

Mähis koosneb **mähisetraadist**, milleks harilikult on õhukese isoleerkihiga vasktraat. Sellest on keritud **mähisepoolid**. Elektrimasina mähised on niiviisi koostatud ja staatorile ning rootorile paigutatud (joonis 1.8), et mähist läbiva voolu mõjul tekivad staatori 2 sisepinnal vaheldumisi põhjapoolused 12 ja lõunapoolused 13 (joonis 1.8,a). Analoogiliselt tekivad rootori 1 välispinnal põhjapoolused 14 ja lõunapoolused 15 (joonis 1.8,b).



Joonis 1.8. Vooluga mähisetraatide abil pooluspaaride tekitamine staatori sisepinnal (a) ja rootori välispinnal (b)

Magnetpoolused on elektrimootoril sellepärast vajalikud, et nende abil pannakse mootor pöörlema ja pöördemomenti arendama. Magnetpooluste ehitust, poolusemähisesse voolu andmisel tekkivaid magnetvälju ja magnetväljade tõttu tekkivaid jõude käsitleme allpool. Järgnevalt vaatame, milliste parameetritega iseloomustatakse elektrimasinate pöörlmist, nende poolt arendatavat pöördemomenti ja kuidas määratakse elektrimasina võimsust.

Kontrollküsimused

1. Millised elektrimasina osad pöörlevad?
2. Millised elektrimasina osad seisavad paigal?
3. Kuidas tekitatakse elektrimasinas magnetpooluste paarid?
4. Millise asendi võtavad rootori magnetpoolused staatori magnetpooluste suhtes, kui rootor saab vabalt pöörelda?

1.3 Pöörleva liikumise mehaanika

Igal elektrimasinal on elektriline osa ja mehaaniline osa. Elektrilise osa kirjeldamisel peab tundma elektrotehnikat, mehaanilise osa kirjeldamisel aga mehaanikat. Et põhiliselt kasutatakse pöörlevaid elektrimasinaid, siis vaatame pöörlevat liikumist iseloomustavaid suurusid. Nendeks on pöördnurk, pöörlmiskiirus ja pöörlemise nurkkiirus, nurkkiirendus, pöördemoment, inertsimoment, töö ja mehaaniline võimsus.

Elektrimasina korral on tegemist pöörlemisega ümber fikseeritud telje. Masina pöörlemisssuuna kindlaks tegemiseks vaadeldakse teda töomasina poolt võlli sihis. Pöörlemisssuund võib olla **päripäeva** (CW – *clockwise*) või **vastupäeva** (CCW – *counter-clockwise*). Masinate vastupäeva pöörlemisssuunda loetakse positiivseks suunaks ja päripäeva pöörlemisssuunda negatiivseks suunaks.

Pöördnurk θ

Kulgliikumisel mõõdetakse keha ümberpaiknemist algasendist lõppasendisse teepikkusega s , mõõtühikuks on meeter. Pöörleval liikumisel pöörleb keha ümber oma telje ja läheb algnurkasendist lõppnurkasendisse. Seda liikumist mõõdetakse pöördnurgaga θ . Pöörleva liikumise loomulik mõõtühik on täispööre. Üks täispööre on 360° või 2π radiaani. Radiaani määratlus on järgmine: kui ringjoone kaare pikkus on võrdne selle ringjoone raadiusega, siis selle kaare otspunktide raadiuste vaheline nurk on võrdne ühe radiaaniga, $1 \text{ rad} \approx 57,3^\circ$.

Nurkkiirus ω

Nurkkiirus iseloomustab pöörleva keha pöördnurga muutumist ajaühikus. Nurkkiirus loetakse positiivseks, kui pöörlemine toimub vastupäeva. Nurkkiirus on analoog kulgliikumise joonkiirusele. Joonkiiruse valem on

$$v = ds/dt \text{ m/s} \tag{1.5}$$

ja nurkkiiruse valem

$$\omega = d\theta/dt \text{ rad/s} . \tag{1.6}$$

Kui pöördenurka mõõdetakse radiaanides, on nurkkiiruse ühikuks üks radiaan sekundis (rad/s).

Elektrimasinate puhul kasutatakse võlli kiiruse kirjeldamisel lisaks ühikule rad/s ka teisi ühikuid. Sageli on kiiruse ühikuks üks pööre sekundis või üks pööre minutis. Traditsiooniliselt kasutatakse eri ühikute korral erinevaid sümboleid. Siin kasutame järgmisi nurkkiiruse sümboleid: ω_{meh} – üks radiaan sekundis (rad/s); f_{meh} – üks pööre sekundis (p/s); n_{meh} – üks pööre minutis (p/min). Need võllikiirused on omavahel seotud järgmiselt:

$$n_{\text{meh}} = 60f_{\text{meh}}; f_{\text{meh}} = \omega_{\text{meh}}/2\pi; \omega_{\text{meh}} = 2\pi f_{\text{meh}}. \quad (1.7)$$

Indeks „meh“ nendes sümboolites viitab mehaanilisele suurusele. Kui mehaaniliste ja elektriliste suuruste segimineku ohtu ei ole, jäetakse indeks sageli ära.

Nurkkiirendus α

Nurkkiirendus on nurkkiiruse ajas muutumise määr. Nurkkiirendus loetakse positiivseks, kui ta algebralises mõttes suureneb. Nurkkiirendus on analoog kulgliikumise joonkiirendusele. Joonkiirendus leitakse valemiga

$$a = dv/dt \text{ [m/s}^2\text{]} \quad (1.8)$$

ja nurkkiirendus vastavalt valemiga

$$\alpha = d\omega/dt \text{ [rad/s}^2\text{]}. \quad (1.9)$$

Kui nurkkiiruse ω ühikuks on rad/s, on nurkkiirenduse α ühikuks radiaan sekundi ruudu kohta (rad/s²).

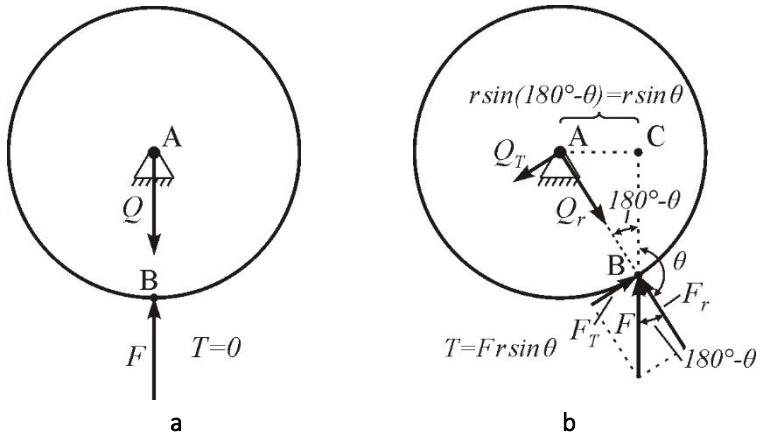
Moment T

Lineaarse liikumise korral põhjustab liikuvale objektile (kehale) rakendatud jõud kiiruse muutumise. Kui jõud puudub, on keha kiirus konstantne. Kui objekt on pöörlev, on tema nurkkiirus konstantne seni, kuni talle ei mõju moment. Mida suurem on objektile mõjuv moment, seda kiiremini muutub objekti nurkkiirus.

Mis on moment? Seda võib nimetada objekti pööramisjõuks. Momendi mõistmiseks kujutame ette silindrit, mis saab ümber oma telje pöörlema. Kui sellele silindrile on rakendatud jõud nii, et jõu mõjusuund läbib silindri telge (joonis 1.9,a), siis silinder pöörlema ei hakka. Kui aga jõud on rakendatud nii, et ta mõjub teljest paremal pool (joonis 1.9,b), hakkab silinder vastupäeva pöörlema. Moment ehk pöörav mõju silindrile sõltub esiteks rakendatud jõu suurusest ja teiseks pöörlemistelje ja jõu mõjusuuna vahelisest kaugusest.

Joonisel 1.9,a kujutatud olukorras ei saa objekt jõu F suunas kulgevast liikuma hakata, sest liikumatu pöörlemistelg A tekitab vastureaktsiooni jõu Q . Punktis B objektile ehk kehale mõjuva jõu F (joonis 1.9,b) võib lahutada kaheks komponendiks, millest üks mõjub raadiuse r suunas (F_r) ja teine on ringi puutuja suunaline (F_T). Joonisel 1.9,a on jõu puutujasuunaline komponent võrdne nulliga ja keha pöörlema ei hakka. Pöörlemist põhjustab ainult puutujasuunaline komponent F_T ,

sest telje vastureaktsioon Q_T mõjub sellele jõukomponendile mitte otse vastu, vaid temaga rööbiti ja raadiuse r kaugusel.



Joonis 1.9. a – jõud on rakendatud silindrile nii, et tema mõjusuund läbib pöörlemistelge, $T=0$; b – jõud on rakendatud silindrile nii, et tema mõjusuund ei läbi pöörlemistelge ja moment T on vastupäeva

Võrreldes kulgliikumisega on pöörleva liikumise tekkimise eripäraks veel asjaolu, et oluline on ka kaugus jõu suuna ja pöörlemistelje vahel (lõik AC joonisel 1.9,b). Seda kaugust nimetatakse jõu **õlaks**. Jõu ja jõu õla korrutist nimetatakse **pöörde-momendiks** T . Pöördemoment iseloomustab pöörlemapanevat mõju täielikult. Mida suurem on jõu õlg, seda kergem on keha pöörlema panna. Mutrit on kergem lahti keerata, kui mutrivõtme saba on pikem.

Jõu õla saab leida joonisel 1.9,b näidatud geomeetrilise konstruktsiooni põhjal nurga θ kaudu. Nurk θ asub jõu rakenduspunkti B tõmmatud raadiuse suuna ja jõu F mõjusuuna vahel. Jõu õla saab avaldada korrutisega $r \sin(180^\circ - \theta)$ ehk teisendades $r \sin \theta$. Seega moment

$$T = Fr \sin \theta . \quad (1.10)$$

Jõu puutuvasuunalise komponendi F_T saab samuti leida $\sin(180^\circ - \theta)$ kaudu:

$$F_T = F \sin \theta . \quad (1.11)$$

Järelikult saab momendi leida ka valemiga

$$T = F_T r . \quad (1.12)$$

Suurem jõud F pöörlemistelje lähedal avaldab sama tugevat pöörlemapanevat mõju kui väiksem jõud F_T pöörlemisteljest kaugemal (lõik AC on väiksem kui lõik AB).

Momendi mõõtühikuks rahvusvahelises mõõtühikute süsteemis SI on njuuton-meeter (Nm).

Newtoni teine seadus pöörlevale liikumisele. Newtoni seadus objektile, mis liigub mööda sirgjoont, kirjeldab seost objektile rakendatud jõu ja tekkiva kiirenduse vahel. See seos on antud valemiga

$$a = F/m, \quad (1.13)$$

kus F on objektile rakendatud jõud, m on objekti mass ja a on tekkiv kiirendus. SI-süsteemis on jõu ühik njuuton (N), massi ühik kilogramm (kg) ja kiirenduse ühik üks meeter sekundi ruudu kohta (m/s^2).

Analoogiline valem kirjeldab seost objektile rakendatud momendi ja tekkiva nurkkiirenduse vahel. Seda seost nimetatakse Newtoni pöörlemisseaduseks, mille valem on

$$\alpha = T/J, \quad (1.14)$$

kus T on rakendatud moment njuutonmeetrites ja α on tekkiv nurkkiirendus rad/s^2 . Teguril J on sama tähendus kui objekti massil lineaarse liikumise korral. Seda nimetatakse objekti inertsimomendiks (*moment of inertia*) ja selle ühik on $kg \cdot m^2$.

Mehaanikas määratletakse inertsimomenti valemiga

$$J = mr_1^2, \quad (1.15)$$

kus m – pöörleva keha mass, kg;

r_1 – keha inertsiraadius, m.

Inertsiraadius iseloomustab pöörleva massi keskmist kaugust pöörlemisteljest. Hooratta inertsimoment püütakse teha võimalikult suur. Selleks viiakse põhiline mass teljest kaugemale välisläbimõõdu lähedale ratta talda ja seda massi ühendavad rummu ja teljega ainult kodarad. Siin me inertsiraadiuse määramist ei käsitle.

Joonkiirus v

Pöörleva keha punktidel on lisaks nurkkiirusele ka joonkiirus. Joonkiirus sõltub vaadeldava punkti kaugusest pöörlemisteljest. See kaugus on vaadeldava punkti liikumistee raadiuseks r (punkt B joonisel 1.9,b). Võlli ühe täispöördega läbib punkt B teepikkuse $s = 2\pi r$. Täispöörde tegemiseks kuluv aeg on (1.6) põhjal $t = \theta/\omega = 2\pi/\omega$. Siit saab leida nurkkiiruse ja joonkiiruse vahelise seose

$$v = \frac{s}{t} = \frac{2\pi r}{2\pi/\omega} = \omega r. \quad (1.16)$$

Pöörleva keha eri punktide joonkiirused on erinevad, kuid kõigi punktide nurkkiirused on ühesugused. Ratta välispinna punktide joonkiirus on kõige suurem, telje joonkiirus võrdub alati nulliga.

Töö ehk kulutatud energia W

Lineaarse liikumise korral on töö määratletud kui jõu integraal üle liikumistee. Valemi kujul

$$W = \int F ds, \quad (1.17)$$

kusjuures eeldatakse, et jõud on kollineaarne (samasuunaline) liikumise suunaga. Erijuhtumil, kui liikumissuunaga kollineaarselt on rakendatud konstantne jõud, saame töö valemi kujul

$$W = Fs . \quad (1.18)$$

Töö ja energia mõõtühik SI-süsteemis on džaul (J).

Pöörleva liikumise korral on töö momendi integraal üle läbitud pöördenurga ning töö valem on

$$W = \int Td\theta \quad (1.19)$$

ning konstantse momendi korral

$$W = T\theta . \quad (1.20)$$

Võimsus P

Võimsus on töö tegemise määr ehk ajaühikus tehtav töö. Võimsuse valem on

$$P = dW/dt . \quad (1.21)$$

Võimsust mõõdetakse harilikult džaulides sekundi kohta (J/s) ehk vattides (W), aga võib kasutada ka hobujõude (HJ). Teisendamiseks kehtivad seosed $1 \text{ J/s} = 1 \text{ W}$ ja $1 \text{ HJ} = 735,5 \text{ W}$.

Rakendades seda määratlust ja eeldades, et jõud on konstantne ja liikumissuunaga kollineaarne, saame

$$P = dW/dt = d(Fs)/dt = F(ds/dt) = Fv . \quad (1.22)$$

Samal viisil, kui eeldame, et moment on konstantne, saame võimsuse pöörleva liikumise korral:

$$P = dW/dt = d(T\theta)/dt = T(d\theta/dt) = T\omega . \quad (1.23)$$

Saadud valem $P = T\omega$ on elektrimasinate uurimisel väga tähtis, kuna selle abil saame leida mehaanilise võimsuse mootori või generaatori võllil. Selles valemis on ühikuteks vatt (W), njuutonmeeter (Nm) ja radiaan sekundi kohta (rad/s), teistsuguste ühikute kasutamisel tuleb valemisse lisada tegurid ühikute teisendamiseks.

Ülesanne 1.3

Elektrikäia abrasiivketas on kinnitatud otse elektrimootori võllile. Mootori pöörlemiskiirus n on 2850 p/min ja kasutegur $\eta_M = 0,85$. Abrasiivketta diameeter on $D = 15 \text{ cm}$ ja käiamisel mõjub ketta puutuja suunas takistusjõud $F = 40 \text{ N}$. Leida mootori poolt elektrivõrgust võetav võimsus.

Lahendus

1. Jõu õlg r on pool abrasiivketta läbimõõtu:

$$r = D/2 = 15/2 = 7,5 \text{ cm} = 0,075 \text{ m} .$$

2. Takistusmoment T on

$$T = F \cdot r = 40 \cdot 0,075 = 3 \text{ Nm} .$$

3. Mootori nurkkiirus ω on

$$\omega = n \cdot 2\pi/60 = 2850 \cdot 2\pi/60 = 298,5 \text{ rad/s} .$$

4. Mootori mehaaniline võimsus P_{meh} on

$$P_{\text{meh}} = T \cdot \omega = 3 \cdot 298,5 = 895,4 \text{ W} .$$

5. Võrgust võetav võimsus on

$$P_{\text{el}} = P_{\text{meh}}/\eta_{\text{M}} = 895,4/0,85 = 1053 \text{ W} .$$

Kontrollküsimused

1. Millised mõõtühikud on kasutusel elektrimasina rootori pöördenuurga mõõtmiseks?
2. Milliste mõõtühikutega iseloomustatakse elektrimasinate pöörlemiskiirust ja nurkkiirust?
3. Mille kaudu on määratud elektrimasina pöördemoment ja mida pöördemoment iseloomustab?
4. Miks on pikema sabaga mutrivõtme abil mutrit lahti keerata kergem?
5. Millise kuju võtab Newtoni teine seadus pöörleva liikumise korral?
6. Kuidas leida pöörleva keha mingi punkti joonkiirust?
7. Kuidas määratakse tööd pöörleval liikumisel?
8. Kuidas määratakse võimsust pöörleval liikumisel?

1.4 Väljad ja ruum. Püsimagnet ja elektromagnet

Energia ülekanne elektrimasinatest ja trafodes toimub alati läbi õhus olevate magnetväljade. Õhupülvast magnetväljast saadav võimsus paneb elektrimootori võlli pöörlema ja magnetväli viib energiavoo ehk võimsuse ühest trafomähisest teise. Magnetväljade tundmine on oluline.

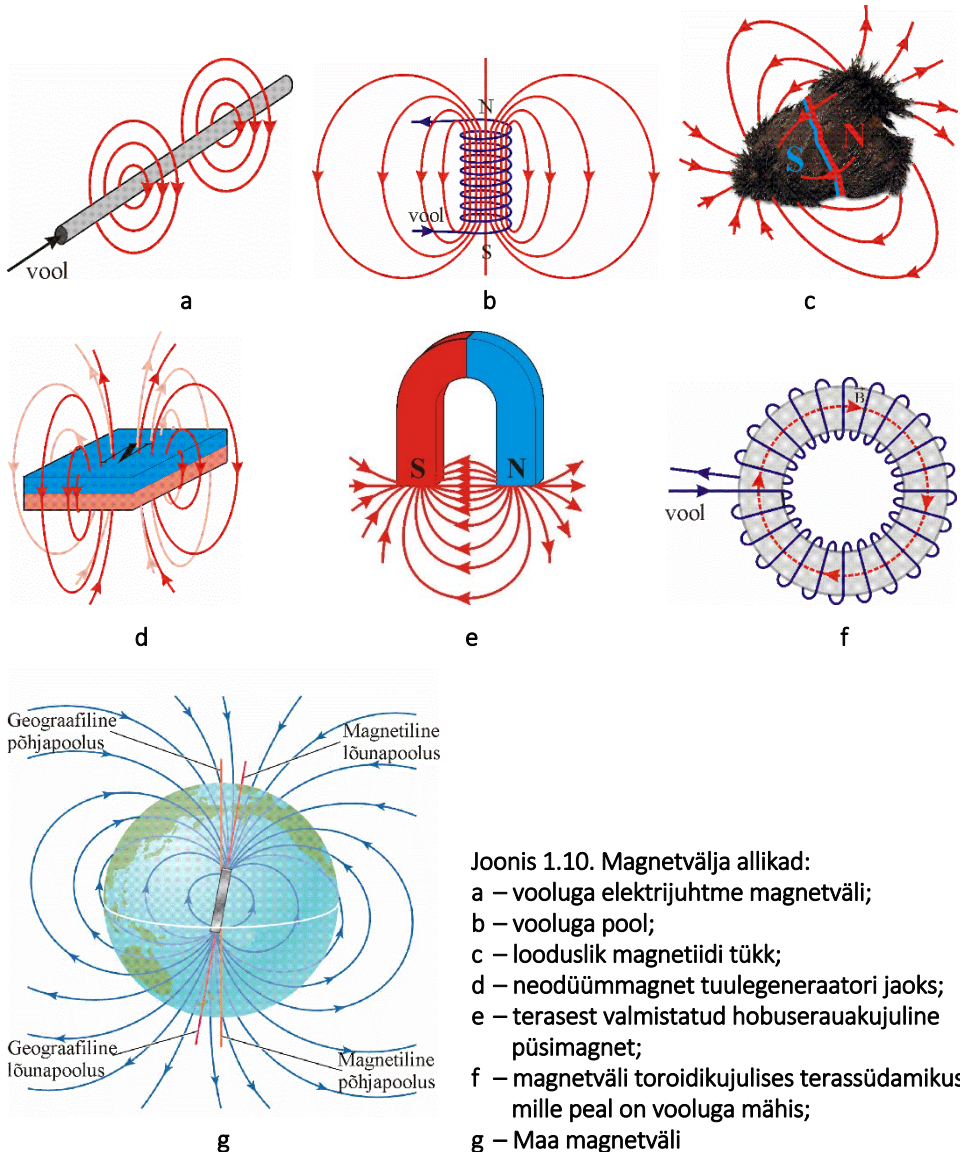
Magnetväli on valguse üks komponent. Valgus kujutab endast tühjuses ja ka õhus ülikiirelt liikuvat elektromagnetvälja. Elektromagnetväli kujutab endast energiavoogu. Päikesepaneel maja katusel muudab päikesevalguse energiavoo elektrivõimsuseks. Elektromagnetväljal on kaks komponenti. Lisaks magnetväljale on ka elektriväli. Elektriväli ja magnetväli võivad ruumis ka paigal püsida. Siis nimetatakse neid staatilisteks väljadeks.

Selleks, et ruumi mingis osas tekitada elektrivälja või magnetvälja, on vaja viia sinna energiat. See juurdeviidav energia muutub siis elektrivälja energiaks või magnetvälja energiaks. Erinevalt valgusest tungib magnetväli suuremal või vähemal määral läbi kõikide materjalide. Staatilise magnetvälja allikatena kasutatakse tavaliselt kas püsimagneteid või elektromagneteid, kuid on olemas ka looduslikud magnetvälja allikad. Iga vooluga juhtme ümber on samuti magnetväli.

Kreeka pärimuse järgi avastas magnetismi üks Lääne-Türgi mägedes hulkunud karjus. Ta jalad jäid äkki maa külge kinni, sest ta oli astunud magnetiidi paljandile,

mis tõmbas sandaalinaelu ligi. Legendi toimumispaik on magnetiidirikas piirkond Magneesia linna lähedal ning sealt on saanud ka nime see salapärane ja kasulik jõud, mis teatud metallidele (raud, koobalt, nikkel) omasena suudab neid metalle ligi tõmmata või eemale tõugata.

Magnetväli tekib alati iga vooluga juhtme ümber (joonis 1.10,a). Magnetväli ei ole nähtav. Joonistel kasutatakse magnetvälja suuna ja tugevuse iseloomustamiseks **jõujooni**. Mida tihedamalt on jõujooned, seda tugevam on väli. Kahe magnetvälja vahel tekib mehaaniline jõud. Jõujoonte suunad iseloomustavad tekkiva jõu suunda. Voolu magnetvälja tugevdamiseks võib juhtmest kerida pooli (joonis 1.10,b).



Joonis 1.10. Magnetvälja allikad:
a – vooluga elektrijuhtme magnetväli;
b – vooluga pool;
c – looduslik magnetiidi tükk;
d – neodüümmagnet tuulegeneraatori jaoks;
e – terasest valmistatud hobuserauakujuline püsिमagnet;
f – magnetväli toroidikujulises terassüdamik, mille peal on vooluga mähis;
g – Maa magnetväli

Magnetvälja saab ka mitmesuguste püsिमagnetite abil (joonis 1.10,c,d,e), kus vooluga juhtmeid ei kasutata. Püsिमagnetil on kaks **poolust**. Jõujooned väljuvad põhjapooluselt, mille tähis on **N**. Jõujooned sisenevad lõunapoolusesse, mille tähis on **S**. Püsिमagnetil magnetväli on tingitud selle materjali aatomite ühesuunalisest orientatsioonist ruumis. Ümber aatomituuma tiirlevad elektronid kujutavad endast elektrivoolu, millel on ka magnetväli. Ühes suunas orienteeritud aatomid annavad ühes suunas orienteeritud magnetväljad. Nende tiirlevate elektronide magnetväljade summa avaldub püsिमagnetil magnetvälja kujul.

Magnetväljal eristatakse kahte osa. Need on **H-väli** ja **B-väli**. *H*-välja nimetatakse ka lihtsalt magnetväljaks. See väli on elektrivoolu „nähtamatu osa“ juhtme lähedases ruumis. *H*-väli tekitab ruumis midagi mehaanilise surve või elektripingega sarnast. Selle tulemusena tekib ruumis **magnetvoog**. Magnetvoo ühikuks on veeber (Wb). Magnetvoogu võib võrrelda veevoolu või elektrivooluga, kuid magnetvoo osakesi ei ole õnnestunud tuvastada. Magnetvoo tiheduse välja nimetatakse *B*-väljaks ja selle mõõtühikuks on Wb/m². Magnetvoo tihedust nimetatakse ka **magnetiliseks induktsooniks**, mille mõõtühikuks on tesla (T); 1 T = 1 Wb/m². Kaks erinevat nimetust ühele ja samale füüsikalisele objektile on tingitud sellest, et ettekujutus tühja ruumi ehk vaakumi olemusest on füüsikateaduse arenedes muutunud. Mõiste magnetvoo tihedus on kooskõlas tänapäevase arusaamaga tühjast ruumist.

B-väli tekib *H*-välja mõjul ja on sellega samasuunaline. Kuid *B*-välja tugevus sõltub ka keskkonna omadustest.

$$B = \mu H ,$$

kus *B* – magnetvoo tihedus, Wb/m²;

μ – keskkonna magnetiline läbitavus, H/m;

H – magnetvälja tugevus, A/m.

Raual ja teistel **ferromagneetikutel** on keskkonna magnetiline läbitavus *μ* mitusada või mõnituhat korda suurem kui õhul ja vaakumil. Sellepärast kasutataksegi *B*-välja tugevdamiseks rauda.

Ferromagneetikute suur magnetiline läbitavus on tingitud nende sisemisest ehitusest, mida käsitleme allpool põhjalikumalt.

Joonisel 1.10,f on näidatud vooluga pooli sees olev terasest südamik, mis on rõngakujuline (toroid). Pooli magnetväli avaldab südamiku aatomite magnetväljadele mehaanilist jõudu. Selle tulemusena orienteeruvad raua aatomid ruumis ühesuunaliselt ja aine aatomite magnetväli liitub pooli magnetväljaga. Saadakse tugevam summaarne väli. Väli suureneb sadu või isegi tuhandeid kordi. Rõngakujulise südamiku magnetvälja jõujooned sulguvad südamiku sees.

Kui joonisel 1.10,b näidatud silindrilisse pooli paigutada silindriline terassüdamik, siis toimub samuti magnetvälja tugevnemine, kuid magnetvälja jõujooned hakkavad sellise südamiku otstest (poolustest) väljuma õhku. Tekib kaks magnetpoolust nagu püsिमagnetil. Väljapilt õhus on ligikaudu sama, mis ilma südamikuta poolil,

kuid väli on oluliselt tugevam. Terassüdamikuga pooli, kus terassüdamiku magnetväli läheb õhku, nimetatakse **elektromagnetiks**.

Kui südamikuga poolis vool katkestada, siis muutub soojusliikumise tõttu raua aatomite orientatsioon ruumis kaootiliseks ja summaarne väli muutub väikeseks. Pooli voolu sisse ja välja lülitades saame sisse ja välja lülitada vajaliku tugevusega magnetvälja. Nii töötab elektromagnet.

Joonisel 1.10,g on näidatud Maa magnetväli. Geograafilise põhjapooluse lähedal maa sees asub magnetiline lõunapoolus. Kompassis kasutatava väikese püsimagneti põhjapooluse ots näitab alati suunda, kus asub Maa magnetiline lõunapoolus (see on põhjapooluse lähedal). Kahel magnetil tõmbuvad alati erinimelised poolused ja sellepärast kompass töötabki.

Teatud koostisega terassüdamike magnetväli ei kaogi pärast voolu väljalülitamist poolis. Sellised südamikud muutuvad pärast vooluga magneetimist **püsimagnetiteks**. Püsimagnetite materjalide eripäraks on see, et soojusliikumine ei suuda aatomite orientatsiooni ruumis oluliselt muuta ja südamiku magnetväli jääb püsima ka siis, kui seda ümbritsevas poolis vool kaob.

Magnetväljaga hõivatud ruumi võib paigutada suvalisi esemeid samamoodi nagu ilma magnetväljata ruumi. Erandiks on ferromagnetilised ained. Ferromagnetilistest ainetest kehade paigutamisel magnetvälja tekib juurde lisatud ferromagneetiku sees veel teine väli, mis ulatub sellest kehast ka väljapoole. Nende kahe välja vahel tekib mehaaniline jõud. Juurde lisatud keha hakatakse tõmbama magnetvälja allika poole. Tekkivate jõudude ja ka muude magnetvälja nähtuste uurimiseks on vaja osata magnetvälju kirjeldada.

Väljade matemaatiline kirjeldamine

Magnetvälja ja ka teiste väljade kirjeldamiseks on vaja näidata iga ruumipunkti jaoks välja tugevus ja suund. Ilma suunata suuruste, näiteks temperatuuri, kirjeldamiseks on vaja näidata ainult välja tugevus. Toome lihtsa näite.

Olgu meil vaja uurida toa välisseina temperatuuri. Me võime kontaktermomeetriga mõõta seinapunktide temperatuuri ja kanda saadud mõõtetulemused paberile joonistatud seinaplaanile. Ilmselt on sein lae all soojem kui põranda lähedal ja aknaklaas on hoopis jahe. Me saame ülevaate, kuidas on temperatuur seinal jagunenud. Sellist temperatuuri kirjeldust nimetatakse kahedimensiooniliseks temperatuuriväljaks (2D-väli). Dimensioonideks on siin sein laius ja kõrgus.

Kui meid huvitab õhu temperatuur toa kõikides ruumipunktides ja me selle ära mõõdame, saame kolmedimensioonilise temperatuurivälja (3D-väli). Temperatuuril ei ole suunda. Ilma suunata väljasid nimetatakse **skalaarväljadeks**.

Kui toas on uks ja aken lahti ja väljas on tuul, siis tekib tuuletõmbus. Me võime ära mõõta õhu liikumiskiiruse igas ruumipunktis. Nii saame õhu liikumiskiiruse kolmedimensioonilise välja. Siin on oluline, mis suunas õhk liigub. Kiirus on suunaga suurus ehk vektorsuurus. Seega saame õhu liikumise kohta **3D-vektorvälja**. Elektrimasinatest olevad magnetväljad on samuti 3D-vektorväljad. Paremaks arusaamiseks

muutuvast magnetväljast võime endale ette kujutada, et see on sarnane tuulega, mille suund ja tugevus ruumis muutuvad.

Eeltoodust järeldub, et välja all mõeldakse üldiselt mingi füüsikalise nähtuse (näiteks temperatuuri) jaotuse kirjeldust ruumis. Selles suhtes on väli geomeetiline ja matemaatiline mõiste. Kuid välja kasutatakse ka füüsikalises mõistes, kui räägitakse magnetväljast või elektriväljast. Näiteks magnetiliselt indutseeritud jõu välja mõõdetakse teslades (mõõtühiku tähis T). Öeldakse näiteks, et magnetiline induksioon on 0,5 T või 1 T.

Määratluse järgi on 1 T niisugune magnetiline induksioon, milles selle välja suunaga risti paiknevale juhtmele mõjub pikkuse 1 m kohta jõud 1 N, kui juhet läbib elektrivool, mille tugevus on 1 A.

Siit järeldub, et magnetvälja defineeritakse mehaanilise jõu kaudu, mida saab mõõta. Ja magnetväli ise on mingi füüsikaline nähtus, mis eksisteerib realselt, kuid mõõdetav on ainult kaudselt.

Magnetväli võib ühes ruumpunktis olla 0,5 T, mingis teises aga 0,6 T. Kui me tahame anda magnetvälja jaotusele ruumis nime, siis peaks see olema magnetvälja väli. Nii aga ei ole tavaks öelda. Tavalises kõnepruugis tähistab termin magnetväli kahte erinevat asja – esiteks füüsikalist nähtust ja teiseks selle nähtuse jaotust ruumis. Selline tava on kahetsusväärne (terminid peaksid olema ühemõttelised), kuid sellega tuleb arvestada.

Elektrotehnikas vaadeldakse magnetvälja matemaatilise vektorväljana. Selline käsitlus võimaldab nii elektrimasinaid projekteerida kui ka elektrimasinates toimuvaid protsesse uurida. Huvi pakub siiski ka magnetvälja füüsikaline külg.

Magnetvälja füüsikaline olemus

Millest magnetväli koosneb? Ilmselt on kaks komponenti – ruum ja sinna viidud energia. Energiast oleme eespool juba rääkinud. Tühja ruumi ehk vaakumi suhtes jõudsid füüsikud 20. sajandi lõpuks uutele seisukohtadele (*Brian Greene. The Fabric of the Cosmos: Space, Time, and Texture of Reality. Publisher Alfred A. Knopf, 2004*).

Tühja ruumi ei käsitleta enam absoluutse tühjusena nagu varem. Tühi ruum koosneb üliväikestest osakestest, mida nimetatakse **superstringideks** ja **praanideks** (*branes*). Need osakesed on aatomituumast 10^{14} korda väiksemad. Aatomituum on superstringidest umbes sama palju suurem kui maakera on tolmusterast suurem. Tühjal ruumil on ka kaal, mis on küll ülimalt väike. Kuna universumis on tühja ruumi võrreldes ainega tohutult palju rohkem, siis kaalub tühi ruum kokku siiski rohkem kui aine kokku.

Superstringid on niidisarnased. Neil on ainult üks mõõde. See on pikkus. Läbi mõõtu neil ei ole. Superstringide otsad kleepuvad praanide külge ja nii moodustub midagi kolmemõõtmelise võrgu taolist. Need superstringid on universaalsed maailma ehituskivid. Need väikesed niidikeseid võivad võnkuda erineval viisil nagu pillikeeled. Superstringidele energia andmisel nende võnkumine muutub ja selle

tõttu võib nende kogum muutuda elektroniks või kvarkiks või mõneks muuks elementaariosakeseks, millel on mass ja energia. Superstringid on seega ka energiasalvestid. Superstringide võnkumine võib muutuda ka selliseks, et makrotasandil tuvastame me tühja ruumi ehk vaakumi. Teatud viisil energiat lisades võime saada ka ruumi koos seal oleva magnetväljaga.

Põhimõtteliselt võib vaakumist ja energiast moodustada kõik aineosakesed ja kogu nähtava maailma. Superstringid on nii väikesed, et tänapäeval ei suudeta nende olemasolu veel otseselt kontrollida. Seda üritatakse teha kaudselt. Ruum, mida me seni oleme pidanud tühjuseks, koosneb lõplike mõõtmetega elementidest.

Superstringide teooria valguses saab kirjeldada ka magnetvälja teket vooluga juhett ümbritsevas tühjas ruumis.

Voolu magnetväli voolu suurenedes kasvab. Voolu kasvukiirus elektri ahelas on määratud valemiga

$$di/dt = U/L . \quad (1.24)$$

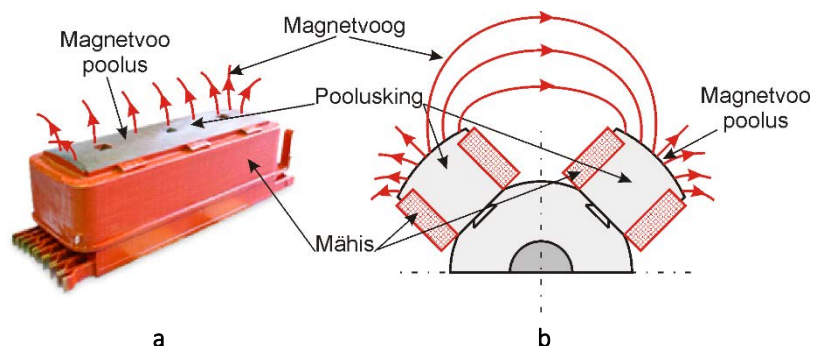
Siin U on ahelale rakendatud pingee see komponent, mis langeb induktiivsusele (on ka pingekomponendid, mis langevad aktiivtakistusele ja mahtuvusele). L on ahela induktiivsus. Induktiivsus iseloomustab elektri ahela paiknemist ruumis. Induktiivsust käsitleme edaspidi põhjalikumalt.

Pingee rakendamine elektri ahelale tekitab ahelas ja ahelat ümbritsevas ruumis elektrivälja. Elektrivälja mõjul hakkavad nii vool kui ka voolu ümbritsev magnetväli kasvama. Elektri ahelasse ja magnetvälja viiakse energiat.

Energia tuleb elektri ahelasse juhtmete kaudu. Osa sellest energiast aga väljub elektri ahela juhtmetest superstringide kaudu ruumi ja salvestub juhett ümbritsevas ruumis. Juhtmelähedase ruumi superstringide võnkumise energia avaldub makrotasandil magnetväljana. Samaaegselt protsessidega elektri ahelas toimub alati ka väljade teke ja muutus elektri ahelat ümbritseva ruumi struktuuris.

1.5 Konstruktiivne magnetpoolus ja voopoolus

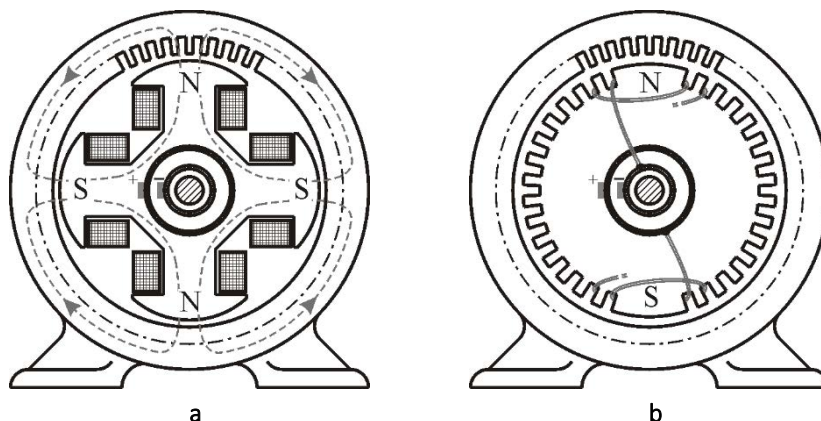
Terminiga poolus tähistatakse elektrimasinate juures kahte erinevat asja. Poolus võib tähendada magnetahela osa koos mähisepooliga. Selline poolus (joonis 1.11,a) on silmale nähtav mehaaniline konstruktsioon, millest väljub nähtamatu magnetvoog. Sellist mehaanilist konstruktsiooni võib nimetada **konstruktiivseks magnetpooluseks**. Kuid poolus võib tähendada ka silmale nähtamatut magnetvoogu koos pinnaga mehaanilisel konstruktsioonil, millest väljub magnetvoog (põhjapooluse korral) või millesse siseneb magnetvoog (lõunapooluse korral). See nähtamatu magnetvoo sisenemise või väljumise koht on magnetvoo poolus ehk **voopoolus**. Voopoolus on konstruktiivse pooluse see pind (pooluskinga pind joonisel 1.11), millest magnetvoog väljub või millesse magnetvoog siseneb. Konstruktiivsed poolused koos oma voopoolusega (joonis 1.11,b) liiguvad üheskoos (näiteks koos sünkroonmasina rootoriga), kuid voopooluse pind jääb sealjuures pooluse konstruktsiooni suhtes paigale.



Joonis 1.11. a – konstruktivne magnetpoolus;
b – kahe konstruktivse magnetpooluse lõige

Konstruktivsed poolused võivad ehituselt olla kas elektromagnetid nagu joonisel 1.11, kus magneti mähisepooli toidetakse alalisvooluga, või **püsimagnetid**. Püsimagnetite eeliseks on see, et nad ei vaja elektrivooluga toitmist, puuduseks aga see, et nende magnetvoog ei ole reguleeritav.

Elektrimasinate elektromagnetpooluseid on kahe erineva konstruktsiooniga. Neid nimetatakse **väljepoolusteks** ja **peitpoolusteks**. Joonistel 1.11 ja 1.12,a näidatud konstruktiivseid pooluseid nimetatakse väljepoolusteks.



Joonis 1.12. Väljepoolused (a) ja peitpoolused (b) sünkroonmasina rootoril

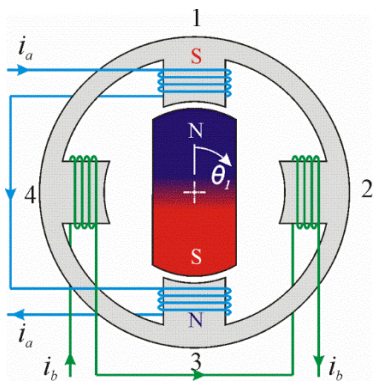
Peitpooluste korral (joonis 1.12,b) on rootori välispinnal masina telje suunalised sooned, mida nimetatakse **uureteks**. Uuretesse paigutatakse teatud korra järgi mähisepoolid. Kuna rootor pöörleb, siis viiakse vool mähisepoolidesse võllil asuvate kontaktrõngaste kaudu. Pöörlevate kontaktrõngaste vastu surutakse liikumatud harjad. Joonisel 1.12,b on osa uuretesse paigutatavast mähisest jäetud näitamata. Rootori pinnal tekib kaks voopoolust (N ja S joonisel 1.12,b). Need voopoolused pöörlevad koos rootoriga.

1.6 Samm-mootorite ehitus ja tööpõhimõte

Püsimagneetrootoriga samm-mootori ristlõige on näidatud joonisel 1.13. Rootor kujutab endast masina teljel asuvat püsimagneetit. Staatori sisepinnale on 90-kraadise sammuga paigutatud neli konstruktiivset magnetpoolust, millel on mähisepoolid. Nende pooluste magnetvoogu saab sisse ja välja lülitada ja ka magnetvoo suunda muuta.

Staatori pooluste 1 ja 3 poolid on lülitatud jadamisi, neid läbiva voolu tähiseks on i_a ja nad moodustavad ühe pooluspaari. Voolu suuna muutmisega saab muuta magnetvoo suunda. Positiivsel voolu suunal (nagu joonisel 1.13) on poolus 1 lõunapoolus ja poolus 3 põhjapoolus. Vastupidisel voolu i_a suunal (negatiivsel) on poolus 1 põhjapoolus ja poolus 3 lõunapoolus. Analoogiliselt on moodustatud ka teine pooluspaar poolustega 2 ja 4, mille mähiste voolu tähiseks on i_b .

Kui vool i_a on sisse lülitatud ja positiivse suunaga ning vool i_b on võrdne nulliga, siis on staatori ja rootori pooluspaaride vahel sellised tõmbejõud, et rootori põhjapoolus on tõmmatud vastu üleval olevat staatori lõunapoolust ja rootori lõunapoolus on tõmmatud vastu all olevat staatori põhjapoolust (nii nagu joonisel 1.13).



Joonis 1.13. Kahepooluselise püsimagneetrootoriga samm-mootori skemaatiline ristlõige

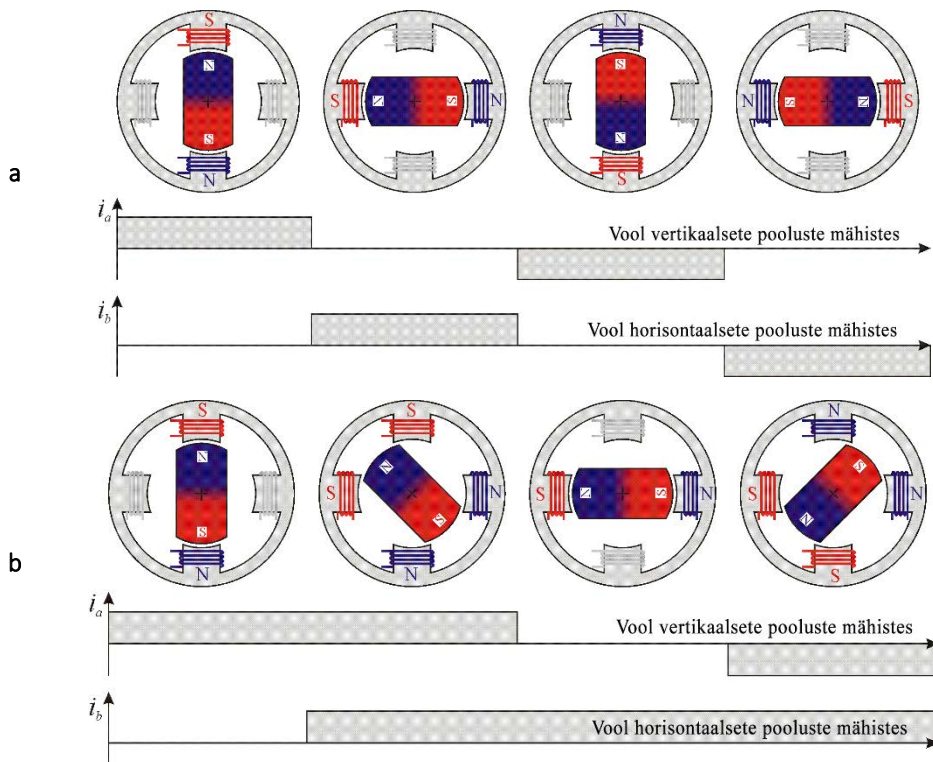
Sellises asendis püsib rootor nii kaua, kuni staatori voolud jäävad samaks. Rootori saab sammude kaupa liikuma panna staatori voolude muutmisega. Seda on näidatud joonisel 1.14. Vaadeldavas mootoris võib see liikumine olla kas sammuga 90° , mida nimetatakse täissammjuhtimiseks, või sammuga 45° , mida nimetatakse poolsammjuhtimiseks. Täissammjuhtimisel antakse vool korruga ainult ühele pooluspaarile ja rootor võtab sellise asendi, et rootori ja staatori erinimelised poolused on üksteise vastas (N ja S on üksteise vastas teine teisel pool õhupilu).

Staatorimähise voolude i_a ja i_b sisse- ja väljalülitamine ja suuna muutmine on näidatud joonisel 1.14. Samas on näidatud staatorimähise voolude muutumisest tingitud voopooluste liikumine staatoril ja sellega kaasnev rootori liikumine.

Joonisel 1.14,a on staatori lõunapoolus algasendis ülal, siis vasakul, siis all ja lõpuks paremal. Kolme sammuga on liikumine 270° vastupäeva. Staatori magnetpooluste asukoha muutmine kutsub esile rootori pöörlemise samas ulatuses ja samas suunas (vastupäeva). Samm-mootor on sünkroonmootori eriliik, kus staatori magnetvälja pöörlemine tekitatakse konstruktiivsete pooluste mähiste voolu muutmise abil. Lülititena kasutatakse pooljuhtlüliteid.

Kui me tahame algasendist järgmist sammu teha mitte vastupäeva, vaid päripäeva, siis peame teisel sammul valima voolule i_b mitte positiivse, vaid negatiivse suuna.

Siis liigub lõunapoolus mitte vasakule vaid paremale. Pöörlemissuunda saab muuta pärast iga suvalist sammu.



Joonis 1.14. Samm-mootori rootori liikumine sammude kaupa vastavalt staatori pooluste ümberlülitustele; a – täissammjuhtimine, b – poolsammjuhtimine

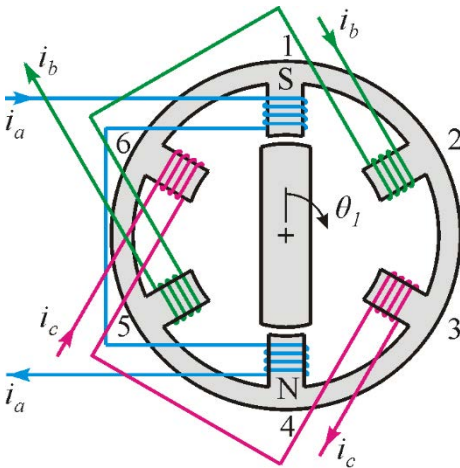
Poolsammjuhtimisel (joonis 1.14,b) jäetakse erinevalt täissammjuhtimisest teisel sammul vool i_a endiseks ja lülitatakse ka vool i_b positiivsel suunal sisse. Siis on meil staatoril kõrvuti kaks lõunapoolust, üks üleval ja teine vasakul. Rotori põhjapoolus pöördub siis 45° ja peatub staatori kahe lõunapooluse vahel. Staatorimähiste voolude muutumine samm-mootori pöörlemisel 45° suuruste sammude kaupa ühe täispöörde ulatuses on toodud tabelis 1.1.

Tabel 1.1 Samm-mootori staatorivoolud rootori liikumisel 45° suuruste sammude kaupa ühe täispöörde ulatuses

| θ_1 | 0° | 45° | 90° | 135° | 180° | 225° | 270° | 315° | 360° |
|------------|-----------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| i_a | + | + | 0 | - | - | - | 0 | + | + |
| i_b | 0 | + | + | + | 0 | - | - | - | 0 |

Kasutatakse ka samm-mootoreid, mille rootor ei kujuta endast mitte püsिमagnetit, vaid on tehtud magnetiliselt pehmest rauast. Selline rootor ei ole silindrikujuline, vaid silindril on kaks vastaskülge ära lõigatud (joonis 1.15). Staatoril on kolm konstruktiivsete pooluste paari (kokku 6 poolust). Igal pooluspaaril on mähised

lülitatud jadamisi. Nende mähiste voolu lülitatakse sisse ja välja, kuid voolu suunda ei muudeta, nii nagu seda tehti püsimagnetrootori korral.



Joonis 1.15. Reluktantsrootoriga samm-mootori skemaatiline ristlõige

Pooluste 1 ja 4 vool i_a on sisse lülitatud, võtab rootor sisse joonisel 1.15 kujutatud asendi. Siis läheb pooluselt 4 lähtuv magnetväli läbi rootori ja kahe õhupilu poolusesse 1. Pooluste 4 ja 1 vahelise magnetahela takistus ehk **reluktants** on rootori sellises asendis kõige väiksem, sest magnetjõujoonte teekond läbi õhu on siis kõige lühem. Õhk on magnetväljale umbes 1000 korda suurem takistus kui raud. Kui joonisel kujutatud rootori asendis anda vool poolustele 2 ja 5, siis pooluselt 5 poolusele 2 kulgevate magnetjõujoonte teekond läbi õhu on palju pikem kui pooluselt 4 poolusele 1 kulgevate jõujoonte teekond. Pooluste 2 ja 5 vahel on siis ka magnetahela reluktants palju suurem kui pooluste 1 ja 4 vahel. Poolustevaheline reluktants sõltub rootori asendist ja sellepärast nimetatakse sellist mootorit **reluktantsmootoriks**. Selle mootori töö põhineb asjaolul, et mootori magnetahelate õhupilu osa takistus magnetvoole sõltub rootori asendist.

Magnetväli arendab magnetahela osadele alati sellist mehaanilist jõudu, mis püüab jõujoonte teekonna pikkust vähendada. Kui läbi õhu kulgevate jõujoonte teekond lüheneb, siis magnetahela magnetiline takistus ehk reluktants väheneb. Kui reluktantsamm-mootori rootor on alguses joonisel 1.15 kujutatud asendis ja me lülitame pooluste 1 ja 4 magnetvoo välja ning seejärel pooluste 2 ja 5 magnetvoo sisse (lülitame sisse voolu i_b), siis esialgu on vahemaa pooluse 5 ja rootori alumise otsa ning pooluse 2 ja rootori ülemise otsa vahel suhteliselt suur. Neid vahemaid läbib magnetvoog ja see magnetvoog tekitab sellised mehaanilised jõud, mis püüavad rootori otste ja vooga pooluste 2 ja 5 vahekaugust vähendada. Need jõud pööravad rootorit seni päripäeva, kuni rootori otste ja pooluste 2 ja 5 vahekaugus muutub minimaalseks. Sellega pöörduv rootor ühe 60° suuruse sammu võrra päripäeva. Kui me oleksime andnud voolu mitte poolustele 2 ja 5, vaid poolustele 6 ja 3, siis oleks rootor pöördunud ühe sammu võrra vastupäeva.

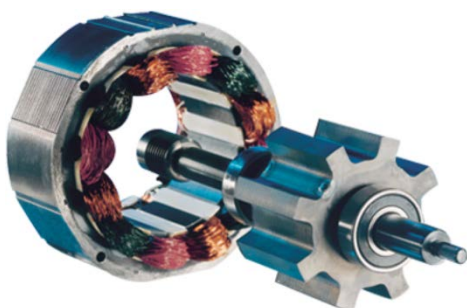
Kui kahes pooluspaaris tekitada magnetvoog üheaegselt, siis peatub rootor kahe magnetvooga pooluse vahel. Näiteks kui voolud i_a ja i_b on üheaegselt sisse lülitatud, siis peatub rootor pooluste 1 ja 2 vahel. Rotor liigub siis poolusest 1 edasi 30° suuruse sammu ehk poolsammu võrra.

Staatorimähiste voolude muutumine reluktantsamm-mootori pöörlemisel 30° suuruste sammude kaupa ühe poolpöörde ulatuses on toodud tabelis 1.2.

Tabel 1.2 Reluktantssamm-mootori staatorivoolud rootori liikumisel 30° suuruste sammude kaupa ühe poolpöörde ulatuses

| θ_1 | 0° | 30° | 60° | 90° | 120° | 150° | 180° |
|------------|----|-----|-----|-----|------|------|------|
| i_a | + | + | 0 | 0 | 0 | + | + |
| i_b | 0 | + | + | + | 0 | 0 | 0 |
| i_c | 0 | 0 | 0 | + | + | + | 0 |

Üks variant nelja pooluspaariga reluktantssamm-mootori staatorist ja rootorist on näidatud joonisel 1.16.



Joonis 1.16. Reluktantssamm-mootori staator ja rootor

Samm-mootoreid ehitatakse sammuga 90° kuni 0,72°. Väikestel sammudel on palju pooluseid ja ühel võllil võib olla ka mitu pooluste süsteemi. Sammude arv on piirides 100...10 000 sammu sekundis. Kui sammude arv ületab antud mootoritüübi jaoks lubatud piiri, siis tekib nn sammu kaotus. See tähendab, et vastav vooluimpulss mähisesse küll antakse, kuid see jääb nii lühiajaliseks, et selle aja jooksul ei jõua rootor ettenähtud sammu sooritada.

Püsimagnetrootoriga samm-mootorite samm on tavaliselt kuni 5°. Need mootorid on suurema inertsiga kui reluktantssamm-mootorid, kuid neil on pidurdus- ja hoidemoment, kui mootor on vooluta. Kui aga reluktantssamm-mootori vool nulli viia, siis läheb ta vabajooksutalitlusse.

Reluktantssamm-mootorid on eelistatud väiksematel sammudel ja suurematel kiirustel.

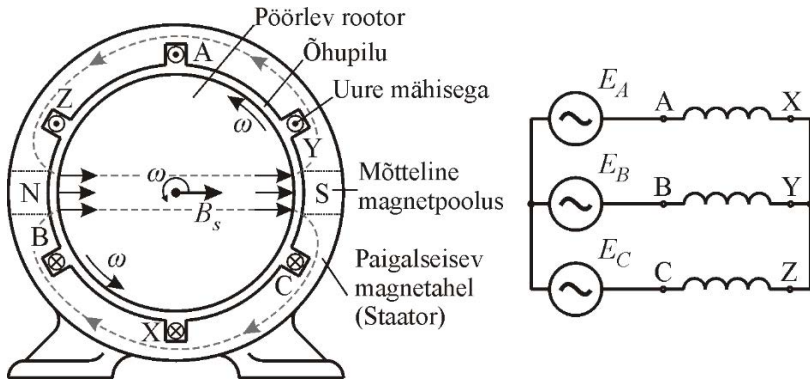
Paljupooluselised samm-mootorid on suhteliselt madala kasuteguriga ja tavaliselt kasutatakse neid väikestel võimsustel automaatikasüsteemides. Nende tööd on lihtne arvutiga juhtida ja kontrollida.

Väikese pooluspaaride arvuga reluktantsmootoreid kasutatakse ka keskmise võimsusega reguleeritavates ajamites, kus nad asendavad sagedusmuunduriga asünkroonmootorit.

1.7 Liikuvad magnetvoo poolused paigalseisvas magnetahelas

Selleks et samm-mootorit pöörlema panna, peame tema staatoril asuvate pooluste mähiste voolusid niiviisi muutma, et voopooluste asukoht hakkaks mööda staatori ümbermõõtu edasi liikuma. Teiste sõnadega – voopoolused hakkavad sammhaaval pöörlema, kuid konstruktiivsed poolused jäävad seejuures paigale. Selleks peab samm-mootoris olema elektrooniline kommutaator, mis mähiste voolu sisse ja välja lülitab.

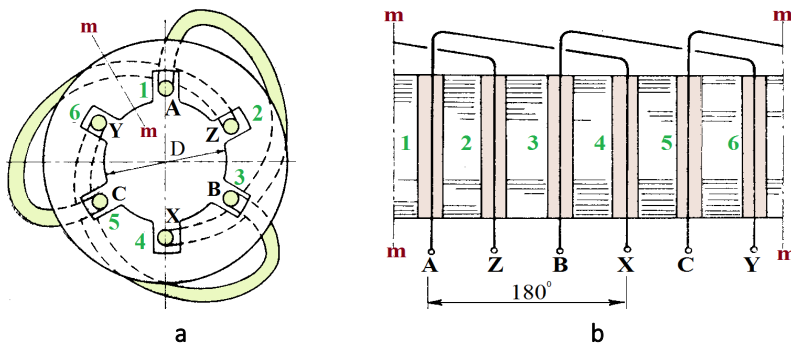
Pöörlevaid voopooluseid on võimalik saada ka ilma kommutaatorita, kui kasutada kolmefaasilist vahelduvvoolu ja kolmefaasilist mähist, mis on kindla korra järgi paigutatud staatori sisepinnal olevatesse uuretesse (joonis 1.17). Voopoolused liiguvad siis paigalseisvas magnetahelas. Uuretes olevate poolide **voolu suuruse ja suuna muutmine muudab voopooluste asukohta staatori sisepinnal piki ümbermõõtu**.



Joonis 1.17. Vahelduvvoolumasina staatori ristlõige ja toiteskeem; magnetvälja suund vastab ajahetkele, kui vool on maksimaalne faasis A

Mähise kolme faasi voolude hetkväärtuste muutumise tõttu tekib staatori sisepinnal selline summaarne magnetväli, mille poolused pöörlevad (joonisel 1.17 on näidatud pooluste asend ajahetkel, kui voolu hetkväärtus on maksimaalne faasis A).

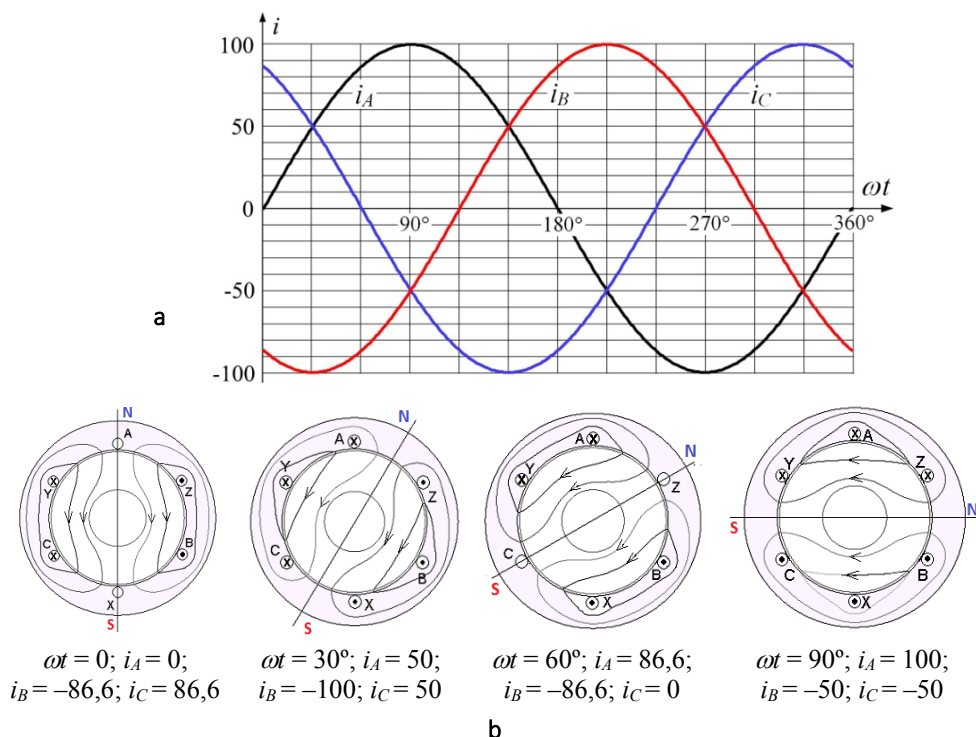
Pöörlev magnetväli saadakse kolme mähise abil. Neile mähistele antakse toitepinge kolmefaasilise vahelduvpingesüsteemi eri faasidest (joonis 1.17). Iga mähis koosneb kahest osast, mis paiknevad kahes erinevas uures. A-faasist toidetav mähis asub näiteks uures 1 ja 4 (joonis 1.18). Erinevates uures paiknevate mähiseosade vahelist ühendust nimetatakse **laupühenduseks**. Mähiste paigutusest saame parema ülevaate jooniselt 1.18,b, kus on kujutatud tasapinnaga m-m mõtteliselt läbi lõigatud ja sirgestatud staatorit.



Joonis 1.18. a – ühest uuredest teise uuresse siirduvate mähiste laupühendused ruumis; b – samad laupühendused koos mähistega mõtteliselt läbilõigatud ja sirgestatud staatoril

Mähiste algused on tähistatud tähtedega A, B ja C ning nendele rakendatakse toitepinge. Mähiste lõpud, mis on tähistatud vastavalt tähtedega X, Y ja Z, on kokku ühendatud (vt ka joonis 1.17). Uurded järgnevad piki übermõõtu järjekorras A-Z-B-X-C-Y, nii et algused ja lõpud vahelduvad. Ainult selline järjestus tagab pöörleva magnetvälja. Selline on kõige lihtsam kolmefaasiline mähis. Igas faasis on ainult üks mähisepool ja igal poolil on üksainus keerd. Elektrimasinatest on tavaliselt rohkem uurdeid, igas faasis on rohkem kui üks pool ja igas poolis on ka mitu keerd. Kuid ka kõige lihtsam kolmefaasiline mähis tekitab pöörleva elektrivälja niisamuti kui keerukamad mähised.

Kui mähisepooli (näiteks A-X) läbib vool, siis tekitab see vool magnetvälja, mille suund on risti pooli tasapinnaga. Kui kõiki kolme pooli läbib vool, siis tekib kolm erineva suunaga magnetvälja. Kuna poolid on ruumis paigutatud üksteise suhtes 120 kraadi võrra nihutatult, siis on ka magnetväljade suunad üksteise suhtes 120 kraadi võrra nihutatud. Kolme voolu kolme välja liitumisel tekib üks summaarne väli. Seda on näidatud joonisel 1.19.



Joonis 1.19. Kolmefaasilise voolusüsteemi voolude hetkväärtuste suuruse ja suuna muutumine ajas (a) ning sellele vastav voolude suuna muutumine staatorimähises ja voolude summaarse magnetvälja suuna muutus nelja ajahetke jaoks (b)

Ajahetkel $t = 0$ on vool faasis A võrdne nulliga, faasi B vool on negatiivne ja suuruselt võrdne faasi C vooluga, mis on aga positiivne (joonis 1.19,a). Need voolu suunad on kantud ka staatori ristlõikele, kus punkt juhtmekeeru lõikes tähistab

voolu suunda vaataja poole ja rist joonise tasapinna poole (joonis 1.19,b). Sealjuures antakse positiivse suunaga vool sisse mähise algusest ja negatiivse suunaga vool mähise lõpust. Seega C-mähise esimese poole vool läheb joonise tasapinna poole ja selle mähise teise poole vool väljub joonise tasapinnast mähise lõpu Z poole. Kuna B-mähise vool on negatiivne, siis siseneb B-mähise vool selle mähise lõpust Y ja väljub algusest B. Valitud mähisepoolide paigutuse tõttu tekib olukord, kus ajahetkel $t = 0$ on joonisel näidatud kahes vasakpoolses uurdes vool joonise tasapinna poole ja kahes parempoolses uurdes joonise tasapinnalt välja. Joonisel on näidatud nende vooluga juhtmete ümber tekkivad magnetvälja jõujooned. Jõujooned väljuvad staatori sisepinnast joonise ülaosas ja järelikult on seal voo põhjapoolus N. Needsamad jõujooned sisenevad staatori sisepinda joonise allosas ja seal asub voopoolus S. Antud kolmefaasiline mähis tekitab ühe pooluspaari.

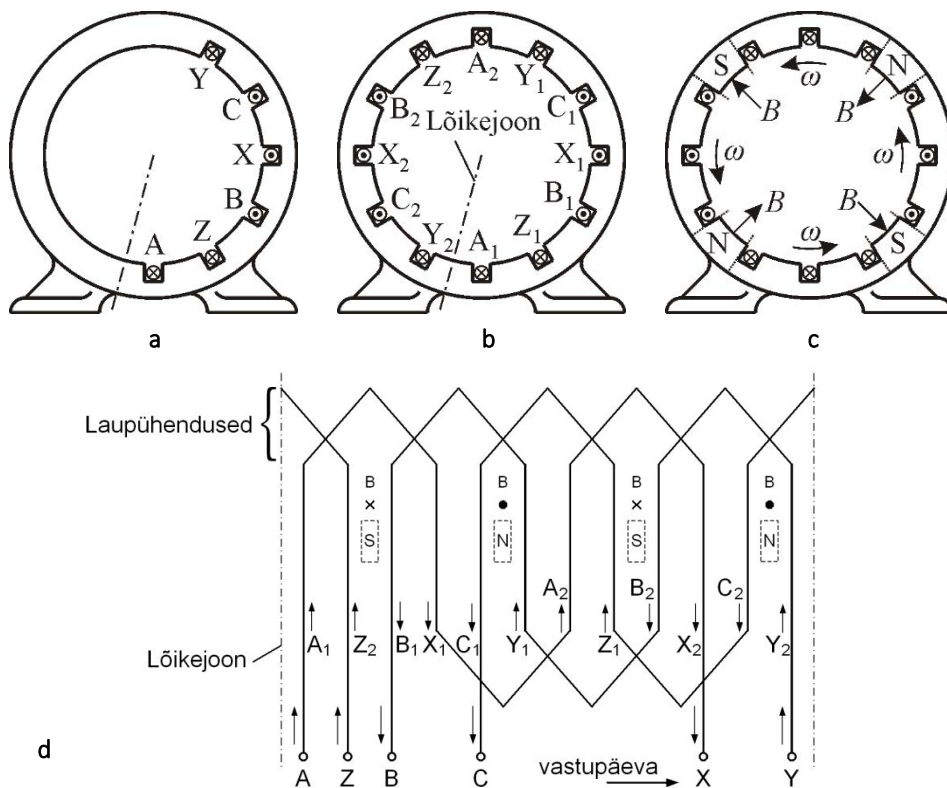
Ajahetkeks $t = 30^\circ$ on kolmefaasilise voolusüsteemi voolud saanud järgmised uued väärtused (joonis 1.19,a): A-faasi on tekkinud plussvool, mis on pool amplituudväärtusest, B-faasi miinusvool on kasvanud amplituudväärtuseni ja C-faasi plussvool on kahanenud pooleni amplituudväärtusest. Voolud sisenevad nüüd uretesse C, Y ja A ning väljuvad uretest Z, B ja X. Selle tulemusena on voolude summaarse magnetvoo telg nihkunud ruumis päripäeva 30° ulatuses, kui võrrelda ajahetkega $t = 0$.

Ajahetkeks $t = 60^\circ$ on kolmefaasilise voolusüsteemi voolud saanud jälle uued väärtused ja nende voolude summaarse magnetvoo telg on ajahetkega $t = 0$ võrreldes nihkunud 60° . Niisama palju, kui kasvab elektrilistes kraadides mõõdetud aeg, kasvab ka magnetvoo suuna muutuse nurk kraadides. Kui on möödunud üks vahelduvvoolu täisperiood, siis on magnetvoo suuna muutus 360° ehk üks täispööre. Järelikult on **välja pöörlemiskiirus võrdeline vahelduvvoolu sagedusega**. Kui sagedus on 50 Hz, pöörleb magnetväli kiirusega 50 p/s ehk 3000 p/min.

Kui uurida kolme faasi poolide summaarse magnetvoo muutumist ajas detailsemalt, siis ilmneb, et resulteeruv magnetvoo tihedus on konstantne suurus, olles 1,5 korda suurem ühe pooli poolt tekitatud vootihedusest juhul, kui selles on maksimumne vool (amplituud). Paigalseisvas staatoris tekitab eelkirjeldatud kolmefaasiline mähis kaks voopoolust, mis pööreldes muudavad pidevalt oma asukohta staatori rauas ja ulatuvad ka õhupilusse. Selline on üks meetod rauas rändavate voopooluste tekitamiseks.

Välja pöörlemiskiirus määrab sünkroonmasinate pöörlemiskiiruse, nagu me järgmistes osades näeme. Pöörlemiskiirus 3000 p/min on tihti liiga suur. Pöörlemiskiiruse kahekordseks vähendamiseks kasutatakse järgmist võtet. Kolmefaasilist staatorimähiste komplekti ei jaotata mitte kogu staatori ümbermõõdule (s.o mitte 360° peale), vaid poolele staatori ümbermõõdule (s.o 180° peale), nagu on näidatud joonisel 1.20,a. Sellise mähiste paigutuse korral liigub magnetväli vahelduvvoolu ühe perioodi jooksul edasi ainult 180° võrra ja välja liikumiskiirus on seega kaks korda väiksem. Selle tõttu on ka masina pöörlemiskiirus kaks korda väiksem. Kiiruse langemisega väheneb aga võimsus. Et seda ei juhtuks, pannakse staatorile veel teine kolmefaasiline komplekt mähisepoole (joonis 1.20,b), mis tõstab pöörde-

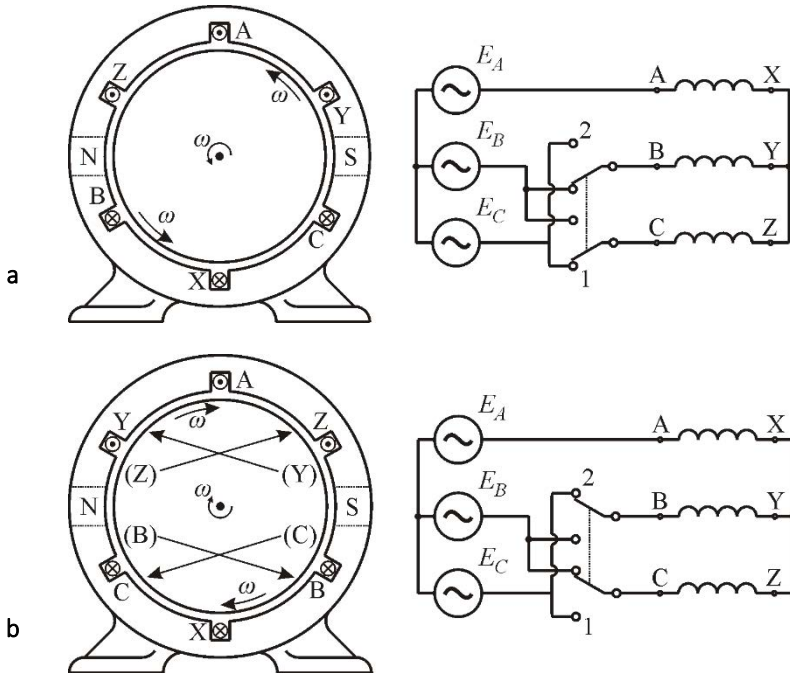
momenti kaks korda. Selle tulemusena jääb võimsus samaks, pöörlemiskiirus on kaks korda väiksem ja pöördemoment kaks korda suurem (võrreldes joonisel 1.17 näidatud juhtumiga).



Joonis 1.20. Magnetvälja pöörlemiskiiruse kahekordne aeglustamine kolme faasilise poolikomplekti paigutamise abil ainult poolele staatorile (a); teise kolme faasilise poolikomplekti lisamine pöördemomendi kahekordseks tõstmiseks (b); kahe poolikomplektiga moodustatud neli mõttelist liikuvat poolust (c); neljapooluselise masina staatorimähise tasapinnale laotud skeem (d)

Kahe kolme faasilise mähisepoolide komplekti paigutamisel staatorile tekib neli pöörlevat magnetpoolust (joonis 1.20,c), mille järjestus on N–S–N–S. Ühe ja sama faasi poolid, mis asuvad erinevates poolikomplektides, ühendatakse tavaliselt jadamisi (A1–X1–A2–X2), nagu on näidatud tasapinnale laotud mähiste skeemil joonisel 1.20,d. See skeem on saadud staatori läbi lõikamise poolikülgede A1 ja Y2 vahelt. Väljapoole uuret jäävate laupühenduste kaudu läheb vool ühest uurdest teise. Staatorile paigutatud kolme faasilisi poolikomplekte võib olla ka rohkem kui kaks, siis langeb välja pöörlemiskiirus veelgi.

Staatorivälja pöörlemissuuna muutmiseks tuleb kolmest toitefaasi juhtmest kaks lüliti abil ümber vahetada, nagu on näidatud joonisel 1.21.



Joonis 1. 21. Vastupäeva pöörlemissuuna (a) asendamine päripäeva pöörlemissuunaga (b) kahe toitefaasi ümberlülitamise teel

Kui ümberlülititi on asendis 1, on toiteelektromotoorjõud E_B ühendatud masina B-faasi mähise algusega ja toiteelektromotoorjõud E_C masina C-faasi mähise algusega (joonis 1.21,a). Väli pöörleb siis vastupäeva. Kui viime ümberlülititi asendisse 2, ühendatakse toiteelektromotoorjõud E_B mähisega, mis oli algselt C-faasi mähis (esialgne faas on joonisele märgitud sulgudes). Sisuliselt vahetavad B- ja C-faasi mähised staatoril kohad. Endised C ja Z on nüüd B ja Y ning endised B ja Y on nüüd C ja Z. Kuna väli pöörleb staatoril suunas A–Z–B–X–C–Y–A (nagu eespool nägime), siis saame joonisel 1.21,b seda teed pidi liikudes päripäevase pöörlemissuuna, mis on esialgses võrreldes vastupidine.

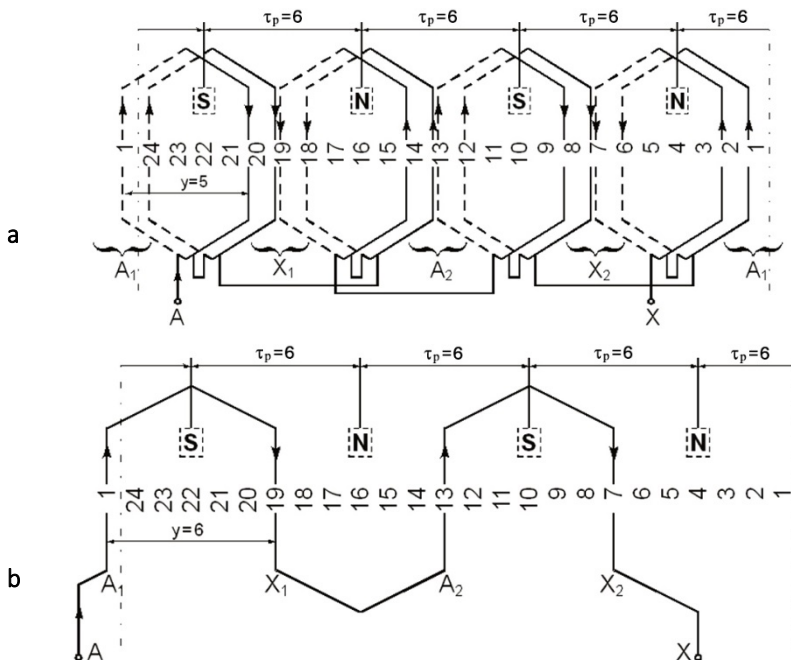
1.8 Sünkroonmasina konstruktsioon ja tööpõhimõte

Sünkroonmasina staatoril on kolmefaasiline vahelduvvoolumähis, mis tekitab staatori sisepinnalt õhupilusse ulatava pöörleva magnetvälja. See magnetväli koosneb kas ühest või mitmest voopooluste paarist.

Joonisel 1.22 on näidatud üks kahe pooluspaariga (ehk nelja poolusega) sünkroonmasina konstruktsioon. Rotoril on neli konstruktiivset poolust. Need poolused on joonisel näidatud ilma mähisteta. Selline rotor koos mähiste ja nende mähiste poolt tekitatud magnetväljadega on näidatud joonisel 1.12,a. Põhjapoolustest väljuv magnetväli läheb läbi õhupilu staatorisse ja tuleb staatorist läbi õhupilu rootorisse tagasi lõunapooluse kohal.

pooliga mähist nimetatakse **jaotatud mähiseks**. Joonisel 1.22,b kujutatud masina staatoril tuleb iga pooluse kohta $24/4 = 6$ uuret (masinal on neli poolust). Pöörvälja saamiseks peab iga pooluse välja moodustamiseks kasutama kõigi kolme faasi voolu (nagu eelnevalt on näidatud). Seega tuleb antud juhul ühe pooluse ühe faasi kohta $6/3 = 2$ uuret. Joonisel 1.22,b on näidatud ainult ühe faasi mähis. Iga pooluse üks faas on siin moodustatud kahepoolilisest pooligrupist. Kahekihilisel mähisel on uurete ja poolide arv võrdne – igal poolil on kaks külge ja igas uures on ka kaks poolikülge. Poolide ja uurete arvu suurendamine võimaldab vähendada uurete sügavust ja katta staatori kogu sisepinna uuretega, mis on soodne kadude ning masina kaalu ja mõõtmete vähendamise seisukohalt.

Suure uurete arvu tõttu on mähise poolide paigutamine ja ühendamine suhteliselt keerukas. Selle hõlbustamiseks kasutatakse mähise skeeme, mis kujutavad endast staatori sisepinda mähistega. Seejuures on staator mõtteliselt läbi lõigatud ja tasapinnale laotatud. Joonisel 1.23,a on toodud joonisel 1.22 näidatud staatori ühe faasi mähise skeem, kus staator on läbi lõigatud esimese ja 24nda uurde vahelt. Urdeid ei ole välja joonistatud, kuid on ära toodud uurete numbrid. Alumised pooliküljed on skeemil näidatud kriipsjoontega. Joonisel 1.23 on kõik neli A-faasi pooligruppi ühendatud jadamisi. Põhimõtteliselt on võimalik ka rööp- ja segaühendus.



Joonis 1.23. Neljapooluselise masina A-faasi mähis: a – kahekihiline jaotatud mähis; b – lihtsaim (jaotamata) ühekihiline mähis

Poolide ühendusskeemi (joonis 1.23,a) koostamisel tuleb jälgida, et poolikülgede voolude suunad oleksid samasugused kui lihtsaimal mähisel, mille paigutus 24 uurdega staatorile on näidatud joonisel 1.23,b. Ühe faasi mähis hõivab seal 4 uuret

ja kolme faasi mähis 12 uuret. 12 uuret jääb tühjaks, sest mähist ei jaotata (praktiliselt ei ole sellisel variandil muidugi mõtet, kuid see aitab selgitada mähise jaotamist). Kui me võrdleme joonisel 1.23 toodud jaotatud ja jaotamata mähist, siis jaotamata mähise neljale pooliküljele A_1 , X_1 , A_2 ja X_2 vastab jaotatud mähisel neli nn **faasitsooni** A_1 , X_1 , A_2 ja X_2 . Näiteks faasitsooniks X_1 on uures 18, 19 ja 20 olevad mähisepoolide küljed ja see faasitsoon on ekvivalentne jaotamata mähise 19ndas uures oleva ühe pooliküljega. Jaotatud mähise kolmes uures on neli poolikülge. Kõigis nendes poolikülgedes on vool samasuunaline jaotamata mähise ühe poolikülje vooluga. Voolude samasuunalisus tagatakse mähisepoolide alguste ja lõppude vaheliste ühenduste sobiva valikuga. Jaotatud mähise voolud tekitavad rootori sisepinnal samasuguse magnetpooluste jaotuse kui jaotamata mähise voolud.

Magnetpooluste vahekaugust piki staatori sisepinda nimetatakse **poolusejaotuseks** ja selle tähis on τ_p . Poolusejaotust mõõdetakse nii meetrites kui ka uurete arvus. Poolusejaotus pikkusühikutes on

$$\tau_p = \frac{\pi D}{2p}, \quad (1.25)$$

kus D – staatori siseläbimõõt;
 p – pooluspaaride arv.

Poolusejaotus uurete arvu kaudu on

$$\tau_p = \frac{Z}{2p}, \quad (1.26)$$

kus Z on uurete arv. Joonisel 1.23 on $\tau_p = 6$ uuret.

Staatorimähist iseloomustab ka uurete arv q pooluse ja faasi kohta:

$$q = \frac{\tau_p}{m} = \frac{Z}{2pm}, \quad (1.27)$$

kus m on toitefaaside arv (tavaliselt $m = 3$, kuid esineb ka $m = 2$).

Joonisel 1.23 toodud mähisel on $q = 2$, kuid ühe faasitsooni mähis on paigutatud kolme uuresse. Kui me vaatame faasitsooni X_1 , siis uures 18 on üks poolikülge, uures 19 kaks poolikülge ja uures 20 jälle üks poolikülge. Kui staatorile on paigutatud juba kõigi kolme faasi mähised, siis on 18ndasse uuresse A-faasi poolikülje peale paigutatud faasitsooni C_1 poolikülge ja 20ndasse uuresse A-faasi poolikülje alla faasitsooni B_1 poolikülge. Seega on uures 18 ja 20 kahe naabertsooni pooliküljed, kuid uures 19 kuuluvad mõlemad pooliküljed ühele ja samale faasitsoonile (vt ka mähiste paigutust joonisel 1.18,b).

Ühe pooli kahe külje vahelist kaugust nimetatakse **mähisesammuks** y ja seda saab samuti mõõta nii pikkusühikutes kui ka uurete arvuga. Joonisel 1.23,b toodud lihtsaimal mähisel on mähisesamm y võrdne poolusejaotusega τ_p . Sellist sammu nimetatakse **täissammuks**. Jaotatud mähiste puhul võib mähisesamm vähesel määral poolusejaotusest erineda. Tavaliselt tehakse mähisesamm veidi lühem kui poolusejaotus. Joonisel 1.23,a on poolusejaotus $\tau_p = 6$, kuid mähisesamm $y = 5$.

Sellist sammu nimetatakse **lühendatud mähisesammuks**. Kasutatakse ka mõistet **suhteline mähisesamm** β :

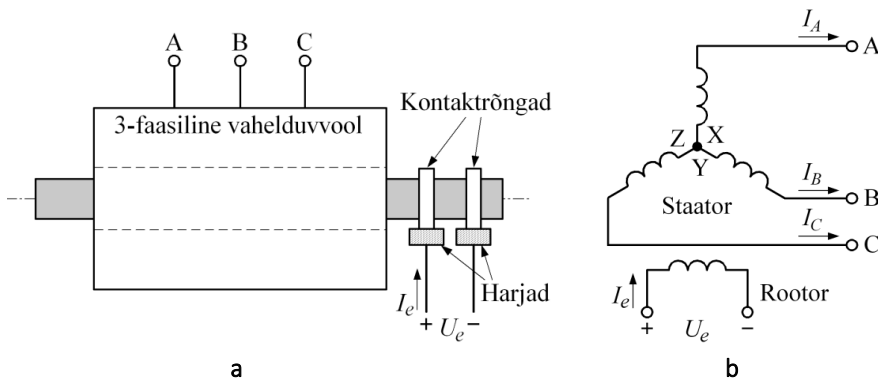
$$\beta = \frac{y}{\tau_p}. \quad (1.28)$$

Suhteline mähisesamm on mähisesammu ja poolusejaotuse suhe. Joonisel 1.23,a toodud mähise suhteline mähisesamm on $\beta = 5/6 = 0,833$.

Sünkroonmootori tööpõhimõte

Staatorile paigutatud kõigi kolme faasi mähised ühendatakse tähte. Masin töötab mootorina, kui mähistele rakendatakse kolmefaasiline toitepinge (joonis 1.24,b).

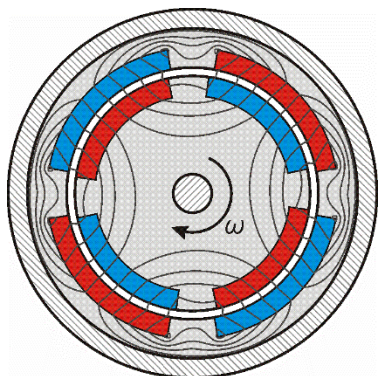
Sünkroonmasina rootoril olevate pooluste mähist nimetatakse **ergutusmähiseks**. Pöörleval rootoril olevat mähist toidetakse kahe koos võlliga pöörleva **kontakt-rõnga** ja nende rõngastega kontaktis olevate liikumatute **harjade** kaudu (joonis 1.24,a). Kasutatakse ka keerukamat harjadeta ergutusmähise toidet, kus ergutusvool saadakse rootori võllil asuva väikese vahelduvvoolugeneraatori voolu alaldamise teel.



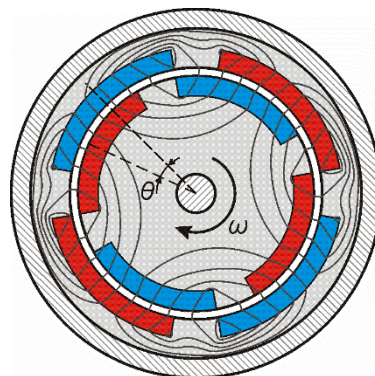
Joonis 1.24. Ergutusvoolu juhtimine sünkroonmasinas (a) ning staatori- ja rootorimähise skeem (b)

Kui nii staatorimähises kui ka ergutusmähises on vool, siis tekitavad mõlemad voolud oma magnetvälja, mis liituvad. Väljade liitumisel tekivad jõud, mis toimivad niiviisi, et iga staatoril tekkiva põhjapooluse (sinine) vastu tõmmatakse üks rootori lõunapoolus ja iga staatoril tekkiva lõunapooluse (punane) vastu tõmmatakse üks rootori põhjapoolus, nagu on näidatud joonisel 1.25.

Joonisel 1.25 on näha, et masinas tekib neli suletud magnetjõujoonte kontuuri. Iga sellise magnetjõujoonte kontuuri koguvool moodustatakse nii staatorimähise kui ka ergutusmähise vooludest. Sealjuures on kõikide selle kontuuriga haaratud juhtmete voolud igal ajamomendil samasuunalised. Rotori põhjapooluselt väljuv magnetväli läheb läbi õhupilu staatori lõunapoolusesse, hargneb kaheks ja läheb mõlemat haru pidi mööda staatori magnetahelat kuni staatori põhjapoolusteni ja sealt edasi läbi õhupilu rootori lõunapoolustesse. Rotoris magnetjõujoonte kontuurid sulguvad.



Joonis 1.25. Kahe pooluspaariga sünkroonmasina staatori ja rootori pooluste vastastikune asend tühijooksul



Joonis 1.26. Rotori pooluste nihkumine staatori pooluste suhtes koormusmomendi mõjul

Kui staatori magnetväli hakkab pöörlema (näiteks hakatakse sagedusmuunduri abil sagedust nullsagedusest alates tõstma), siis hakkab ka rootor pöörlema. Põhja- ja lõunapooluste vaheliste tõmbejõudude tõttu „kleepuvad“ rootori konstruktiivsed poolused staatori voopooluste külge ja hakkavad liikuma koos voopoolustega. Rotor hakkab pöörlema sünkroonselt staatori magnetväljaga.

Kui masina võlliga on ühendatud mingi töomasin, mis tekitab koormusmomendi, siis rootori poolused veidi nihkuvad staatori pooluste suhtes, kuid rootori pöörlemine sünkroonselt staatoriväljaga jätkub. Sellist olukorda kujutab joonis 1.26.

Kui koormusmomenti suurendada, siis pooluste vaheline nihe suureneb. Vastavat nihkenurka nimetatakse **koormusnurgaks**.

Kui sünkroonmasina võlliga ühendada diiselmootor või auruturbiin, mis püüab sünkroonmasinat panna pöörlema kiiremini, kui pöörleb staatoriväli, siis läheb sünkroonmasin generaatoritalitluse ja hakkab arendama takistumomenti. Sealjuures nihkuvad rootori poolused staatori pooluste suhtes mootoritalitlusega võrreldes vastupidises suunas, kuid sünkroonmasin ei lase ennast võrgu sagedusega määratud staatoriväljast kiiremini pöörlema panna. Ka generaatoritalitluses pöörleb sünkroonmasin võrguga sünkroonselt. Generaatoritalitluses hakkab sünkroonmasin elektrivõrku voolu andma.

Kui me eespool kirjeldatud tavalises väljepoolustega sünkroonmootoris (joonis 1.12,a) lülitame ergutusvoolu välja, nii et rootoris enam magnetvälja ei teki, siis jääb see sünkroonmootor tööle reluktantsmootorina. Rotor jääb pöörlema sünkroonselt kolmefaasilise mähise poolt tekitatud magnetväljaga ja mootor suudab arendada ka teatud momenti. See moment on küll väiksem sellest momendist, mida mootor suudab arendada ergutatud rootori korral. Peitpoolustega sünkroonmootorit (joonis 1.12,b) aga ei ole võimalik ilma ergutusvooluta kasutada. Põhjus on selles, et peitpoolustega rootori õhupilu magnetiline takistus ehk reluktants ei sõltu rootori nurkasendist. See reluktants on konstantne, sest masina staatori ja rootori vaheline õhupilu onogu ümbermõõdu ulatuses ühesugune.

1.9 Alalisvooluahela põhimõisted

1.9.1 Elektriliste protsesside interpreteerimine mehaaniliste vastetega

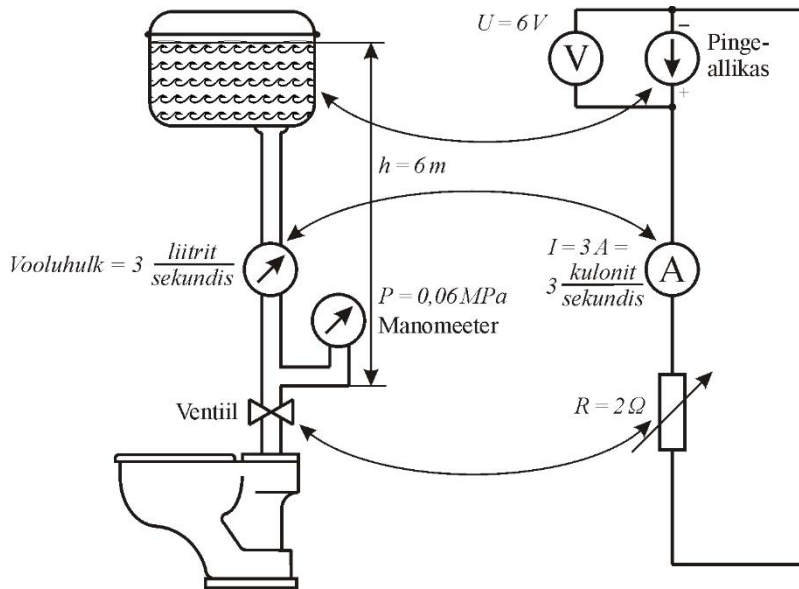
Inimene on võimeline elektrivoolu tajuma ainult siis, kui see läbib tema keha. See on üldiselt ebameeldiv. Vool 0,1 A on inimesele surmav, kui see ei ole just väga lühiajaline. Voolu, pinget ja takistust, aga ka magnetvälja ja elektrivälja, saab üldiselt kindlaks teha ainult vastavate mõõteriistadega. Et elektriga seotud mõistetest paremini aru saada, võib kasutada piltlikke mehaanilisi vasteid. Joonisel 1.27 on tõlgendatud Ohmi seadust, mis matemaatiliselt avaldub järgmiselt:

$$I = U/R, \quad (1.29)$$

kus I – vool amprites, A;

U – pinget voltides, V;

R – takistus oomides, Ω .



Joonis 1.27. Elektrilisi suurusi piltlikult iseloomustavad mehaanilised vasted

Siin on pinget võrreldud veesurvega, elektrivoolu veevooluga ja elektri ahelas olevat muudetavat takistust ventiiliga (veekraaniga), mida saab kas rohkem või vähem lahti keerata.

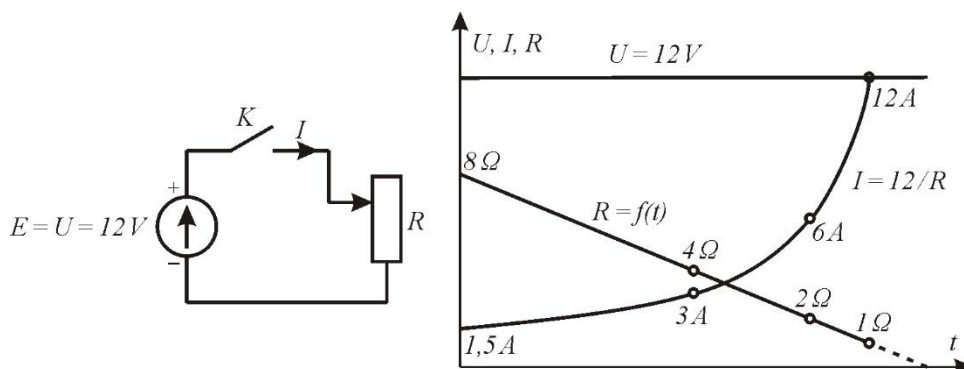
Vett voolab torust välja seda rohkem, mida suurem on surve ja mida rohkem lahti keeratud on kraan ehk mida väiksem on väljavoolu takistus. Siin on sarnasus elektri ahelaga: elektri ahelas on voolutugevus seda suurem, mida suurem on pinget ja mida väiksem on takistus.

1.9.2 Ideaalne ja reaalne pingevallikas

Matemaatilisel on Ohmi seadus väga lihtne, kuid kasulik on üksikasjalikult mõista selle seaduse avaldumist tavaliselt kasutatavates elektri ahelates (st tüüpilisi protsesse neis ahelates).

Vaatleme alalisvooluahelat, mis koosneb pingevallikast $U = 12\text{ V}$, tarbijast R (reguleeritav takisti), ühendusjuhtmetest ja lüliti K (joonis 1.28). Lüliti sulgemisel saame suletud vooluahela, milles tekkiva voolu suurus on määratud Ohmi seadusega. Joonisel on näidatud ahela voolu muutumine, kui me reguleerime takistit R piirides $8 \dots 1\ \Omega$. Vool kasvab $1,5$ amprist kuni 12 amprini. Sealjuures pingevallika pinget voolust ei sõltu ja jääb võrdseks 12 voldiga. Sellist pingevallika nimetatakse **ideaalseks pingevallikaks**. Kui me vähendaksime takistuse R nullini, peaksime valemi (1.18) järgi saama lõpmata suure voolu.

Tegelikult lõpmata suuri voolusid ei esine. Sellel on kaks põhjust. Esiteks ei suuda me ahela takistust viia päris nulliks. Ka ühendusjuhtmetel on takistus. Näiteks on meetripikkuse $1,5\text{ mm}^2$ ristlõikega vaskjuhtme takistus umbes $0,0115\ \Omega$. Teiseks, **reaalsete pingevallikate** pinget hakkab vooluga koormamisel langema. Üldiselt on pingevallika sees voolu juhtivad osad ja neil on takistus. Kuid pinget langeb ka muudel põhjustel.



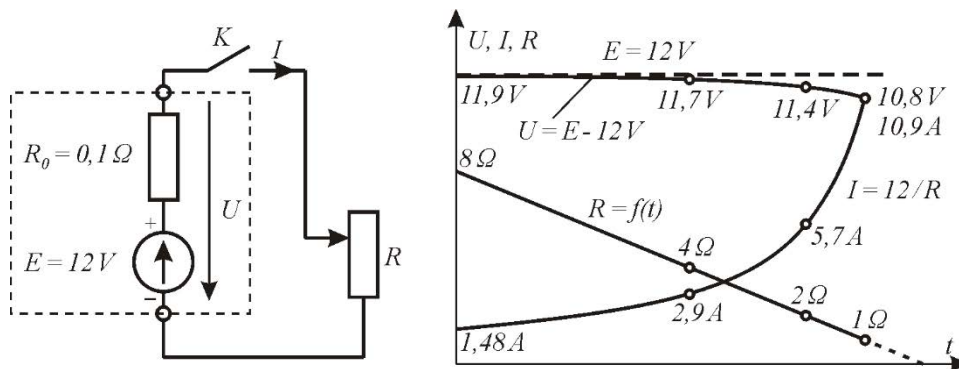
Joonis 1.28. Ideaalse pingevallika koormamine

Pingevallika sisemise pingelangu arvesse võtmiseks loetakse, et koormamisel tekkiva pinget vähenemine on täies ulatuses tingitud mingist hüpoteetilisest takistusest R_0 , mida nimetatakse **sisetakistuseks**. Samuti loetakse, et sisetakistusega on jadamisi ideaalne pingevallikas. Selle ideaalse pingevallika pinget nimetatakse ka **elektromotoorjõuks** (emj), mille tähis on E .

Reaalse pingevallika aseseem on näidatud joonisel 1.29 kriipsjoonega eraldatud osas. Aseseemi moodustavad sisetakistus R_0 ja emj allikas E . Reaalse pingevallika klemmpinge on

$$U = E - IR_0. \quad (1.30)$$

Joonisel 1.29 on näidatud ka reaalse allika pinge muutumine, kui selle sisetakistus R_0 on $0,1 \Omega$. Kui me siin vaadeldaval juhul viime takisti R takistuse nulli, on tekkiva voolu suurus $I = E/R_0 = 12/0,1 = 120 \text{ A}$. See vastab ligikaudu akule. Taskulambipatarei lühistamisel saadakse ainult mõne ampri suurune vool, sest patarei sisetakistus on suurem.



Joonis 1.29. Reaalse pingeallika koormamine

Vaadeldavas ahelas toimuvad ka energia muundamise protsessid. Kui vool läbib takistit R , siis see takisti soojeneb. Toimub elektrienergia muundamine soojusenergiaks. Ajaühiku (näiteks sekundi) kohta tulevat energia kogust nimetatakse **võimsuseks**

$$P = W/t, \quad (1.34)$$

kus P – võimsus vattides, W;
 W – töö ehk energia džaulides, J;
 t – aeg sekundites, s.

Takistis ehk **resistoris** eralduva **soojusvõimsuse** P saab leida Joule-Lenzi seaduse põhjal:

$$P = RI^2. \quad (1.35)$$

Ohmi seadust kasutades saame takisti soojusvõimsuse avaldada veel kahel kujul:

$$P = UI \quad (1.36)$$

ja

$$P = U^2/R. \quad (1.37)$$

Soojusvõimsuse saamiseks vajalik elektrivõimsus saadakse pingeallikast, täpsemalt pingeallika sees olevast elektromotoorjõu allikast. Selle elektrivõimsuse avaldis on analoogiline avaldisega (1.22):

$$P = EI. \quad (1.38)$$

Pingeallika sisetakistusel eralduv soojusvõimsus I^2R_0 on kasutu ja seda nimetatakse allika **kaovõimsuseks**.

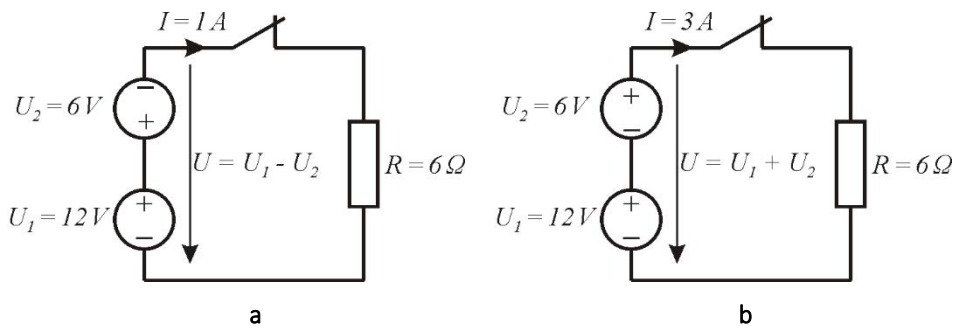
Joonisel 1.29 kujutatud elektri ahela talitus on tüüpiline enamikule elektri kasutamise juhtudest. Seda talitlust võib iseloomustada alljärgnevalt.

- Ahela takistus muutub mingi välise teguri tõttu ja tihti ettearvamatult. Üldjuhul pinge ja vool takistuse suurst ei muuda.
- Pinge valitakse harilikult kas elektriohutuse või mõne muu kriteeriumi põhjal. Toitepinge suurus ei sõltu palju voolust ega takistusest.
- Vool on kõige sagedamini muutuv parameeter, mis sõltub nii takistusest kui ka pingest. Voolu teatud piirides hoidmisega võib sageli olla probleeme.

Küllaltki märkimisväärsel hulgal esineb ka eeltoodust erinevaid talitlusi (pidevalt reguleeritavad pingevallikad, püsivooluallikad jm).

1.9.3 Pingeallika aktiiv- ja passiivtalitus

Joonisel 1.30 kujutatud elektri ahelas on voolu suund väljaspool pingeallikat U_1 olevas ahelas plussklemmilt miinusklemmidele ja selle pingeallika sees miinusklemmilt plussklemmidele. Selline voolu suund vastab positiivsete laengute liikumise suunale. Formaalselt loetakse, et laengukandjad kannavad positiivset laengut. Asjaolu, et elektronid on teadaolevalt negatiivse laengu kandjad, ignoreeritakse ajaloolistel põhjustel.



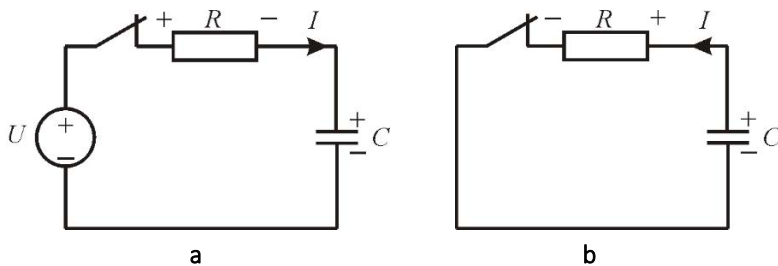
Joonis 1.30. Pingeallika U_2 passiivtalitus (a) ja aktiivtalitus (b)

Kui voolu suund pingeallika sees on miinusklemmilt plussklemmidele, siis on see pingeallikas **aktiivtalitluses**. **Aktiivtalitus tähendab seda, et pingeallikast võetakse energiat ja antakse välisahelasse.**

Pingeallikas võib olla ka **passiivtalitluses**. Seda on näidatud joonisel 1.30,a. Skeemis on kaks pingeallikat U_1 ja U_2 , mis on lülitatud jadamisi, kuid pingeallika U_2 pingeline vastupidine pingeallika U_1 pingele. Summaarne pingeline on võrdne nende pingeallikate pingete vahel. Joonisel näidatud konkreetsel juhtumil on summaarne pingeline $U = U_1 - U_2 = 12 - 6 = 6$ V ja summaarse pingeline polaarsus vastab U_1 polaarsusele. Summaarse pingeline polaarsus määrab tekkiva voolu suuna. Vool läbib allikat U_1 miinusklemmilt plussklemmidele ja see vastab aktiivtalitlusele. Allikat U_2 läbib vool aga plussklemmilt miinusklemmidele. Samuti on voolu suund plussilt miinusele takistis R . Nii pingeallikale U_2 kui ka takistile R antakse energiat. Takistile antav

energia muutub soojuseks. Kui pingeallikaks U_2 on aku, siis toimub energia salvestamine sellesse akusse ehk aku laadimine. **Allikas U_2 võtab välisahelast energiat ja on passiivtalitluses.** Takisti on sõltumata voolu suunast alati passiivtalitluses. Takistit loetakse **passiivelemendiks**. Kui muuta pingeallika U_2 polaarsus vastupidiseks (joonis 1.30,b), on mõlemad pingeallikad aktiivtalitluses ja summaarne pinge on võrdne pingeallikate U_1 ja U_2 pingete summaga.

Kondensaator on samuti energiat salvestav element nagu aku. Laadimisel võtab kondensaator energiat välisahelast ja on passiivtalitluses (joonis 1.31,a).



Joonis 1.31. Kondensaatori laadimine on passiivtalitus (a), kondensaatori tühjendamine on aktiivtalitus (b)

Kondensaatori tühjenemisel on ta aktiivtalitluses (joonis 1.31,b). Pingeallikast erineb kondensaator selle poolest, et ta ei sisalda „pumpa“, mis lahkuvate laengute asemele uued pumpaks. Seetõttu lõpeb kondensaatori laeng tühjenemisel suhteliselt kiiresti. Akus suunatakse uued laengud klemmidele keemiliste jõudude mõjul, generaatoris elektromagnetiliste jõudude mõjul.

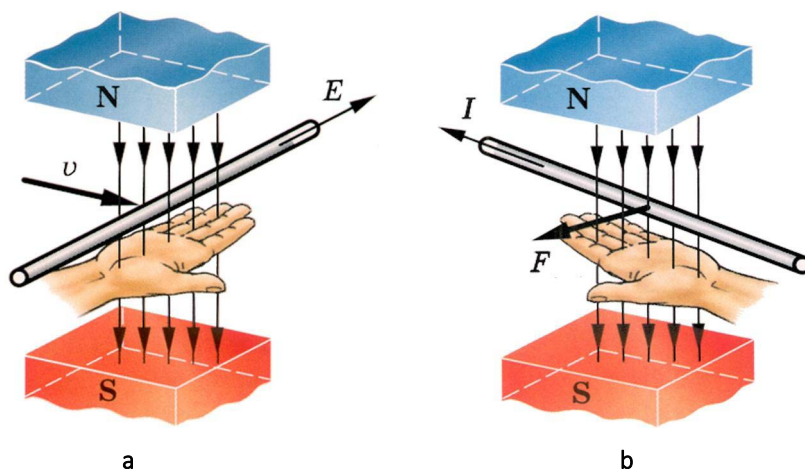
1.10 Elektrimasinas toimuvate protsesside kirjeldus

1.10.1 Elektromotoorjõu ja mehaanilise jõu teke magnetväljas

Elektrimootorit nimetatakse ka jõumasinaks. Jõud tekib magnetvälja vahendusel. Ka pinge elektrigeneraatoris tekib magnetvälja vahendusel. Vaatame neid protsesse lähemalt.

Magnetvoo liikumine ruumis või muutumine ajas tekitab elektrijuhtmes pinge. Juhe muutub pingeallikaks. Teiseks, magnetväljas oleval vooluga juhtmel tekib mehaaniline jõud. **Pinge ja jõu teket nimetatakse magnetvälja põhinähtusteks.** Kuna neid põhinähtusi mõõdetakse mitte H -välja, vaid B -välja kaudu, võiks neid täpsemalt nimetada magnetvoo tiheduse välja põhinähtusteks.

Pinge ja jõu tekkimine on tähtis esiteks selle poolest, et see võimaldab magnetvälja olemasolu kindlaks teha. Teiseks on see tähtis selle poolest, et pinge tekkimist võib kasutada elektrienergia saamiseks generaatorite abil ja jõu tekkimist võib kasutada mehaanilise energia saamiseks elektrimootorite abil. Pinge ja jõu teket on näidatud joonisel 1.32.



Joonis 1.32. Magnetväljas liikuvast juhtmes indutseeritud elektromotoorjõud E (a) ja magnetväljas olevast juhtmes indutseeritud jõud F (b)

Magnetvälja vahendusel tekkivat pinget ja jõudu nimetatakse ka **indutseeritud pingeks** ja **indutseeritud jõuks**. Kui pinget indutseeritakse suletud ahelas, siis tekib ka vool. Avatud ahela puhul voolu ei teki ja pinget on kõige kõrgem. Avatud ahela pinget nimetatakse **elektromotoorjõuks** (lühendatult emj) ja selle tähistamiseks on E .

Indutseeritud pinget ja emj seisukohast ei ole oluline, kas magnetväli liigub paigalseisva juhtme suhtes või vastupidi – juhe liigub paigalseisvas magnetväljas.

Joonisel 1.32,a on näidatud juhtum, kus juhe pikkusega l liigub kiirusega v homogeenses magnetvoo tiheduse väljas B risti jõujoontega. Selles juhtmes indutseeritud elektromotoorjõu väärtuse saab arvutada valemiga

$$E = vBl. \quad (1.39)$$

Indutseeritud elektromotoorjõu suuna saab määrata **parema käe reegli järgi**: kui magnetvoo tiheduse vektor on suunatud parema käe peopesa ja juhe liigub kõrvalesirutatud põidla suunas, näitavad väljasirutatud sõrmed juhtmes indutseeritud elektromotoorjõu suunda.

Üldjuhul, kui kiirusvektor v ja vootiheduse vektor B ei ole omavahel risti ja juhtme suund ruumis ei ühti vektorkorrutise $v \times B$ suunaga nagu joonisel 1.32,a, saab indutseeritud elektromotoorjõu leida järgmiselt:

$$E = (v \times B)l. \quad (1.40)$$

Juhtme pikkuse vektor l on juhtme suunas ja selle otsa poole, millel on vähim nurk vektori $v \times B$ suhtes. Juhtme positiivne ots on see, millest vektor $v \times B$ väljub.

Joonisel 1.32,b on näidatud juhtum, kus liikumatus juhtmes pikkusega l on vool i ja see juhe paikneb magnetväljas B jõujoontega risti. Tekkiva jõu saab leida järgmiselt:

$$F = iBl. \quad (1.41)$$

Indutseeritud jõu suuna saab määrata **vasaku käe reegli järgi: kui magnetvoo tiheduse vektor on suunatud vasaku käe peopessa ja voolu suund juhtmes ühtib väljasirutatud sõrmede suunaga, näitab kõrvalesirutatud põial indutseeritud jõu suunda.**

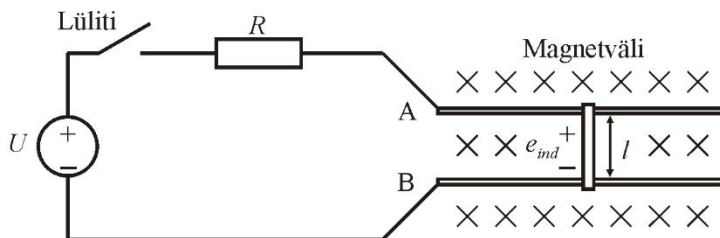
Üldjuhul avaldub indutseeritud jõud kui

$$\mathbf{F} = i(\mathbf{l} \times \mathbf{B}), \quad (1.42)$$

kus juhtme pikkusvektori \mathbf{l} suund ühtib voolu suunaga.

Magnetvälja eelkirjeldatud põhinähtusi kasutatakse kõikides elektrimasinates. Allpool on kirjeldatud **lineaarset alalisvoolumasinat** (*linear DC machine*, lineaarne AV-masin). See on lihtne ja kergesti arusaadav elektrimasin, mille tööpõhimõte ja omadused on seejuures samad kui pöörlevatel generaatoritel ja mootoritel. Lineaarsed masinad annavad kulgliikumise, tavalised masinad – pöörleva liikumise.

Lineaarset alalisvoolumasinat toidetakse akust resistori R kaudu (joonis 1.33). Punktides A ja B antakse pinge siledale hõõrdevabale relsipaarile. Piki seda relssteed on olemas konstantne ühtlane magnetväli, mille suund on joonise tasapinnaga risti ülalt alla. Relsste peale risti on paigutatud voolu juhtiv metall-latt. Reaalselt kasutatavatel lineaarsetel alalisvoolumasinatel on metall-lati asemel mähisepool, kuhu antakse painduvate juhtmete kaudu vool ja mis samuti liigub ühtlases magnetväljas.



Joonis 1.33. Lineaarne alalisvoolumasin

Selle lati liikumine põhineb masina neljal põhivalemil:

1. Võrrand magnetväljas juhtmele mõjuva jõu kohta:

$$\mathbf{F} = i(\mathbf{l} \times \mathbf{B}),$$

siin \mathbf{F} on juhtmele mõjuv jõud, i on voolu suurus juhtmes, \mathbf{l} on juhtme pikkus, mille suund on määratletud voolu suunaga, ja \mathbf{B} on magnetvoo tiheduse vektor.

2. Võrrand elektromotoorjõu kohta, mis indutseeritakse magnetväljas liikuvast juhtmes:

$$e_{\text{ind}} = (\mathbf{v} \times \mathbf{B})\mathbf{l},$$

siin e_{ind} on juhtmes indutseeritud emj, \mathbf{v} on juhtme kiirus, \mathbf{B} on magnetvoo tiheduse vektor ja \mathbf{l} on juhtme pikkus magnetväljas.

3. Kirchhoffi pingeseadus selle masina kohta. Jooniselt näeme, et

$$U - iR - e_{\text{ind}} = 0,$$

kus U on aku pinge ja R on resistori takistus. Teisendades saame

$$U = e_{\text{ind}} + iR.$$

4. Newtoni seadus lati kiirenduse kohta on

$$F = ma,$$

kus F on latile mõjuv jõud, m on lati mass ja a on lati kiirendus.

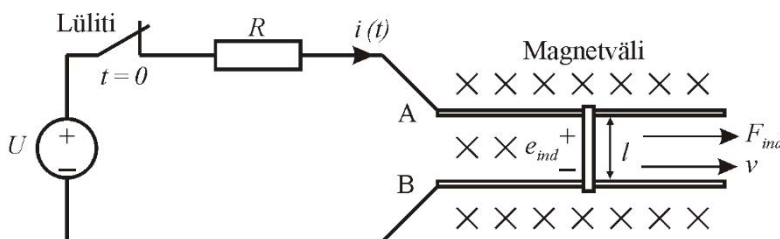
Vaatleme nüüd lihtsa alalisvoolumasina põhiomadusi, kasutades neid nelja põhi-
valemite.

1.10.2 Linearse alalisvoolumasina käivitamine mootorina

Masina käivitamiseks tuleb ta sisse lülitada. Siis tekib latis vool, mille saab arvutada Kirchhoffi pingeseaduse järgi:

$$i = (U - e_{\text{ind}})/R.$$

Kuna latt kohe alguses ei liigu, siis $e_{\text{ind}} = 0$ ja $i = U/R$. Vool latis on suunatud plussilt miinusele. Kui juhtmes on vool ja ta asub magnetväljas, siis vastavalt valemile (1.41) indutseerib magnetväli juhtmes jõu. Selle jõu suurus on $F_{\text{ind}} = iBl$ ning joonisel 1.34 on ta suunatud paremale.



Joonis 1.34. Linearse alalisvoolumasina käivitamine

Seega saab latt kiirenduse paremale (Newtoni seaduse järgi $a = F/m$). Lati liikumisel indutseeritakse latis elektromotoorjõud $e_{\text{ind}} = vBl$ (pluss on lati ülemises otsas).

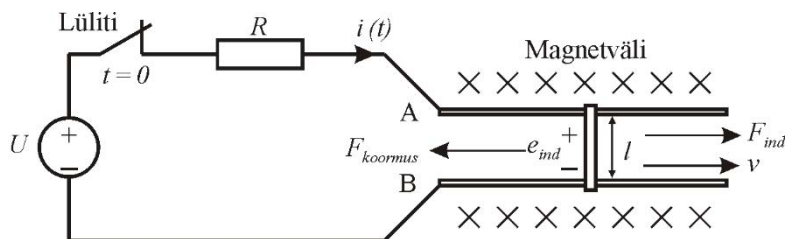
Kui elektromotoorjõud e_{ind} suureneb, siis vool i väheneb: $i \downarrow = (U - e_{\text{ind}} \uparrow)/R$ (vt joonis 1.36 „Käivitus“). Selle tulemusena saavutab latt lõpuks püsikiiruse v_0 , mil latile mõjuv jõud on null. Sel juhul on indutseeritud elektromotoorjõud e_{ind} võrdne pinge U väärtusega ja latt liigub kiirusega, mis on valemist $U = e_{\text{ind}} = v_0Bl$ avaldatav kui $v_0 = U/Bl$.

Latt jätkab selle tühijooksukiirusega (*no-load speed*) liikumist seni, kuni talle ei hakka mõjuma mingi väline jõud. Pärast mootori käivitusprotsessi lõppu on tal kiirus v_0 , indutseeritud emf e_{ind} , vool $i = 0$ ja indutseeritud jõud $F_{\text{ind}} = 0$, nagu on näidatud joonisel 1.36. See on niinimetatud ideaalne tühijooks, kus hõõrdekadusid ei arvestata.

1.10.3 Lineaarne alalisvoolumasin mootorina

Oletame, et lineaarne alalisvoolumasin töötab esialgu tühijooksu püsioleku tingimustes, nagu on eespool kirjeldatud. Nüüd rakendatakse masinale väline koormus, milleks on latile mõjuv jõud F_{koormus} (liikumisele vastassuunas, vt joonis 1.35). Selle tulemusena mõjub latile tema liikumisega vastupidises suunas summaarne jõud $F = F_{\text{koormus}} - F_{\text{ind}}$, mis püüab lati kiirust vähendada. Kuid kiiruse vähenedes väheneb ka indutseeritud emj $e_{\text{ind}} \downarrow = v \downarrow Bl$. Indutseeritud emj vähenemisel vool latis suureneb:

$$i \uparrow = (U - e_{\text{ind}} \downarrow) / R.$$



Joonis 1.35. Lineaarne alalisvoolumasin mootorina

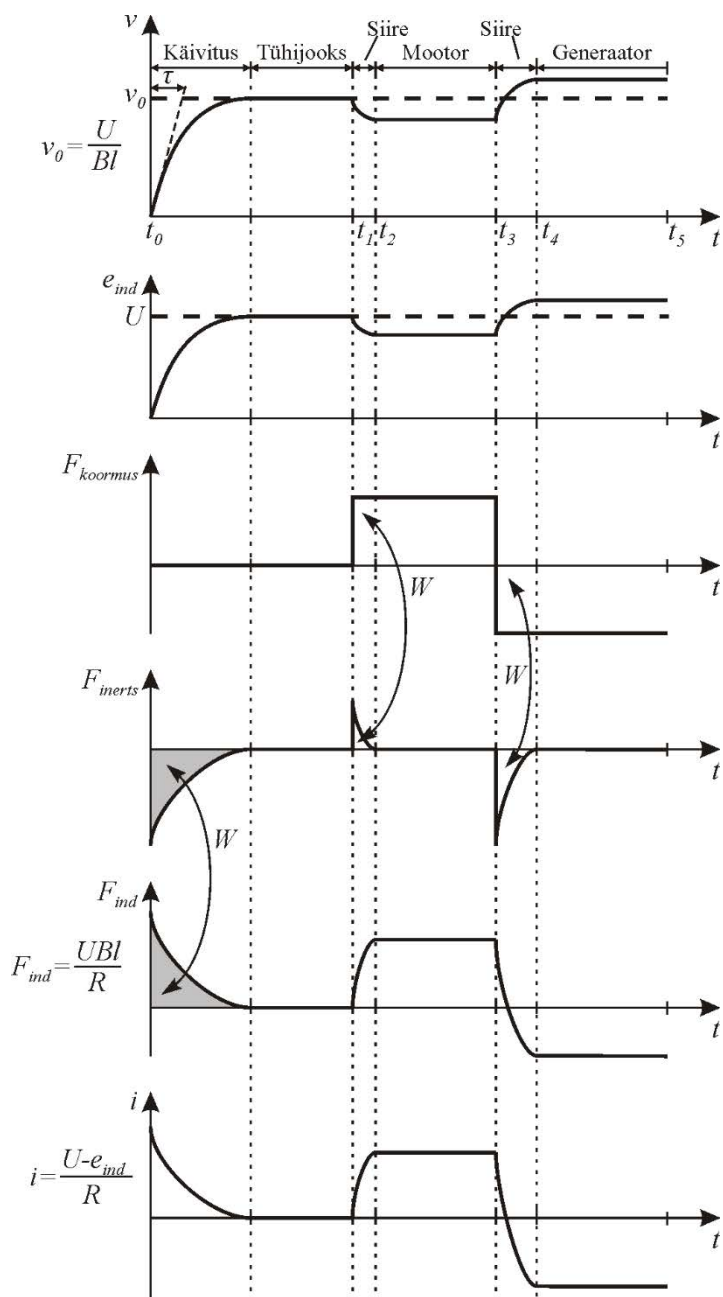
Sellega omakorda suureneb indutseeritud jõud $F_{\text{ind}} = i \uparrow Bl$. Lõpptulemusena suureneb indutseeritud jõud seni, kuni ta saab koormusjõuga võrdseks. Nüüd liigub latt püsikiirusega, mis on aga tühijooksukiirusest natuke väiksem. Kui latile rakendatakse koormusjõud, siis muutuvad tema kiirus v , indutseeritud emj e_{ind} , vool i ja indutseeritud jõud F_{ind} nii, nagu joonisel 1.36 ajaintervallis $t_1 \dots t_3$.

Nüüd mõjub indutseeritud jõud latile tema liikumise suunas ning võimsus muundatakse elektriliselt kujult mehaanilisele, et hoida lati liikumist. Muundatav võimsus on

$$P = e_{\text{ind}} i = F_{\text{ind}} v.$$

Latilt võetakse elektrilist võimsust $e_{\text{ind}} i$ ja asendatakse see mehaanilise võimsusega $F_{\text{ind}} v$. Kuna võimsus muundatakse elektriliselt kujult mehaanilisele, toimib latt mootorina. Selle toime võime võtta kokku järgmiselt.

1. Liikumissuunale vastu rakendatakse jõud F_{koormus} , mis ongi kogu latile mõjuv jõud F .
2. Tekkiv kiirendus $a = F/m$ on negatiivne, lati liikumine aeglustub ($v \downarrow$).
3. Elektromotoorjõu $e_{\text{ind}} = v \downarrow Bl$ vähenemine põhjustab voolu $i = (U - e_{\text{ind}} \downarrow) / R$ suurenemise.
4. Indutseeritud jõud $F_{\text{ind}} = i \uparrow Bl$ suureneb seni, kuni ta saab võrdseks latile mõjuva jõuga $|F_{\text{ind}}| = |F_{\text{koormus}}|$ natuke väiksemal kiirusel v .
5. Elektriline võimsus $e_{\text{ind}} i$ muundatakse mehaaniliseks võimsuseks $F_{\text{ind}} v$ ja masin toimib mootorina.



Joonis 1.36. Linearse elektrimasina tööprotsessid

Pöörlev alalisvoolumootor toimib koormamisel samamoodi: koormuse lisamisel võllile algab kiiruse vähenemine, mille tulemusena väheneb masinasisene emj ning suureneb vool. Voolu suurenedes suureneb indutseeritud moment seni, kuni saab uuel, väiksemal kiirusel koormusmomendiga võrdseks.

Märgime, et lineaarse mootori korral saame elektriliselt kujult mehaanilisele muundatava võimsuse leida valemiga $P = F_{\text{ind}} v$. Pöörleva mootori korral saame muundatava võimsuse leida valemiga $P = T_{\text{ind}} \omega$, milles indutseeritud moment T_{ind} on indutseeritud jõu F_{ind} pöörlemise analoog ja nurkkiirus ω on lineaarse kiiruse v pöörlemise analoog.

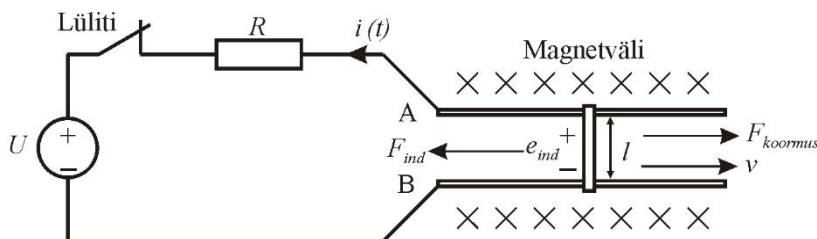
1.10.4 Lineaarne alalisvoolumasin generaatorina

Seekord rakendame latile jõu F_{koormus} tema liikumise suunas. Nüüd hakkab latt liikuma kiirenevalt. Kiiruse kasvades emj $e_{\text{ind}} = v \uparrow B l$ suureneb, muutudes aku pingest suuremaks. Kuna $e_{\text{ind}} > U$, siis muudab vool suunda ja avaldub nüüd valemiga

$$i = (e_{\text{ind}} - U) / R.$$

Kuna nüüd on voolu suund latis alt ülespoole (joonis 1.37), siis mõjub indutseeritud jõud $F_{\text{ind}} = i B l$ latile suunaga vasakule. Indutseeritud jõu suuna saab määrata parema käe reeglga. Indutseeritud jõud mõjub latile rakendatud jõule vastu.

Lõpuks saab indutseeritud jõud rakendatud jõuga võrdseks ja vastassuunaliseks ning latt liigub suurema kiirusega kui enne (ajaintervall $t_3 \dots t_5$ joonisel 1.36). Nüüd toimub aku laadimine. See tähendab, et nüüd toimib lineaarmasin generaatorina, muundades mehaanilist võimsust $F_{\text{ind}} v$ elektriliseks võimsuseks $e_{\text{ind}} i$.



Joonis 1.37. Lineaarne alalisvoolumasin generaatorina

Selle protsessi võime kokku võtta järgmiselt.

1. Rakendatakse jõud F_{koormus} liikumise suunas, mis ongi kogu latile mõjuv jõud F .
2. Kiirendus $a = F/m$ on positiivne, lati kiirus suureneb ($v \uparrow$).
3. Elektromotoorjõud $e_{\text{ind}} = v \uparrow B l$ suureneb ja seepärast ka vool $i = (U - e_{\text{ind}} \uparrow) / R$ suureneb.
4. Indutseeritud jõud $F_{\text{ind}} = i \uparrow B l$ suureneb seni, kuni $|F_{\text{ind}}| = |F_{\text{koormus}}|$ suuremal kiirusel v .

5. Mehaaniline võimsus $F_{\text{ind}}v$ muundatakse nüüd elektriliseks võimsuseks $e_{\text{ind}}i$ ja masin toimib generaatorina.

Jällegi, reaalne alalisvoolugeneraator toimib samal viisil: kui võllile rakendatakse moment liikumise suunas, siis võlli kiirus suureneb, sisemine emj suureneb ja tekib vool generaatorist koormusesse.

Mehaanilise võimsuse, mis muundatakse elektriliseks, saame pöörlevas generaatoris leida valemiga

$$P = T_{\text{ind}}\omega .$$

Huvitav on märkida, et sama masin võib toimida **nii mootorina kui ka generaatorina**. Ainuke erinevus seisneb selles, et ühel juhul on väline jõud rakendatud liikumise suunas (generaatori korral), teisel juhul liikumisele vastassuunas (mootoril). Elektrilisest seisukohast toimib masin generaatorina, kui $e_{\text{ind}} > U$ ning mootorina, kui $e_{\text{ind}} < U$. Mõlemal juhul tekib nii indutseeritud jõud (mootori toime) kui ka indutseeritud elektromotoorjõud (generaatori toime). Sama kehtib ka teiste masinate kohta – alati on olemas mõlemad toimed ja masina talitlemise mootorina või generaatorina määrab ainult summaarse välise jõu suund liikumissuuna suhtes.

Teiseks huvitavaks asjaoluks on see, et vaadeldud masina kiirus oli generaatorina töötamisel suurem ja mootorina töötamisel väiksem, aga pöörlemissuund oli kummalgi juhul sama. Kui keegi arvab, et mootor pöörleb ühes suunas ja generaator teises suunas, siis ta eksib. Erinevuseks on vaid väike kiiruse muutus.

Lihtsa lineaarse masina näite põhjal võime teha ka järgmised tähelepanekud.

- Kiiruse muutumine ei ole kunagi hüppeline. Põhjuseks on masina mehaaniline inerts. Kiiruse muutumisel muutub liikuvatesse osadesse salvestatud kineetiline energia. Käivitamisel võetakse see energia toiteallikast (hallid pinnad joonisel 1.36). Kiiruse vähenedes antakse kineetiline energia kas koormusesse (üldjuhul töömasinasse) või elektriahelasse tagasi. Olukorda, kus kiirus ei muutu, nimetatakse **püsitalitluseks**. Püsitalitus võib olla kas tühijooks, mootoritalitus, generaatoritalitus või mõni muu talitus. Ühelt talitluselt teisele üleminekut nimetatakse **sirdeprotsessiks** ehk **sirdeks**. Joonisel 1.36 näidatud käivitus on siire paigalseisult tühijooksule.
- Indutseeritud elektromotoorjõu e_{ind} ja kiiruse v ostsillogrammid on sarnased, kui magnetvoo tihedus B ei muutu, sest $e_{\text{ind}} = vBl$. Kiirus ja elektromotoorjõud muutuvad alati koos ja samas suunas. Liikumise- või pöörlemissuunda saab muuta toitepinge polaarsuse muutmisega.
- Indutseeritud jõu F_{ind} ja voolu i ostsillogrammid on samuti sarnased, sest $F = iBl$. Jõud (või pöörleval liikumisel moment) ja vool muutuvad alati koos ja samas suunas.
- Kui mootoritalitluses on vool positiivne, siis generaatoritalitluses muutub ta negatiivseks. Kui vool on null ja masin liigub, on tegemist ideaalse tühijooksuga. Tühijooks ei kuulu ei mootoritalitlusesse ega generaatoritalitlusesse.

- Generaatori- ja mootoritalitus võivad esineda masina mõlemal pöörlemisuunal (päripäeva või vastupäeva). Seega on kokku neli erinevat talitlust: mootoritalitus päripäeva, generaatoritalitus päripäeva, mootoritalitus vastupäeva ja generaatoritalitus vastupäeva.

1.10.5 Alalisvoolumasina käivitusvoolu piiramise vajadus

Vaatleme masinat, mida toidetakse alalispingega 250 V ja mille sisetakistus on $0,10 \Omega$ (need on keskmise võimsusega alalisvoolumasina andmed).

Käivitushetkel on kiirus null ja elektromotoorjõud $e_{\text{ind}} = 0$. Tekib vool

$$i_{\text{start}} = \frac{U}{R} = \frac{250 \text{ V}}{0,1 \Omega} = 2500 \text{ A}.$$

See vool on väga suur – ületab masina nimivoolu (*rated current*) üle kümne korra. Nii suur vool võib masinat vigastada.

Kõige lihtsamaks voolu piiramise viisiks käivitamisel on ahelasse lisatakistuse R_{start} ühendamine. Kiiruse kasvades e_{ind} suureneb ja siis võib lisatakistuse eemaldada.

1.10.6 Ülevaade energiamuundusprotsessidest elektrimasinas

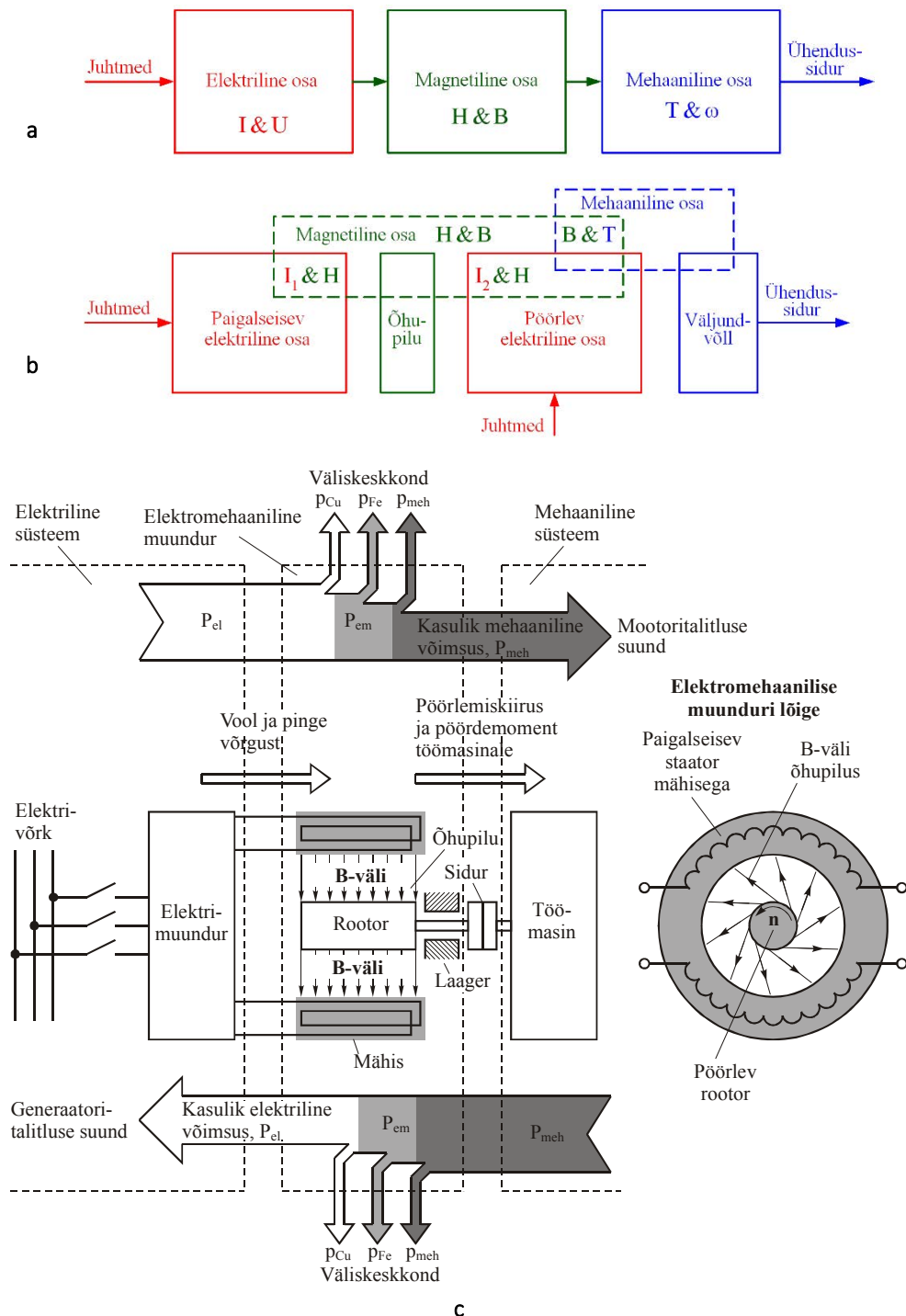
Kui me anname elektrivõrgust masinale voolu, siis hakkab see pöörlema. Toimub elektrienergia muundamine mehaaniliseks energiaks. Kui me paneme sellesama elektrimasina pöörlema mingi välise seadme, näiteks auruturbiini abil, siis annab ta ise voolu. Siis toimub mehaanilise energia muundamine elektrienergiaks. Elektrimasin on **pööratav energiamuundur**.

Elektrimasinas võib eristada kolme põhiosa, milleks on elektriline osa, mehaaniline osa ja neid ühendav magnetiline osa (joonis 1.38,a).

Põhiosade vahelised seosed on detailsemalt näidatud joonisel 1.38,b. Elektrilisi osi on tegelikult kaks. Üks elektriline osa on paigal. See asub masina staatoril. Teine elektriline osa on pöörlev ja see asub rootoril. Magnetilisel osal on seos paigalseisva elektrilise osaga (vool I_1 annab oma magnetvälja), pöörleva elektrilise osaga (vool I_2 annab oma magnetvälja) ja mehaanilise osaga (vootihedus B ja vool I_2 annavad pöördemomendi T). Magnetväli jõuab paigalseisvast osast pöörlevasse õhupilu kaudu. Õhupilu kuulub magnetilise osa juurde.

Energia muundamine toimub erilise keskkonna vahendusel, milleks on **magnetvootiheduse väli** ehk B -väli (B -väli ja H -väli on magnetvälja osad). B -väli avaldab üheaegselt mõju nii **elektrilisele** kui ka **mehaanilisele** süsteemile (vt joonis 1.38,c).

Elektriline süsteem koosneb tavaliselt elektrimasinas olevast mähisest, ühendusjuhtmetest, **muundurist** pinge ja voolu muundamiseks ning toitevst elektrivõrgust. Lihtsamatel juhtudel elektriline muundur puudub (näiteks siis, kui mootori kiirust pole vaja reguleerida) ja elektrimasin on ühendatud otse võrguga. Elektrilise süsteemi seisundit iseloomustavad pinge, vool ja teised elektrilised suurused.



Joonis 1.38. Elektrimäšina põhiosad (a), põhiosade vahelised seosed (b) ja energiavahetus elektrilise ja mehaanilise süsteemi vahel muunduris oleva magnetvälja vahendusel (c)

Mehaaniline süsteem koosneb harilikult elektrimasina rootorist, elektrimasinat töömasinaga ühendavast **sidurist** ja töömasinast. Mehaanilise süsteemi seisundit iseloomustavad pöörlemiskiirus, pöördemoment ja teised mehaanilised suurused.

B -välja vahendusel kantakse elektriline võimsus P_{el} üle mehaaniliseks võimsuseks P_{meh} , kui on tegemist mootoritalitlusega. Magnetvälja võimsust (ehk energiavoogu) nimetatakse **elektromagnetiliseks võimsuseks** P_{em} .

Generaatoritalitluse puhul on võimsuse voo suund vastupidine – mehaaniline võimsus läheb elektromagnetilise võimsuse kaudu elektriliseks võimsuseks.

Muundamisel läheb see osa energiast kaduma, mis eraldub soojusena ümbritsevasse keskkonda (vt joonis 1.38,c). Elektrilises süsteemis esineb kadu mähiselelektritakistuse tõttu. Voolu läbimineku mähisest mähis soojeneb. Seda kadu nimetatakse ka **vaseskaoks** P_{Cu} , sest mähised on tihti vasest. Magnetväli kulgeb masinas suures osas mööda magnetahelat, mis on valmistatud elektrotehnilisest terasest. Muutuv magnetväli kutsub esile hüstereesi ja pöörisvoolud. Selle tulemusena magnetahel soojeneb. Neid kadusid nimetatakse **rauaskadudeks** P_{Fe} . Kadu tekib ka mehaanilises süsteemis esineva hõõrdumise tõttu. Eristatakse kadusid laagrites ja ventilatsioonile. Neid nimetatakse **mehaanilisteks kadudeks** $P_{meh\ kadu}$.

Kadusid iseloomustab **kasutegur** η . Mootoritalitluse kasutegur on

$$\eta_M = \frac{P_{meh}}{P_{el}}. \quad (1.43)$$

Generaatoritalitluse kasutegur on

$$\eta_G = \frac{P_{el}}{P_{meh}}. \quad (1.44)$$

Elektrimasinate kasutegur nimitalitluses (s.o nimipöördemomendil ja nimikiirusel) on enamasti vahemikus 0,7...0,9. Kasutegur sõltub masina tüübist ja suurusest. Väga suurte masinate kasutegur võib olla isegi üle 0,98. Väikeste, alla 10 W võimsusega masinate kasutegur on alla 0,5.

Elektromehaanilisteks muunduriteks on ka **elektromagnetid**. Neid kasutatakse laialdaselt **releedes** ja **kontaktorites**, mis kujutavad endast elektrisignaali abil juhitavaid lüliteid. Elektromehaanilisi muundureid kasutatakse ka **andurites** ehk **mõõtemuundurites**, mis mehaanilise liikumise korral väljastavad elektrisignaali.

Elektromehaaniliste muundurite kirjeldamiseks on vaja kasutada tervet rida elektrilisi, mehaanilisi ja magnetilisi parameetreid.

Ehkki elektrimasinates on võimsuse voo suund muudetav, ehitatakse generaatorid ja mootorid siiski veidi erinevalt. Generaatori kasulikuks võimsuseks on elektriline võimsus P_{el} , mis alalisvoolu generaatori puhul on leitav generaatori klemmidel oleva pingel U ja voolu I kaudu:

$$P_{el} = UI. \quad (1.45)$$

Vahelduvvoolu generaatorid on enamasti kolmefaasilised ja nende võimsus on avaldatav järgmiselt:

$$P_{el} = \sqrt{3}U_l I_l \cos \varphi . \quad (1.46)$$

Siin U_l ja I_l on vastavalt liinipinge ja liinivool generaatori klemmidel ning $\cos \varphi$ on võimsustegur.

Mootori kasulikuks võimsuseks on mehaaniline võimsus mootori võllil, mis on avaldatav nurkkiiruse ja momendi kaudu:

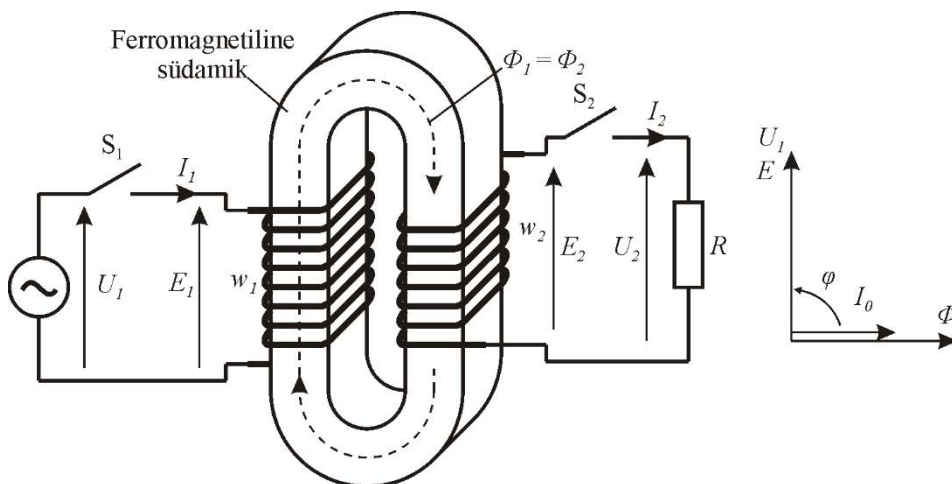
$$P_{meh} = T \omega . \quad (1.47)$$

Elektrimootor paneb käima mingi töömasina. Mootori võimsuse valiku aluseks on selle töömasina käivitamiseks vajaminev moment ja nõutav töömasina kiirus.

1.11 Trafo konstruktsioon ja tööpõhimõte. Elektrienergia muundamine ideaaltrafos

Trafo ehk transformaatore on seade, mis muundab vahelduvvoolu elektrienergia ühelt pingetasemelt (*voltage level*) teisele pingetasemele magnetvälja abil. Näiteks muundatakse 10 kV 50 Hz pingetase tasemele 230 V 50 Hz. Sagedust trafo ei muuda. Alalisvoolu trafo üle kanda ei suuda. Trafo ehitus on lihtne. Ta koosneb kahest või enamast mähisest, mis on keritud ühisele ferromagnetilisele **südamikule** (joonis 1.39).

Lihtsaimal juhul on trafol üks **primaarmähis** keerdude arvuga w_1 , millesse juhitakse elektrienergia, ja üks **sekundaarmähis** keerdude arvuga w_2 , millest energia juhitakse lüliti S_2 kaudu tarbijasse R . Sagedustel $f < 150$ Hz valmistatakse südamik 0,35...0,50 mm paksustest elektrotehnilise terase lehtedest.



Joonis 1.39. Trafo ehitus ja idealiseeritud tühijooksu faasordiagramm

Primaarmähisele rakendatud vahelduvpinge kutsub primaarmähises esile vahelduvvoolu. Trafol on sarnasust raudsüdamikuga pooliga, mida vaatlesime punktis 1.4. Erinevus on selles, et trafo teraslehtedest südamik on suletud kontuur, millel ei ole algust ega lõppu ja sellepärast magnetjõujooned üldiselt südamikust õhku ei välju. Trafo eripäraks on ka see, et trafo mähisele antakse mitte alalisvool, vaid vahelduvvool. Primaarmähise vahelduvvool kutsub trafosüdamikus esile muutliku suuna ja suurusega magnetvälja, mis muutub samuti siinuseaduse järgi nagu vool.

See siinuseaduse järgi muutuv magnetväli läbib trafo mõlema mähise kõiki keerde. Kui muutuv magnetväli läbib juhtmekeerdu, siis tekib selles juhtmekeerus elektromotoorjõud. Ühe keeru elektromotoorjõud on määratud Faraday seadusega

$$e = -d\Phi/dt,$$

kus e – elektromotoorjõud voltides;

Φ – magnetvoog veebrites (magnetvoo olemust kirjeldatakse täpsemalt järgmises peatükis);

t – aeg sekundites.

Paneme tähele, et kui magnetvoog Φ on küll olemas, kuid suuruselt ei muutu, nagu see on alalisvoolu puhul, siis $d\Phi/dt = 0$ ja $e = 0$. Seega mähisekeerdu läbiv püsiva suurusega magnetvoog elektromotoorjõudu selles ei tekita.

Kuna mähises on keerud ühendatud jadamisi, siis on mähise elektromotoorjõud seda suurem, mida rohkem on tal keerde. Kui primaarmähise keerdude arv on w_1 , siis selle mähise elektromotoorjõud on

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}. \quad (1.48)$$

Märk miinus avaldises (1.48) näitab, et tekkiva elektromotoorjõu suund on vastupidine primaarmähisele rakendatud vahelduvpinge u_1 hetkväärtuse suunale. Seda primaarmähises tekkivat elektromotoorjõudu nimetatakse vastuelektromotoorjõuks. See vastuelektromotoorjõud vähendab primaarmähise tühijooksuvoolu väga oluliselt, sest tekkiv vastuelektromotoorjõud e_1 on tavaliselt peaaegu sama suur, kui primaarmähisele rakendatud pinge u_1 :

$$e_1 = (0,95 \dots 0,99)u_1.$$

Trafosüdamiku muutuv magnetvoog läbib ka sekundaarmähise kõiki keerde ja tekitab sekundaarmähise elektromotoorjõu e_2 :

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt},$$

kus w_2 on sekundaarmähise keerdude arv.

Lüliti S_2 sulgemisel (joonis 1.39) tekib ka sekundaarahelas vool ja seda nimetatakse **koormusvooluks** I_2 . Kui lüliti S_2 on avatud, siis sekundaarvool puudub. Seda olukorda nimetatakse **tühijooksuks**. Primaarvool I_1 on olemas ka tühijooksul ja siis nimetatakse seda voolu **tühijooksuvooluks** ehk **magneetimisvooluks** I_0 .

Vool I_2 tekitab trafos pingelangu ja sekundaarpinge hetkväärtus u_2 jääb veidi väiksemaks elektromotoorjõust e_2 . Ligikaudsetes arvutustes võime voolude tõttu tekkivaid pingelange ignoreerida ja lugeda, et $u_1 = e_1$ ja $u_2 = e_2$. Samuti võime esimeses lähenduses jätta arvestamata tühijooksuvoolu ning võimsuskaod mähistes ja magnetahelas. Kui aktiivvõimsuse kadusid ei ole, siis peab energia jäävuse seaduse kohaselt sekundaarpoole aktiivvõimsus olema võrdne primaarpoole aktiivvõimsusega: $P_2 = P_1$. Selliselt lihtsustatud trafot nimetatakse ideaaltrafoks. Ideaaltrafos kehtib võrdus

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 . \quad (1.49)$$

Arvestades, et ideaaltrafol on pinge ja elektromotoorjõud võrdsed, ja ka seda, et nii primaar- kui ka sekundaarmähist läbib üks ja seesama muutuv magnetvoog, on Faraday seaduse kohaselt ühe keeru pinge kogu trafo ulatuses ühesugune. Sellepärast määrab mähiste keerdude arvu suhe mähiste pingete suhte:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} . \quad (1.50)$$

Kui sekundaarmähisel on vähem keerde kui primaarmähisel, siis trafo langetab pinget. Kui aga sekundaarmähisel on rohkem keerde kui primaarmähisel, siis trafo tõstab pinget. Trafo võimaldab vahelduvpinge suurust muuta ja esimeses lähenduses on sekundaarpinge leitav valemiga

$$U_2 = \frac{w_2}{w_1} U_1 .$$

Pinge muutmine on vajalik elektrivõrkudes, nagu me nägime punktis 1.1.1. Kuid ka elektrit tarvitavate seadmete jaoks on pingeniivo suurus harilikult oluline.

On üldteada, et sajavatine hõõglamp annab rohkem valgust kui neljakümnevatine. Võimsus on elektriseadet iseloomustav põhiparameeter.

Sajavatise võimsuse võime saada pingel 10 V ja voolul 10 A. Kuid võime valida ka pinge 100 V ja voolu 1 A või põhimõtteliselt ka pinge 1 V ja voolu 100 A. Hõõglambi võimsus P on määratud tema pinge U ja voolu I korrutisega, mida võib nende kolme erineva valiku jaoks kirjutada kujul

$$P = U_1 I_1 = U_2 I_2 = U_3 I_3 . \quad (1.51)$$

Seda võrdust võib tõlgendada nii, et **sama võimsuse ülekandmiseks võib valida erinevad pingeniivod.**

Pingenivoode valikul on praktikas alati siiski teatud piirangud. Näiteks kui pingevallika pinge on 10 V, lambi arvutuslik tööpinge aga 100 V, siis lamp valgust andma ei hakka. Tuleb valida kümnevoldine lamp või kasutada pinge muutmiseks abiseadet, mis muudab elektrienergia parameetrid sobivaks. Seda abiseadet nimetatakse üldjuhul **muunduriks**. Antud juhul on parem lahendus kümnevoldise lambi valik, sest muundur ei ole just väga odav seade ja peale selle on igas muunduris energiakadu.

Kui aga pingevalk pinge on nriteks 1000 V, muutub sellisele pingele sobiva sajavatise lambi valmistamine liiga keerukaks ja kalliks. Hõõgniit kujuneb ülimalt pikaks ja peeneks, mistõttu on probleeme selle toestamisega kuumas olekus. Siin on muunduri kasutamine parem lahendus.

Kui pingevalk pinge on 1 V, ei ole sellisele pingele sajavatise hõõgniidi valmistamine kuigi raske, kuid suuri raskusi on ühendusjuhtmetega, sest vool on 100 A. Kui me lubame, et ühendusjuhtmetes on kadu 1%, siis on pingelang juhtmetes $\Delta U \leq 0,01 \cdot 1 = 0,01$ V ja juhtmete takistus vastavalt $R \leq 0,01/100 = 0,0001$ Ω . Kui nriteks liini pikkus toiteallikast lambini on 10 m, peaksid selleks liiniks olema 6,6 cm läbimõõduga vaskvardad. See oleks ennenagematu vase raiskamine. Võrdluseks märgime, et sajavoldise pinge ja muude võrdsete tingimuste juures kujuneb juhtme vajalikuks läbimõõduks 0,66 millimeetrit.

Nagu näeme, on juhtme vajalik läbimõõt pöördvõrdeline pingega – mida kõrgem pinge, seda peenemad juhtmed. Kuid kõrgem pinge on ohtlikum ja nõuab ka tugevamat juhtme isolatsiooni, et ei tekiks läbilööki. Selle tõttu ei ole liiga kõrge pinge hea. Osutub, et liini ligikaudu optimaalse pinge saab määrata pingevalk ja tarbija vahelise kauguse järgi. Kui valida üks volt ühe meetri kohta ehk 1000 V kilomeetrile, siis saamegi optimaalsele lähedase pinge.

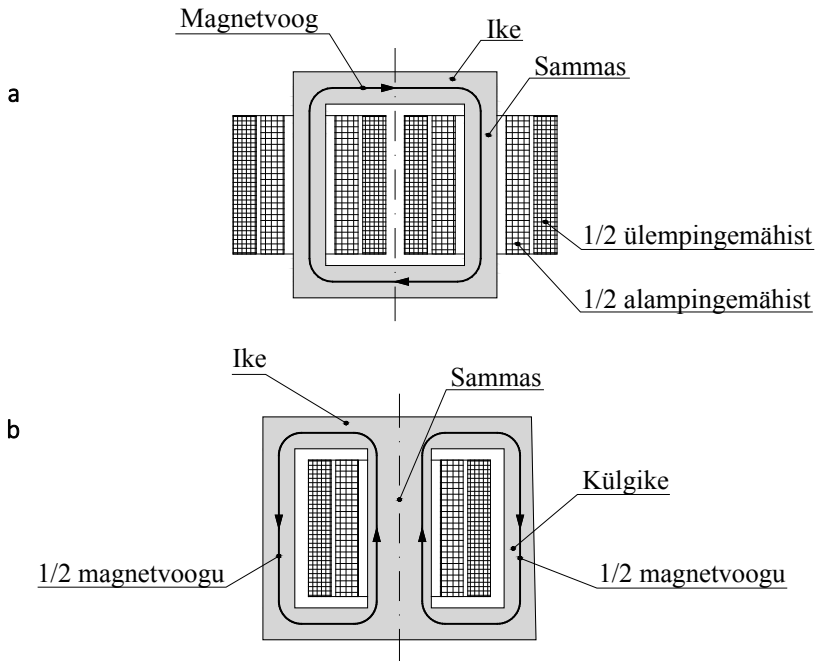
1.11.1 Trafode magnetahelad

Sõltuvalt magnetsüdämike ehitusest jaotatakse trafod sammast- ja manteltrafodeks. Ühefaasiline **sammastrafo** (joonis 1.40,a) koosneb kahest **sambast**, millele paigutatakse mähis, ja kahest **ikke**, mille abil saadakse kinnine magnetahel. Kumbki mähis koosneb kahest osast, mis on paigutatud kahele sambale ja ühendatud omavahel kas jadamisega või rööbiti. Primaar- ja sekundaarmähise kontsentriiline paigutus lähendab neid teineteisele, suurendades sellega nende vahelist elektromagnetilist sidetust.

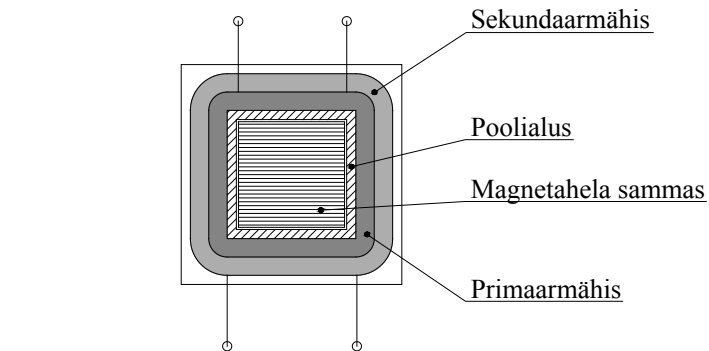
Ühefaasilisel **manteltrafol** (joonis 1.40,b) on üks mähistega sammast ja hargnev ike, mis osaliselt katab mähist (nagu mantel).

Sagedusel 50...60 Hz koostatakse nii sambad kui ka ikked 0,35...0,5 mm paksustest **elektrotehnilise terase** lehtedest. Elektrotehniline teras saadakse rauale 0,8...4,8% **räni** lisamisega, mis tõstab terase eritakistust ja vähendab hüstereesi- ja pöörivoolukadu, kuid muudab teraslehed kõvaks ja rabedaks. Süsinik halvendab elektrotehnilise terase omadusi ja seda välditakse.

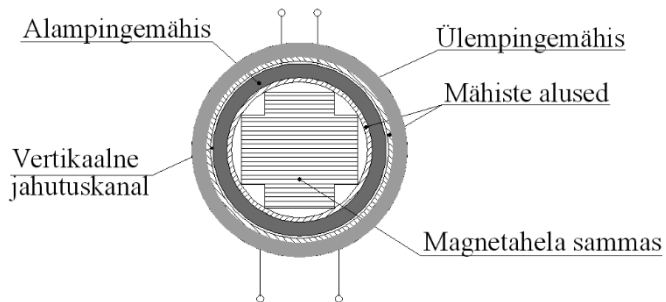
Väikese võimsusega trafode magnetahelal on nii sammaste kui ka ikke ristlõige ruudu- või ristkülikukujuline. Nelinurkse ristlõikega on ka isoleermaterjalist poolialus, millele mähised keritakse (joonis 1.41). Suurte trafode mähised pannakse silindrilisele alusele, mille ristlõige on rõngakujuline. Mähise sees oleva ruumi paremaks ära kasutamiseks tehakse magnetahela sammast astmelise ristlõikega nagu joonisel 1.42. Väga suurte trafodel (megavatt ja rohkem) on astmete arv suurem. Neil trafodel tehakse ka ikke astmeline.



Joonis 1.40. Sammastrafo (a) ja manteltrafo (b) läbilõige



Joonis 1.41. Väiketrafo samba, poolialuse ja mähiste ristlõige



Joonis 1.42. Jõutrafo samba, mähisepoolide aluste ja mähisepoolide ristlõige

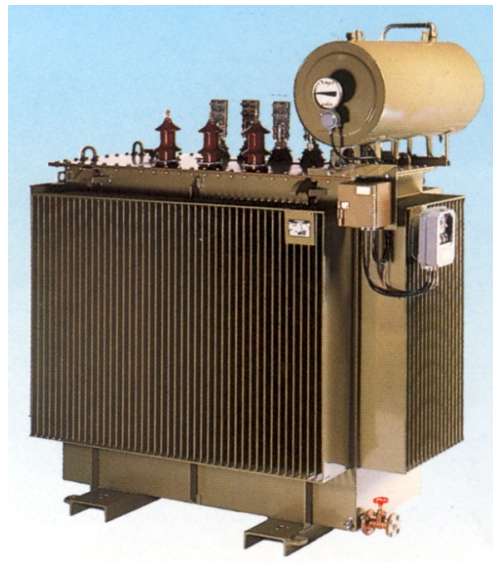
1.11.2 Trafo mähised

Sõltuvalt nimivoolust ja nimipingest on väga erinevaid mähiseid. Mähised valmistatakse kas vask- või alumiiniumjuhtmest, viimasel ajal ka fooliumist. Voolutihedus õlitrafo vaskmähises on 2,0...4,5 MA/m² (ehk A/mm²), kuivtrafo korral 1,2...3,0 MA/m². Ülemine piir on võimsate trafode jaoks. Alumiiniumjuhtmestest mähiste voolutihedused on 40...45% väiksemad.

Õlitrafodeks nimetatakse selliseid trafosid, mille magnetahel ja mähised on paigutatud õlipaaki. Õli parandab jahutustingimusi ja suurendab isolatsiooni vastupidavust pingele. Enamik elektrivõrgu trafodest on õlitrafod.

Mähiseid valmistatakse ümarjuhtmest ristlõikega 0,02...10 mm² või profiiljuhtmest ristlõikega 6...60 mm². Paljudel juhtudel keritakse mähiste poolid mitmest rööpselt juhtmest. Õlitrafode mähised valmistatakse email- ja puuvillisolatsiooniga juhtmest (ümarjuhe) või kahekordse kaablipaberi- ja puuvillisolatsiooniga juhtmest (profiiljuhe). Kuivtrafo mähistes kasutatakse kuumuskindla klaasisolatsiooniga juheteid.

Joonisel 1.43 on näidatud kontsentriliste mähistega kolmefaasilise jõutrafo aktiivosa (magnetahel ja mähised) ja sama trafo valmis kujul. Aktiivosa on paigutatud õlipaaki, millel on jahutusribid. Paagi kaanele on paigutatud ülempinge- ja alampingepoole **väljaviigid** ja **paisupaak**, et võimaldada õli mahu temperatuurist tingitud muutumist. Trafo paagis puudub õhuruum täielikult. Trafo paak ja paisupaak on omavahel toruga ühendatud ja normaalselt on õliga täidetud umbes pool paisupaagist. Väiksematel trafodel võib paisupaak puududa. Suuremad jõutrafod on harilikult varustatud ka nn gaasireleega, mis reageerib trafosisese avari korral tekkivate gaaside survele ja annab signaali trafo võimsuslülitiga väljalülitamiseks kõrgepinge poolelt.



Joonis 1.43. Kolmefaasilise jõutrafo aktiivosa koostamine (vasakul) ja valmis trafo (paremal)

2 ELEKTROMAGNETISM

2.1 Magnetväli ja selle tekitamine

Magnetväli on elektromagnetilise välja üks komponent. Inimese meeleorganid tajuvad nähtavat valgust ja infrapunast soojuskiirgust, mis mõlemad on väga kõrge sageduse ja lühikese lainepikkusega elektromagnetilised väljad. Elektrimasinates kasutatav magnetväli on kas muutumatu suurusega staatiline väli (näiteks alalisvoolumasina ergutusväli) või siis suhteliselt väikese sagedusega (0,1 Hz ... 1 kHz) muutuv väli. Sellist välja inimese meeleorganid ei taju.

2.1.1 Pika sirge juhtme magnetväli

Iga vooluga juhtme ümber on magnetväli. Pika sirge juhtme ümber oleva magnetvälja tugevuse saab leida järgmiselt:

$$H = i/2\pi r, \quad (2.1)$$

kus H – magnetvälja tugevus, A/m;

i – vool juhtmes, A;

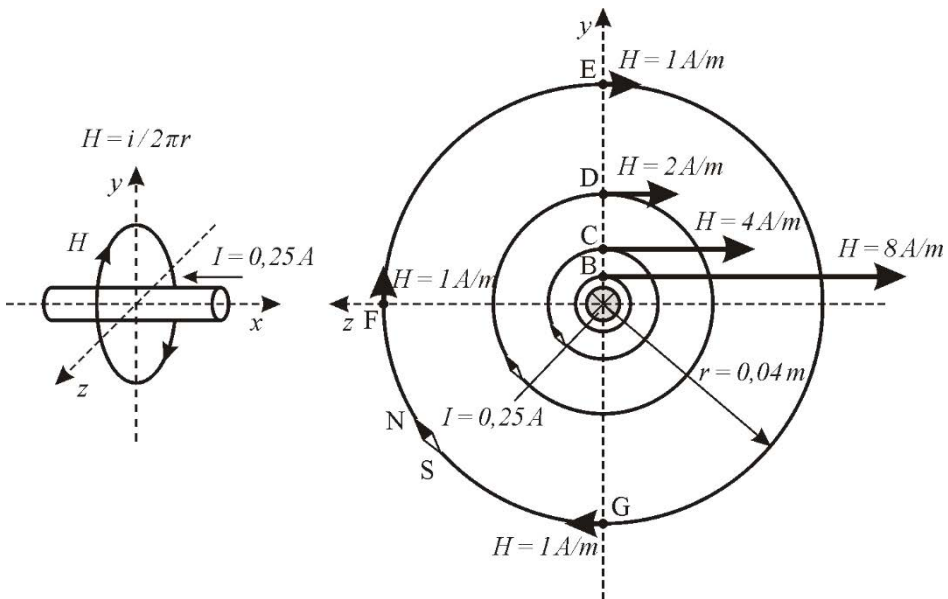
r – kaugus juhtme teljest jõujooneni, m.

Valem (2.1) iseloomustab iga ruumipunkti juhtme ümbruses. Ta annab magnetvälja tugevuse jaotuse kirjelduse. Kui me tahaksime kirjeldada näiteks temperatuuri jaotust toas, saaksime seda teha temperatuuri välja kirjeldavate matemaatiliste avaldiste abil. Magnetvälja võib käsitleda elektrivoolu nähtamatu koostisosana, mis temaga alati lahutamatuult kaasneb. Seda vooluga lahutamatuult seotud välja nimetatakse ka H -väljaks. Mida tugevam on juhtmes vool ja mida lähemal on ruumipunkt juhtme pinnale, seda tugevam on selles punktis H -väli. Kõige tugevam väli on juhtme pinnal.

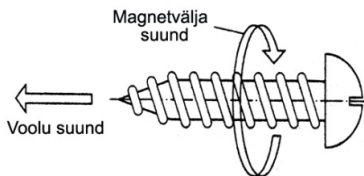
Peale tugevuse iseloomustab H -välja **suund**. H -väli on **vektorväli**. H -väli tekitab keskkonnas, mida ta läbib, veel ühe teise välja, mida nimetatakse B -väljaks ja mida käsitleme järgmises punktis. Nii H -välja kui ka B -välja nimetatakse traditsiooniliselt magnetväljaks. H -väli ja B -väli esinevad alati koos, on samasuunalised, kuid suuruselt erinevad. Magnetväli on H -välja ja B -välja ühine üldnimetus. Temperatuurile ei saa suunda omistada. Temperatuuri väli on skalaarväli. Magnetvälja suuna saab määrata näiteks väikese püsिमagneti abil. Maa magnetvälja suuna määramiseks kasutatavas kompassis on magnetnõel, mille üks ots pöörduv Maa magnetilise põhjapooluse poole ja teine ots lõunapooluse poole. Magnetnõela suund näitab magnetvälja suunda. Kompassinõela põhjapoolus osutab Maa geograafilisele põhjapoolusele, mille lähedal asub Maa magnetiline lõunapoolus. Maa magnetiline põhjapoolus asub Antarktikas (joonis 1.10,g).

Visuaalse ettekujutuse saamiseks ruumis oleva magnetvälja tugevusest ja suunast on kasutusele võetud magnetvälja **jõujoone** mõiste. Jõujoone suund näitab magnetvälja suunda.

Joonisel 2.1 on ringjoontega näidatud sirge juhtme välja jõujooned tasapinnal, mis on juhtme teljega risti. Jõujoonte suund näitab magnetvälja suunda. Magnetvälja tugevuse H vektorid punktides B, C, D, E, F ja G on vastavate jõujoonte puutujate suunalised. Mida tugevam on väli, seda tihedamalt märgitakse joonisele jõujooned. Sellepärast on juhtme lähedal jõujooni tihedamalt. Pika sirge juhtme magnetvälja jõujooned on ringjooned, mille keskpunkt asub juhtme teljel. Seega – **kõik jõujooned on vooluga juhett haaravad kinnised kõverad**. Juhtme telje suunaga rööbiti liikudes välja tugevus ja suund ei muutu. Ülejäänud suundades liikudes muutub juhtme magnetväli aga nii suuruselt kui ka suunalt. Sellist välja nimetatakse mittehomoogeenseks. Kui magnetvälja suund ja tugevus on teatud ruumi osas igal pool ühesugused, nimetatakse seda välja **homoogeenseks**. Elektrimasinate õhupilus on magnetväli ligikaudu homogeenne.



Joonis 2.1. Pika sirge juhtme magnetväli, kui vool juhtmes on 0,25 A



Joonis 2.2. Kruvireegel

Juhtme voolu suuna ja magnetvälja suuna vaheline seos on kirjeldatav kruvireeglga. **Kui paremkeermega kruvi liigub voolu i suunas, siis ühtib kruvi pöörlemis-suund juhett ümbritseva magnetvälja H jõujoonte suunaga.** See on näidatud joonisel 2.2.

2.1.2 Magnetvoo tiheduse väli ja magnetvoog

Kui meil on lähestikku kaks vooluga juhett, tekib nende vahel mehaaniline jõud. Seda nimetatakse nende voolude magnetväljade poolt indutseeritud (põhjustatud) jõuks. See on sarnane kahe püsomagnetit vahelisele jõule. Kui me valime sellise

voolude vahekorra, et üks vool on hästi suur ja teine vool hästi väike, siis selle väikese voolu väli ei muuda märkimisväärselt suure voolu välja. See annab meile võimaluse iseloomustada suure voolu välja eri punkte selle järgi, kui tugevat jõudu see väli avaldab väikesemõõtmelisele ja nõrga vooluga juhtmele.

Mõõtes jõudu ruumi eri punktides, saame iseloomustada kogu ruumi seal tekkiva mehaanilise jõu seisukohast. Selline ruumi iseloomustus on üks väli (vt ka punkt 1.4). Antud juhul nimetatakse seda välja **magnetilise induksiooni väljaks** ehk **magnetvoo tiheduse väljaks**. Kaks erinevat nimetust viitavad ühe ja sama nähtuse erinevatele külgedele. Induksiooniväljaks nimetamine viitab sellele, et tegemist on indutseeritud jõu väljaga. Välja üheks avaldumisvormiks on jõu teke.

Nimetus magnetvoo tiheduse väli iseloomustab välja olemuslikku külge. Juhet läbiva voolu H -väli tekitab juhet ümbritsevas ruumis **magnetvoo**. Magnetvoog on oma olemuselt sarnane elektrivoolule või vedeliku voolule. Elektrivool on elektronide liikumine. Vedeliku vool on molekulide liikumine. Magnetvoogu põhjustavaid osakesi on nimetatud hüpoteetilisteks magnetlaenguteks. Nende olemasolule viitab magnetvoo ja elektrivoolu omaduste sarnasus. Magnetlaengute olemasolu ei ole aga siiani suudetud ei tõestada ega ka ümber lükata. Vaatamata sisemise ehituse tundmatusele on magnetvoo olemasolu siiski kindel.

Magnetvoo tiheduse saab avaldada seda esile kutsunud magnetvälja tugevuse kaudu:

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}. \quad (2.2)$$

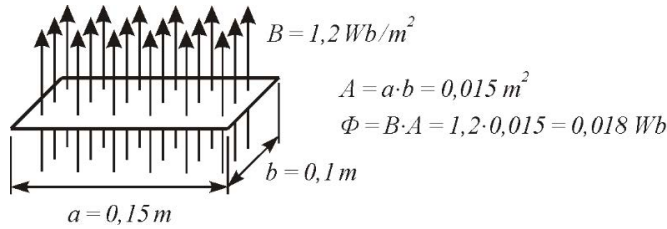
\mathbf{B} on siin magnetvoo tiheduse vektor, mis on igas ruumipunktis samasuunaline teda esile kutsuva magnetvälja suunaga. Magnetvoo tiheduse mõõtühik on **veeber ruutmeetri kohta** (Wb/m^2). Mõõtühiku Wb/m^2 jaoks kasutatakse ka nimetust tesla, mille tähis on T; $1 \text{ T} = 1 \text{ Wb}/\text{m}^2$. 1 T on niisugune magnetiline induksioon, milles selle induksiooni välja suunaga risti paiknevale juhtmele mõjub selle pikkuse 1 m kohta jõud 1 N, kui juhet läbib elektrivool, mille tugevus on 1 A. Tegur μ kujutab endast keskkonda iseloomustavat suurust, mida nimetatakse **magnetiliseks läbitavuseks** ehk **permeaabluseks**. Vaakumi magnetilise läbitavuse tähiseks on μ_0 , $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H}/\text{m}$. Öhu magnetiline läbitavus on küllaldase täpsusega sama, mis vaakumil.

Magnetvälja tugevus H ja magnetvoo tihedus B iseloomustavad ruumi mingit **punkti**. Ruumis olevat **pinda** iseloomustab magnetvoog Φ .

Kõige lihtsamal juhul, kui magnetvoo tiheduse B väli on homogeenne ja jõujooned on pinnaga A risti (joonis 2.3), saab magnetvoo Φ leida magnetvoo tiheduse ja pinna suuruse korrutisena

$$\Phi = BA. \quad (2.3)$$

Magnetvoo ühik on **veeber** (Wb). Magnetvoogu vaadeldakse piltlikult kui läbi mingi pinna minevate jõujoonte arvu. Tugevam väli annab pinnaühikule rohkem jõujooni.

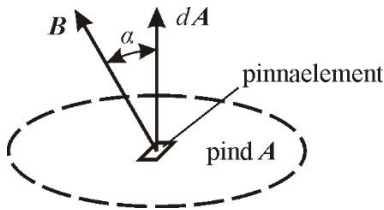


Joonis 2.3. Magnetvoog läbi pinna, kui magnetvoog tiheduse B väli on homogeenne ja pinnaga risti

Magnetvoole ruumis suunda ei omistata, magnetvoog on skalaar. Magnetahelas siiski eristatakse magnetvoog positiivset ja negatiivset suunda sarnaselt elektrivoolule. Üldjuhul, kui väli on ebahürtlane ehk mittehomoogeenne ja ei ole pinnaga risti, saab magnetvoog leida magnetvoog tiheduse integreerimisega üle pinna A (joonis 2.4):

$$\Phi = \int_A \mathbf{B} d\mathbf{A} = \int_A B \cos \alpha dA. \quad (2.4)$$

Siin $d\mathbf{A}$ on pinna A elemendi vektor, mis on suunalt selle pinnaelemendiga risti, $\mathbf{B} d\mathbf{A}$ on vektorite \mathbf{B} ja $d\mathbf{A}$ skalaarkorrutus ja α on vektorite \mathbf{B} ja $d\mathbf{A}$ vaheline nurk.



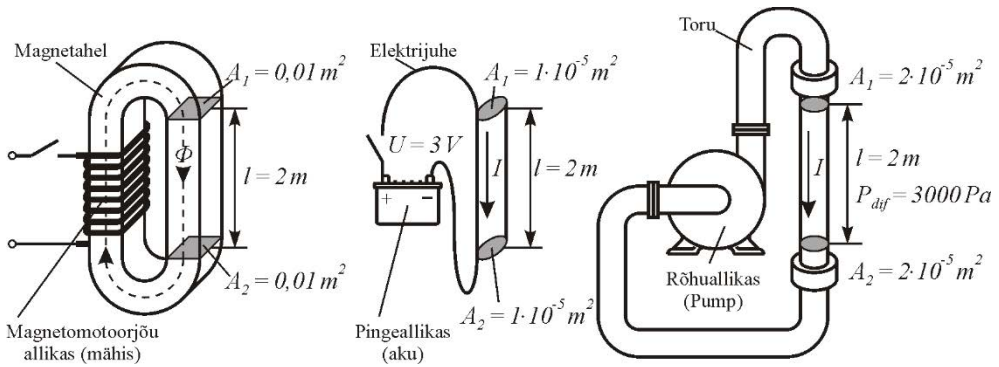
Joonis 2.4. Magnetvoog leidmine vektorite \mathbf{B} ja $d\mathbf{A}$ skalaarkorrutise integreerimisega üle pinna A

2.1.3 Magnetvoog, elektrivoolu ja vedelikuvoolu tekkeprotsesside analoogia

Mõistetest H -väli, magnetvoog Φ ja magnetvoog tihedus B saab paremini aru, kui võrrelda magnetvoog tekkeprotsessi kas elektrivoolu või vedelikuvoolu tekkeprotsessiga (joonis 2.5). Magnetahela selles osas, mis asub ristlõigete A_1 ja A_2 vahel, tekitatakse magnetvoog Φ (Wb). Magnetvoog analoogiks elektri ahelas on vool I (A) ja hüdraulilises ahelas (torus) vedeliku vooluhulk Q (m^3/s).

Magnetvälja tekitajat nimetatakse **magnetomotoorjõu allikaks**. Analoogiliselt nimetatakse elektrivälja tekitajat **elektromotoorjõu allikaks** või pingevalikaks. Konstruktsiooni poolest on magnetomotoorjõu allikas ümber magnetahela keritud elektrijuhe. Vool juhtmes tekitab magnetvälja.

Voolu 30 A tekitamiseks malmvardas (joonis 2.5 ja tabel 2.1) on 10 mm^2 ristlõike korral vaja elektrivälja tugevust $1,5 \text{ V/m}$. Analoogiliselt on toodud näites $0,014 \text{ Wb}$ suuruse magnetvoog saamiseks vaja rakendada magnetvälja tugevust 200 A/m ja vedeliku vooluhulga $0,6 \text{ l/s}$ saamiseks rõhuvälja tugevust 1500 Pa/m . Elektriväli, magnetväli ja rõhuväli on analoogilised mõisted, mis iseloomustavad **liikumapanevat mõju liikumise teekonna pikkusühiku (meetri) kohta**. Liikumapanev mõju kogu vaadeldava teekonna jaoks on vastavalt pinge U , magneetimisergutus Hl või diferentsiaalrõhk P_{dif} .



Joonis 2.5. Magnetvoo, elektrivoolu ja vedelikuvoolu tekitamine vastavalt magnetvälja, elektrivälja ja rõhuvälja abil

Tabel 2.1 Magnetahela, elektri ahela ja hüdraulilise ahela parameetrite vaheline analoogia

| Magnetahel | Elektriahel | Vedeliku ringvoolu kontuur |
|--|--|--|
| 1. Magnetahela ristlõige $A_1 = A_2 = 0,01 \text{ m}^2$ | 1. Malmist varda ristlõige $A_1 = A_2 = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ | 1. Toru siseristlõige $A_1 = A_2 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ |
| 2. Magnetahela pikkus ristlõigete A_1 ja A_2 vahel $l = 2 \text{ m}$ | 2. Varda pikkus $l = 2 \text{ m}$ | 2. Toru pikkus $l = 2 \text{ m}$ |
| 3. Magnetahela terase magnetiline läbitavus $\mu = 0,007 \text{ H/m}$ | 3. Varda eritakistus $0,5 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$ (ehk $0,5 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$) ja erijuhtivus $\gamma = 2 \cdot 10^6 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}$ | 3. Toru hüdrauliline eritakistus $500 \text{ Pa} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ja erijuhtivus $\gamma_{\text{hyd}} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/(\text{Pa} \cdot \text{s})$ |
| 4. Poolile anti vool ja selle tulemusena rakendati ristlõigete A_1 ja A_2 vahele magnetimisergutus $Hl = 400 \text{ A}$ | 4. Akust anti varda otstele pinge $U = 3 \text{ V}$ | 4. Pumba käivitamisega tekitati toru ristlõigete A_1 ja A_2 vahele rõhkude erinevus (s.o dünaamiline diferentsiaalrõhk) $P_{\text{dif}} = 3000 \text{ Pa}$ |
| 5. Ühtlase ristlõike ja materjali tõttu tekkis homogeenne magnetväli, mille tugevus on $H = Hl/l = 400/2 = 200 \text{ A/m}$ | 5. Varda ühtlase ristlõike ja materjali tõttu tekkis homogeenne elektriväli, mille tugevus on $E = U/l = 3/2 = 1,5 \text{ V/m}$ | 5. Ühtlase ristlõike tõttu tekib piki toru dünaamiline rõhuväli tugevusega F (toru on horisontaalne) $F = P_{\text{dif}}/l = 3000/2 = 1500 \text{ Pa/m}$ |
| 6. Magnetväli põhjustas magnetvoo tekke. Magnetvoo tihedus on $B = \mu H = 0,007 \cdot 200 = 1,4 \text{ Wb}/\text{m}^2$ | 6. Elektriväli tekitas vardas voolu. Voolutihedus on $J = \gamma E = 2 \cdot 10^6 \cdot 1,5 = 3 \cdot 10^6 \text{ A}/\text{m}^2$ | 6. Rõhuväli pani vedeliku voolama. Vedeliku keskmine voolukiirus on $v = \gamma_{\text{hyd}} F = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 1500 = 3 \text{ m/s}$ |
| 7. Ahela ristlõikepinda läbiv magnetvoog on $\Phi = BA = 1,4 \cdot 0,01 = 0,014 \text{ Wb}$ | 7. Vool on $I = JA = 3 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 10^{-5} = 30 \text{ A}$ | 7. Vedeliku vooluhulk (kulu) on $Q = vA = 3 \cdot 2 \cdot 10^{-5} = 6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} = 0,6 \text{ l/s}$ |

Keskkond avaldab liikumisele takistust. Magnetahelas arvestab keskkonna mõju magnetiline läbitavus μ ja elektriahelas erijuhtivus γ . Hüdraulilise ahela analoogiliseks suuruseks on hüdrauliline erijuhtivus γ_{hyd} ($\text{m}^2/(\text{Pa}\cdot\text{s})$).

Liikumapanev mõju tekitab voolu või voo. Magnetahelas iseloomustab voogu ristlõikepinna ühikule magnetvoo tihedus B (Wb/m^2). Elektriahelas on analoogiliseks suuruseks voolutihedus J (A/m^2) ja hüdraulilises ahelas vedeliku kiirus v (m/s).

Hargnemisteta kontuuris on magnetvoog Φ , elektrivool I ja vedeliku vooluhulk Q kogu kontuuri ulatuses konstantsed, kuid vootihedus B , voolutihedus J ja vedeliku kiirus v võivad kontuuri eri osades olla erinevad, kui vastavalt nende osade magnetiline läbitavus μ , erijuhtivus γ või ahela ristlõige A on erinevad.

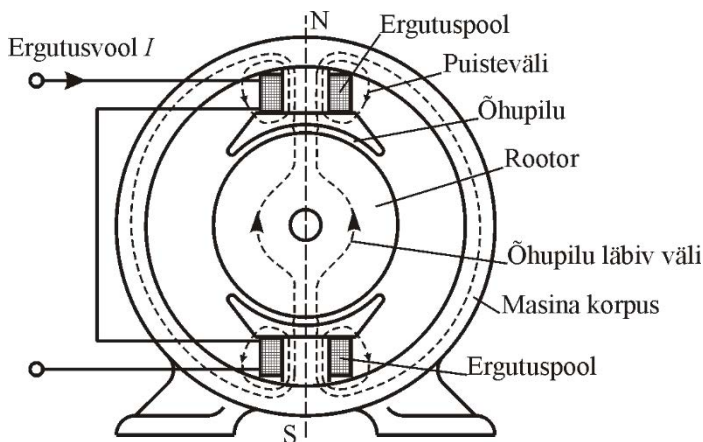
2.1.5 Elektrimasinatele sobiv väli ja selle juhtimine õhupilusse

Magnetväljas indutseeritud pinge ja indutseeritud jõu valemitest $E = vBl$ ja $F = iBl$ (vt punkt 1.10.1) nähtub, et juhtmes indutseeritud pinge E ja jõud F on seda suuremad, mida suurem on magnetvoo tihedus B . Suurema magnetvoo tiheduse B korral võivad elektrimasinad olla kaalult ja mõõdmetelt väiksemad. Ühe sirge juhtme väli ei ole eriti tugev ega ka homogeenne, mida oleks vaja elektrimasina õhupilu jaoks.

Tugeva homogeense välja saamiseks õhupilus kasutatakse järgmisi meetodeid.

- **Mähiseraadist** valmistatakse **pool**. Tavalise isoleeritud elektrijuhtmega võrreldes on mähiseraadi **isolatsioonikiht** hästi õhuke ($0,01\dots 0,1$ mm). Pooli keerud on üksteise lähedal ja keerdude väljad summeeruvad. Väli pooli sees tugevneb oluliselt.
- Pooli sisse pannakse **ferromagnetilisest ainest südamik**. Selle südamiku magnetiline läbitavus on $2000\dots 6000$ korda suurem kui õhul. See aitab elektrimasinates kasutatavat magnetvoo tihedust väga oluliselt suurendada, sest $B = \mu H$.
- Pooli tekitatud magnetväli juhitakse õhupilusse **magnetahela** abil. Tavaliselt valmistatakse pooli südamik ja magnetahel ühesugusest ferromagnetilisest materjalist. Väljadel sagedusega 50 Hz on selleks **elektrotehniline lehtteras**. Magnetahel juhib magnetvälja ligikaudu samamoodi kui elektrijuhe juhib elektrivoolu. Õhus levib magnetväli aga hoopis paremini kui elektrivool, mis õhku peaaegu üldse ei läbi. Selle tõttu väljub magnetvälja väike osa sageli magnetahelast õhku selleks mitte ettenähtud kohtades. Seda osa nimetatakse **puisteväljaks**.

Joonisel 2.6 on näidatud alalisvoolumasina ergutusvälja magnetahel (masina pöörlemistelg on risti joonise tasapinnaga). Magnetvälja tekitab kahte ergutuspooli läbiv vool. Ergutuspoolide südamikud on üks osa magnetahelast. Teise osa magnetahelast moodustab pöörlev rootor. Kolmanda osa magnetahelast moodustab masina korpus, kus magnetväli hargneb kaheks. Puistevälja jõujooned haaravad pooli kerde õhupilu läbimata. Need jõujooned ei teeni püstitatud eesmärki. Kasulikud jõujooned läbivad õhupilu.



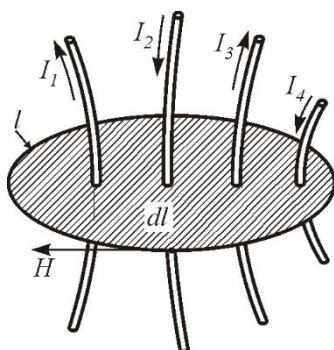
Joonis 2.6. Alalisvoolumasina magnetahel

2.1.6 Koguvoolu seadus (Ampère'i seadus) ja pooli magnetväli

Mitme juhtme väljad summeeruvad ruumis. Kui suletud kontuuriga piiratud pinda läbib mitu juhet, nimetatakse nende juhtmete voolude algebralist summat seda pinda läbivaks **koguvooluks** ΣI . Joonisel 2.7 näidatud juhul on $\Sigma I = I_2 + I_4 - I_1 - I_3$. Magnetvälja tugevus H mööda mis tahes suletud kontuuri pikkusega l ja seda kontuuri läbiv koguvool ΣI on seotud koguvoolu seadusega

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \Sigma I, \quad (2.5)$$

kus \mathbf{H} – magnetvälja tugevuse vektor;
 $d\mathbf{l}$ – kontuurielement.



Joonis 2.7. Mitme vooluga juhtme tekitatud magnetvälja tugevuse leidmine

Kui suletud kontuur on võetud mööda magnetjõujoont, on \mathbf{H} ja $d\mathbf{l}$ alati samas suunas ja nende suunda ei ole vaja arvestada. Sel juhul

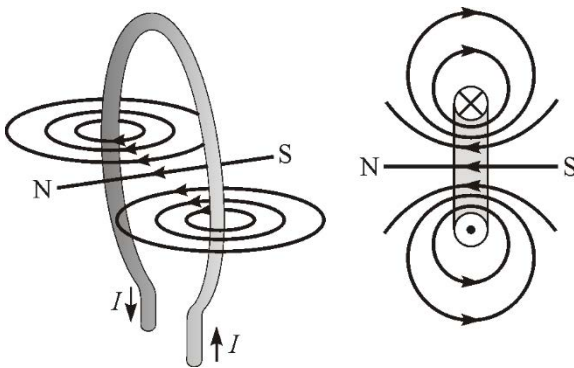
$$\int H dl = \Sigma I. \quad (2.6)$$

Kui meil on ainult üks vooluga sirge juhe, on jõujoon ringikujuline ja väljatugevus igas jõujoone punktis ühesugune. Sel juhul

$$H \int dl = I \text{ ehk } Hl = I. \quad (2.7)$$

Kui jõujoon asub juhtme teljest kaugusel r , siis $l = 2\pi r$ ja me saame punktis 2.1.1 toodud valemi (2.1): $H = i/2\pi r$.

Kui meil on kaks võrdse, aga vastassuunalise vooluga juhet, siis on koguvool võrdne nulliga, $\Sigma I = 0$. Sellegipoolest ei ole väli neid juhtmeid ümbritsevas ruumis võrdne nulliga. Avaldis (2.6) annab sel juhul ühte juhet haaravas kontuuris positiivse summa ja teist juhet haaravas kontuuris negatiivse summa. Vaatame näitena ringikujulist juhtmekeerdu ümbritsevat välja (joonis 2.8). Vool I läbib joonisel näidatud tasapinda keeru parempoolses osas alt üles ja vasakpoolses osas ülalt alla. Selle tõttu on parem- ja vasakpoolse osa jõujooned keeru sees samasuunalised. Summaarne väli (samuti joonisel näha) on keeru sees tugevam kui väljaspool keerdu.



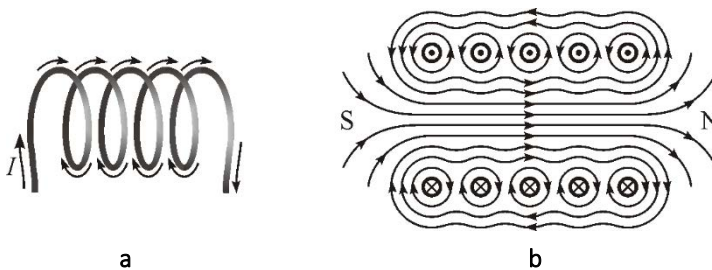
Joonis 2.8. Ringikujulise juhtmekeeru magnetväli

Veel tugevama välja saamiseks paigutatakse üksteise lähedale suur hulk samasuunalise vooluga keerde. Seda nimetatakse pooliks. Ühekihilise silinderpooli ehk solenoidi väli on näidatud joonisel 2.9. Pooli koguvool on võrdne voolu I ja keerdude arvu w korrutisega

$$\Sigma I = Iw . \tag{2.8}$$

Pooli jaoks omandab valemiga (2.6) kirja pandud koguvoolu seadus kuju

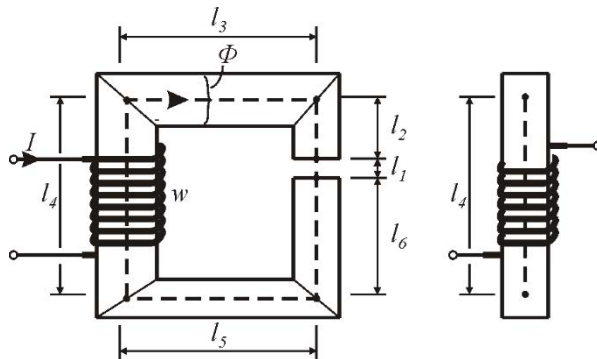
$$\int H dl = Iw . \tag{2.9}$$



Joonis 2.9. Pool (a) ja magnetväli tema telge läbivas tasapinnas (b)

2.1.7 Magnetahelate arvutamine

Magnetahelate puhul on enamasti tegemist olukorraga, kus magnetahel koosneb mitmest eri pikkusega osast $l_1, l_2, l_3, \dots, l_k$ ja iga osa ulatuses on magnetvälja tugevus ligikaudu konstantne (joonis 2.10).



Joonis 2.10. Koguvooluseaduse rakendamine magnetahelale

Sellisel juhul saab valemis (2.9) vasakul pool oleva integraali asendada summaga k liidetavast

$$\int H dl = \sum_1^k H_k l_k \quad (2.10)$$

ja koguvoolu seadus omandab kuju

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + \dots + H_k l_k = Iw. \quad (2.11)$$

Korrutist Iw nimetatakse ka **magnetomotoorjõuks** (tähis F_m) ja selle ühikuks on amper (A), varemalt kasutati ka ühikut amperkeerd. Korrutist Hl nimetatakse **magneetimisergutuseks**, selle ühikuks on samuti amper. Magnetomotoorjõul on magnetahelas analoogiline funktsioon kui elektromotoorjõul elektriahelas. Pooli tekitatud magnetomotoorjõud on magnetahelas magnetvälja allikas.

Mida pikem on magnetahel, seda suuremat magnetomotoorjõudu F_m on teatud tugevusega välja tekitamiseks vaja, sest

$$H = \frac{Iw}{l} = \frac{F_m}{l}. \quad (2.12)$$

Tihti on tarvis leida magnetahelas tekkiva magnetvoo Φ suurus, kui magneetimisergutus F_m , ahela ristlõikepindala A , ahela pikkus l ja materjali absoluutne magnetiline läbitavus μ on teada. Magnetahela ühtlase ristlõike ja muutumatu magnetilise läbitavuse korral

$$B = \mu H = \mu \frac{F_m}{l} \quad (2.13)$$

ja

$$\Phi = BA = \mu A \frac{F_m}{l} = \frac{F_m}{l/\mu A}. \quad (2.14)$$

Suurust $l/\mu A$ nimetatakse **magnetiliseks takistuseks** ehk **reluktantsiks** R_m :

$$R_m = \frac{l}{\mu A}. \quad (2.15)$$

Suurema magnetvoo saamiseks on soovitatav, et magnetiline takistus R_m oleks samuti hästi väike nagu elektriline takistus R . Magnetiline takistus on seda väiksem, mida lühem on magnetahel, mida suurem on selle ahela ristlõikepind ja mida suurem on ahela materjali magnetiline läbitavus. Magnetilise takistuse avaldis (2.15) on analoogiline elektritakistuse avaldisega, kus juhtmematerjali eritakistuse ρ ($\Omega \cdot m$) asemel on kasutatud juhtmematerjali erijuhtivust γ ($\Omega^{-1} m^{-1}$), $\gamma = 1/\rho$. Juhtme takistus on siis

$$R = \rho \frac{l}{A} = \frac{l}{\gamma A}, \quad (2.16)$$

kus l on juhtme pikkus meetrites ja A juhtme ristlõikepindala ruutmeetrites. Avaldiste (2.15) ja (2.16) võrdlemine näitab, et magnetiline läbitavus μ ja erijuhtivus γ on analoogilised suurused.

Avaldiste (2.14) ja (2.15) põhjal saab otsitava magnetvoo suuruse leida järgmiselt:

$$\Phi = \frac{F_m}{R_m}, \quad (2.17)$$

kus F_m on magnetomotoorjõud ja R_m on magnetiline takistus (reluktants). Avaldis (2.17) on analoogiline elektriabelates kasutatava Ohmi seadusega $I = U/R$. Magnetvoog Φ (Wb) on voolu I (A) analoog, magnetomotoorjõud F_m (A) on pinge U (V) analoog ja magnetiline takistus R_m (A/Wb) on takistuse R (Ω) analoog. Valemit (2.17) nimetatakse magnetahela Ohmi seaduseks.

2.1.8 Ferromagnetiliste materjalide magnetilised omadused

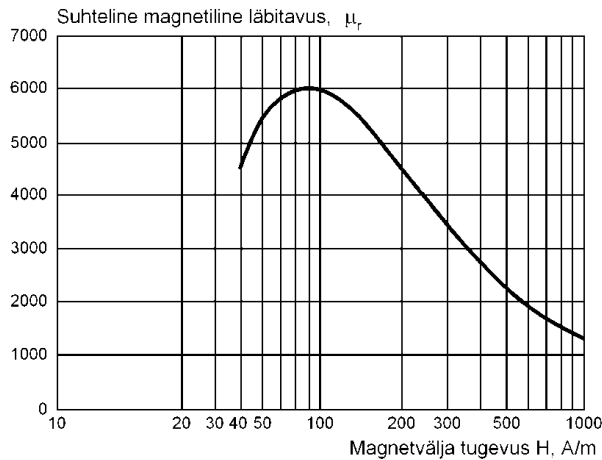
Erinevate materjalide magnetilise läbitavuse võrdlemiseks vaakumi magnetilise läbitavusega μ_0 kasutatakse **suhtelist magnetilist läbitavust (permeaablust)** μ_r :

$$\mu_r = \mu/\mu_0, \quad (2.18)$$

kus μ on materjali absoluutne magnetiline läbitavus.

Enamiku materjalide magnetiline läbitavus erineb vaakumi läbitavusest väga vähe ja sel juhul $\mu_r \approx 1$. Erandi moodustavad raud, nikkel ja koobalt ning mõned haruldased metallid ja nende sulamid. Nende magnetiline läbitavus on palju suurem. Teraste puhul on μ_r 200..6000 või veelgi rohkem. Neid materjale nimetatakse **ferromagneetikuteks**. Ferromagnetilised omadused püsivad kuni temperatuurini 800 °C, kõrgematel temperatuuridel need kaovad.

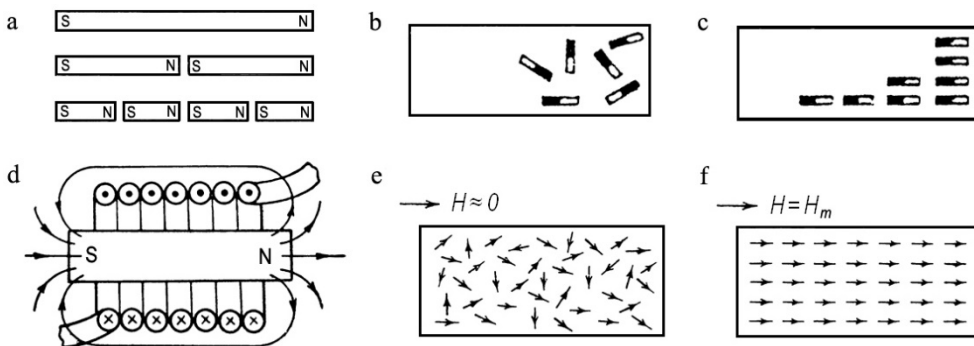
Kui vaakumi magnetiline läbitavus μ_0 on konstantne suurus, siis ferromagnetilistel materjalidel see nii ei ole. Joonisel 2.11 on näidatud terase suhtelise magnetilise läbitavuse μ_r sõltuvus väljatugevusest H . Kõveralt on näha, et väljatugevuse kasvades magnetiline läbitavus väheneb. Seda nähtust seletatakse ferromagnetilise materjali struktuuriga.



Joonis 2.11. Terasse suhtelise magnetilise läbitavuse sõltuvus magnetvälja tugevusest

Raua ja teiste ferromagneetikute aatomitel on magnetväli. Lähestikku olevate aatomite magnetväljad püüavad orienteeruda samasuunaliselt. Aatomite magnetväljad liituvad. Ühesuunalise väljaga piirkonnad, mida nimetatakse **domeenideks**, on väga väikesed. Püsिमagneti pooleks murdmisel me ei saa mitte eraldi põhja- ja lõunapoolust, vaid kaks lühemat püsिमagnetit (joonis 2.12,a). See näitab, et püsिमagnet koosneb väikestest samasuunalistest magnetitest. Domeenid sarnanevad üliväikeste püsिमagnetitega. Tavaliselt on domeenid ruumis orienteeritud kaootiliselt (joonis 2.12,b,e) ja summaarne väli on väga väike.

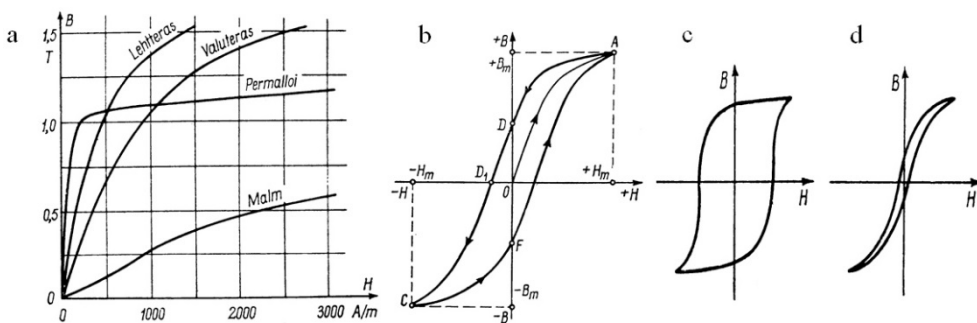
Siiski ei ole domeenid alati kaootiliselt orienteeritud. Välise magnetvälja rakendamisel (seda saab teha pooliga, nagu on näidatud joonisel 2.12,d) hakkavad domeenide väljad pöörduma välise välja suunda. Tulemusena pooli väli ja domeenide väli liituvad (joonis 2.12,c,f).



Joonis 2.12. Magneeditud terasvarda poolitamine (a), domeenide kaootiline orientatsioon magneetimata terases (b, e), nende orientatsioon tugeva välise magnetvälja korral (c, f) ja terasvarda magneetimine pooli magnetväljas (d)

Teatud väljatugevuste piirkonnas (50 A/m kuni 150 A/m joonisel 2.11) on μ_r muutus küllalt väike. Selles piirkonnas kasvab välise välja suunas orienteeritud domeenide arv ja nende väli ligikaudu võrdeliselt välise väljaga. Mida rohkem väline väli kasvab, seda suurem hulk domeene pöördub selle välja suunda. Lõpuks pole enam domeene, mis saaksid veel pöörduda (joonis 2.12,f). Domeenide väli ei kasva enam ja μ_r muutub väikeseks. Seda nähtust nimetatakse **magnetiliseks küllastuseks**. Küllastumine toimub teatud H -välja tugevusel, mis eri materjalidel on erinev.

Rohkem kasutatakse materjalide magneetumise iseloomustamiseks magneetimiskõveraid $B = f(H)$ (joonis 2.13,a). Sel juhul vastab suuremale μ väärtusele järsema tõusuga kõver. Mõnel materjalil (nt permalloi) muutub kõvera tõus ja koos sellega μ väga järsult. Kõvera järsk muutus näitab kiiret küllastumist. Kõvera kalde järsu muutumise piirkonda (permalloil 200...300 A/m) nimetatakse magneetimiskõvera põlveks. Magneetimiskõvera ligikaudu horisontaalset osa nimetatakse küllastuspiirkonnaks. Elektrotehnilistel terastel tekib küllastumine piirkonnas 1,0...1,8 T. Elektrimasinates pole suuremaid magnetvoo tihedusi üldjuhul võimalik kasutada. Erandiks on ülijuhtpoolidega masinate väli, kus magnetvoo tihedus on 2...10 T.



Joonis 2.13. Ferromagnetiliste materjalide magneetimiskõverad (a); ferromagnetilise materjali ümbermagneetimine (b); kõva magnetmaterjal (c); pehme magnetmaterjal (d)

Kui me kasutame alalisvälja asemel vahelduvvälja, saame magneetimiskõvera asemel magneetimissilmuse ehk hüstereesisilmuse (joonis 2.13,b). Silmus tekib järgmiselt. Kui vool on alguses null ja suureneb esimest korda, toimub magnetvoo tiheduse B kasv mööda kõverat OA. Kui me hakkame seejärel voolu ja koos sellega magnetvälja tugevust H vähendama, väheneb vootihedus B kõvera AD järgi. **Voolu vähenemisele ja suurenemisele vastavad erinevad kõverad.**

Punktis D on väline väli viidud nulliks, kuid südamikus on alles **jääkmagnetvoog** Φ vootihedusega B . See näitab, et mitte kõik domeenid ei ole võtnud tagasi endist juhuslikku orientatsiooni. Osa domeene säilitab endise välise välja orientatsiooni (mälu efekt). Miks on see nii? Aga sellepärast, et aatomite pööramiseks domeenides tuleb kulutada energiat. Kui enne kasutati välise magnetvälja energiat aatomite orienteerimiseks välja suunas, siis pärast välja eemaldamist puudub energiaallikas, mis kõik domeenid tagasi pööraks. Kui domeenid on juba kord ühes suunas joondunud, siis teatud osa neist säilitab oma orientatsiooni seni, kuni välise energia allikas seda ei muuda. Sel põhjusel saadakse püsimgnet, millel on jääkmagnetvoog.

Selleks, et jõuda punktist D punkti D_1 (joonis 2.13,b), kus jääkmagnetvoog on null, tuleb rakendada vastassuunaline väli. Nullise jääkmagnetvoo tekitamiseks vajalikku magnetomotoorjõudu nimetatakse **koertsitiivjõuks**. Välise energia allikaks võib olla ka tugev mehaaniline löök või kuumutamine. Kui püsomagnet kukub põrandale, võib ta oma magnetilised omadused osaliselt kaotada.

Kui vahelduvvoolu tekitatud H -väli saavutab oma negatiivse maksimumi $-H_m$ (joonis 2.13,b), siis saavutab magnetvoo tihedus samuti oma negatiivse maksimumi $-B_m$ (punktis C). Kui vahelduvvoolu tekitatud H -väli muutub väärtuselt $-H_m$ tagasi väärtusele $+H_m$, toimub übermagneetimine mööda kõverat CFA. Vahelduvvoolu iga perioodi jooksul toimub übermagneetimine mööda hüstereesisilmust ADD_1CFA .

Püsimagneeti jaoks on hea, kui jääkmagnetvoo tihedus ja koertsitiivsus on suured. Püsimagneeti materjali hüstereesisilmus on lai (joonis 2.13,c). Sellist materjali nimetatakse **magnetiliselt kõvaks**.

Kuna domeenide pööramiseks rauas on vaja energiat, tekib masinate ja trafode magnetahela vahelduva magnetväljaga osas energiakadu. Võib näidata, et terase hüstereesisilmuse pindala on võrdeline ühes tsüklis domeenide pööramiseks kulutatud energiaga. Mida kitsam on hüstereesisilmus, seda väiksem on übermagneetimiskadu. Übermagneetimiskadu nimetatakse ka hüstereesikaoks. Vahelduvas magnetväljas töötamiseks mõeldud materjalidel on kitsas hüstereesisilmus (joonis 2.13,d). Selliseid materjale nimetatakse **magnetiliselt pehmeteks** materjalideks.

Südamikus esineb ka teist liiki kadu, mida samuti tekitab muutuv magnetväli. Selleks on **pöörisvoolukadu**. Hüstereesikadu ja pöörisvoolukadu koos nimetatakse südamikuskaoks ehk **terasekaoks**.

Püsomagnetmaterjalid

Püsomagnetmaterjalide ajalugu on väga pikk, ulatudes 4000 aastat tagasi. Esimeseks püsomagnetiks oli looduses leiduv mineraalirikas magnetrauamaak Fe_3O_4 . Seda materjali tunti nii Hiinas kui ka Vanas Kreekas. Esimene teadaolev kasutusala sellele magnetmaterjalile oli maismaakompass, mis aitas karavanidel kõrbes liikuda.

Püsomagnetite omaduste parenemine algas 1880. aastatel, mil alustati põhjalikku metallisulamite uurimist. Volframi ja kroomi lisamine suurendas materjalide koertsitiivsust. Mida suurem on koertsitiivsus, seda parem. Koertsitiivjõud näitab, kui suurt välist välja on vaja püsimagneeti demagneetimiseks. Mida suurem koertsitiivjõud, seda suuremates väljades saab püsomagnetit kasutada, ilma et see demagneetuks. Teine püsimagneeti omadusi iseloomustav oluline parameeter on **energiatihedus**. Energiatihedust mõõdetakse tavaliselt kilodžaulides kuupmeetri kohta ja see iseloomustab energia hulka, mida on vaja kasutada materjali magneetimiseks. Suuremal energiatihedusel on samade omadustega püsomagnet väiksem.

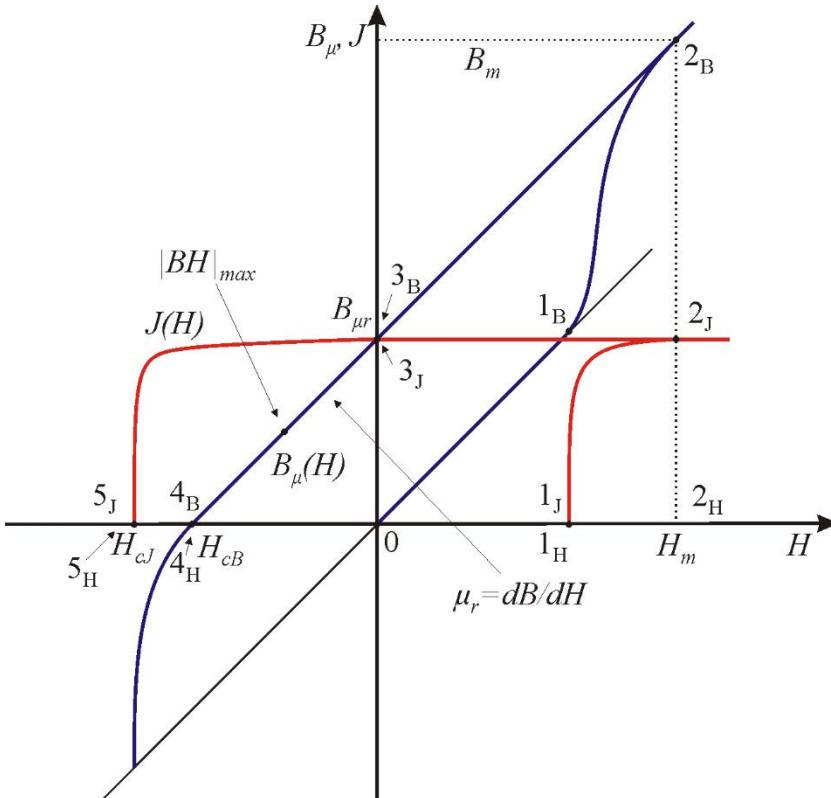
Läbimurre püsomagnetmaterjalide arengus toimus 20. sajandil, kui töötati välja alumiinium-nikkel-koobaltsulamitest (AlNiCo) magnetid, mille koertsitiivsus on 32 kA/m. Aastail 1940–50 avastati ka püsomagnetite perekond, mis on tuntud kui

ferriidid. Ferriidid said populaarseks alalisvooluelektrimasinates, mida kasutati autodes, käsitööriistades jne.

Samaarium-koobalti sulamist (SmCo) magnetmaterjalid on pärit aastast 1960. Need magnetmaterjalid on väga hästi kasutatavad elektrimootorites ja generaatorites (koertsitiivsus 1000 kA/m, energiatihedus 100...200 kJ/m³), kuid samas väga kallid haruldase toormaterjali koobalti tõttu. Uusim ja tähtsaim avastus püsomagnetmaterjalide alal tuli 1983. aastal, kui tutvustati magnetmaterjali neodüüm-raud-boori (NdFeB), mille energiatihedus on kuni 400 kJ/m³ ja koertsitiivsus 2000 kA/m. Võrreldes SmCo-püsomagnetitega on NdFeB-püsomagnetid magnetiliselt paremate omadustega ja odavamad. Puuduseks on madal korrosioonikindlus, mis nõuab korralikku pinnakatet, ja ka väike mehaaniline tugevus. Samuti on neil SmCo-magnetitega võrreldes väiksem temperatuuritaluvus (maksimaalne töötemperatuur on 110...180 °C).

Püsomagnetmaterjalide omadused

Püsimagneti tüüpiline hüstereesisilmus on toodud joonisel 2.14. Püsomagnetmaterjali ehk magnetiliselt kõva materjali omadusi kirjeldab peamiselt tema hüstereesisilmuse ülemises vasakpoolses veerandis olev osa, mida nimetatakse magneti demagnetimiskõveraks.



Joonis 2.14. Püsimagneti $B_\mu(H)$ ja $J(H)$ kõverad. Ülemisse vasakusse veerandisse jäävaid kõverate osi nimetatakse demagnetimiskõverateks

Püsिमagneti iseloomustamiseks kasutatakse kahte kõverat (joonis 2.14). Üks neist iseloomustab B -välja ja H -välja omavahelist sõltuvust, mida sai eespool vaadeldud. Siin on erinevuseks aga see, et teslades mõõdetava B -välja väärtus on läbi jagatud vaakumi magnetilise läbitavusega μ_0 , $B_\mu = B/\mu_0$. Sellise taandatud magnetvoo tiheduse B_μ ühikuks kujuneb siis A/m nagu H -väljalgi.

Teiseks iseloomustab püsिमagnetiteid **magnetiline polarisatsioon** ehk J -väli. J -välja mõõtühikuks on A/m nagu H -väljalgi. Kõik kolm vektorit, mis iseloomustavad B_μ -välja, H -välja ja J -välja, on samasuunalised ja seotud järgmiselt: $\mathbf{B}_\mu = \mathbf{J} + \mathbf{H}$. J -väli iseloomustab püsिमagneti sees olevate üliväikeste domeenide poolt tekitatud summaarset välja ja H -väli iseloomustab pooli elektrivoolu poolt tekitatud välja.

Joonis 2.14 kirjeldab olukorda, kus algul magneetimata püsिमagnetmaterjalist poolisüdamik ümbritsetakse pooliga ja pooli voolu välja abil (horisontaalteljel olev H -väli) hakatakse seda poolisüdamikku magneetima ja demagneetima. Selle protsessi käigus hakkavad muutuma nii B_μ -väli (vertikaalteljel) kui ka J -väli (samuti vertikaalteljel). J -väli näitab, kas sellel poolisüdamikul on tekkinud püsिमagneti omadused ja kui tugevad need on.

Kui südamik on magneetimata ja ka voolu poolis ei ole, siis on kõik kolm välja võrdsed nulliga ja me asume koordinaatide alguspunktis ehk nullpunktis. Kui me nüüd hakkame pooli voolu positiivses suunas suurendama, siis liigume mööda kõverat $B_\mu(H)$ kuni punktini 1_B . Sealjuures püsib magnetiline polarisatsioon J võrdne nulliga kuni punktini 1_J .

Kui pooli voolu edasisel suurendamisel H -väli jõuab punktist 1_H punkti 2_H , toimub J -väljas suur muutus. See väli kasvab punktist 1_J punkti 2_J . Sealjuures kasvab J -väli algul väga kiiresti, punktist 2_J alates muutub kasvukiirus aga väga väikeseks. Selline J -välja kasv näitab, et algul pöörduvad püsिमagneti sees olevad domeenid väga kiiresti välise välja suunas, kuid punktis 2_J jõutakse küllastusse (kõik domeenid on juba orienteerunud H -välja suunas). Üleminekul punktist 1 punkti 2 toimubki püsिमagnetmaterjali magneetumine. Tekib püsिमagnet.

Kui me nüüd vähendame pooli voolu nullini (H -väli muutub nulliks), siis B_μ -väli väheneb punktist 2_B kuni punktini 3_B . Vaatamata pooli välja puudumisele jääb alles küllalt suure vootihedusega B_μ -väli, mille põhjustab tekkinud püsिमagnet. Seda vootihedust nimetatakse **jääkwoo tiheduseks**. Joonisel 2.14 on selle tähiseks $B_{\mu r}$, sest sellel joonisel on vootiheduse taandatud väärtused (sellele viitab indeks μ). Püsिमagnetite iseloomustamiseks kasutatakse aga jääkwoo tiheduse taandamata väärtusi, mille tähiseks on B_r . Suurused B_r ja $B_{\mu r}$ on seotud järgmiselt: $B_r = \mu_0 \cdot B_{\mu r}$. NdFeB-püsिमagnetitel on B_r väärtus kõige suurem ja ulatub 1,3 teslani. Ferriitmagnetitel on see 0,2...0,4 T. Mida kõrgem jääkwoo tihedus on, seda parem – seda kõrgem saab olla magnetvoo tihedus püsिमagnetit kasutava magnetahela õhupilus.

Kui me nullpunktis vahetame pooli voolu suuna ja hakkame voolu suurendama negatiivses suunas, siis kasvab ka H -väli negatiivses suunas. See kutsub esile B_μ -välja vähenemise. Kui H -väli on negatiivselt kasvanud punktini 4_H , siis on

B_μ -väli jõudnud nulli. H -välja väärtust punktis 4_H nimetatakse **koertsitiivsuseks vootiheduse järgi** ja selle tähiseks on H_{cB} . Mida suurem see koertsitiivsus on, seda õhemat magnetit saab kasutada, ilma et väline väli selle magneti demagneediks. Kui me punktist 4_H liigume H -väljaga tagasi nullpunkti, siis vootihedus B_μ taastub ja võtab uuesti punkti 3_B väärtuse. Nii juhtub sellepärast, et püsिमagnet poolt antud J -väli jääb muutumatult alles (negatiivne H -väli ei olnud piisavalt tugev, et seda J -välja nulli viia).

Kui me aga suurendame demagneetivat H -välja punktini 5_H , siis omandab magnetvoo tihedus B_μ punktis 5_H negatiivse väärtuse ja magnetilist polarisatsiooni iseloomustav J -väli jõuab punktis 5_J nulli. See näitab, et magnet on demagneeditud. H -välja tugevust punktis 5_H nimetatakse **koertsitiivsuseks polarisatsiooni järgi**, tähis on H_{cJ} . See H_{cJ} näitab, kui suurt välist väljatugevust on vaja rakendada, et magnet demagneetida.

Kui me liigume H -väljaga punktist 5_H tagasi nulli, siis kahaneb B_μ -väli samuti nullini. Seejuures on J -väli aga pidevalt null, sest nüüd on magnet demagneeditud.

Demagneetimiskõver näitab ära püsिमagnet põhilised parameetrid, milleks on jääkvoo tihedus B_r , koertsitiivsus polarisatsiooni järgi H_{cJ} ja koertsitiivsus vootiheduse järgi H_{cB} . Sellelt kõveral saab määrata ka magneti maksimaalse energiatiheduse $|B \cdot H|_{\max}$ ning magneti suhtelise magnetilise läbitavuse μ_r .

Magneti maksimaalne energiatihedus ehk **magneetumusenergia** $|B \cdot H|_{\max}$ vastab demagneetimiskõveral punktile, kus korrutis $B \cdot H$ on maksimaalne. Energiatiheduse mõõtühikuks on džauli kuupmeetri kohta (J/m^3), kuid tihti kasutatakse ka ühikut gauss-örsted (GOe).

Püsिमagnet suhteline magnetiline läbitavus μ_r näitab, kui järsult kõver $B(H)$ lineaarses algusosas langeb. Tüüpiliselt jääb püsिमagnetite suhteline magnetiline läbitavus vahemikku 1...3,5.

Tänapäevased püsिमagnetmaterjalid

Ferriitmagnetid on tehtud kas raudoksiidist ja baariumkarbonaadist $BaCO_3$ või strontsiumkarbonaadist $StCO_3$. Ferriitmagnetid on laialt levinud magnetmaterjalid, mis on teistest turul olevatest magnetmaterjalidest tunduvalt odavamad.

AlNiCo-magneteid valmistatakse alumiiniumi (Al), nikli (Ni) ja koobalti (Co) sulamist, millele lisatakse vähesel määral teisi elemente, mis parandavad magnetmaterjali omadusi. AlNiCo-magnetitel on hea temperatuuritaluvus ja hea vastupanu korrosioonile, kuid nad on kergesti demagneetuvad. Nende puuduseks on ka kallidus, väike koertsitiivsus ja väike energiatihedus.

SmCo-magnetid kuuluvad haruldaste muldmetallmagnetite rühma, mis on hea korrosioonitaluvusega ning millel on suurem energiatihedus kui ferriit- ja AlNiCo-magnetitel. Neil on ka parem temperatuuritaluvus kui NdFeB-magnetitel. Samas on nende puuduseks kõrge hind ja väike mehaaniline tugevus.

NdFeB-magnetid (neodüümmagnetid) on paremate magnetiliste omadustega kui SmCo-magnetid, kuid neil ei ole nii head korrosioonikindlust ja nii head temperatuuritaluvust. Suure energiatiheduse tõttu on nad leidnud kasutamist sellistes kohtades, kus on oluline kompaktnel lahendus. NdFeB-magnetid on aldid korrodeeruma ja vajavad seetõttu pinnakatet, milleks võib olla kas vask, hõbe, kuld, nikkel, tsink, tina või epoksiid.

Eri tüüpi magnetite võrdlus on toodud tabelis 2.2.

Tabel 2.2 Püsिमagnetmaterjalide parameetrite võrdlus

| Suurus | Tähis | Ühik | Ferriit, pressitud/valatud | SmCo, pressitud/valatud | NdFeB, pressitud/valatud |
|-------------------------|----------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Jääkvoo tihedus, 20 °C | B_r | T | 0,4/0,2 | 1,1/0,6 | 1,3/0,7 |
| Maks. energiatihedus | BH_{\max} | kJ/m^3 | 20...30 | 100...200 | 200...300 |
| Temperatuuritegur | α_{B_r} | %/K | -0,2 | -0,03 | -0,1/-0,1 |
| Temperatuuritegur | α_{H_c} | %/K | 0,4 | -0,23 | -0,6/-0,4 |
| Koertsitiivjõud, 200 °C | H_c | kA/m | -200 | -1000 | -2000 |
| Eritakistus | ρ | $\Omega \cdot \text{m}$ | / | / | /1,4 |
| Soojusjuhtivus | λ | W/(m·K) | 4,5/ | 10/ | 9/2 |
| Töötemperatuur | t | °C | /150 | 250/110 | |
| Hind | | | odav | kallis | keskmise |

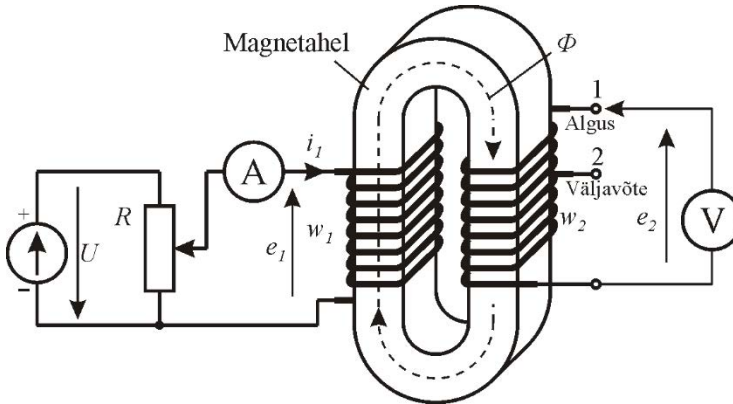
2.2 Ajas muutuva magnetvälja poolt indutseeritud pinged

2.2.1 Faraday seadus ja Lenzi reegel

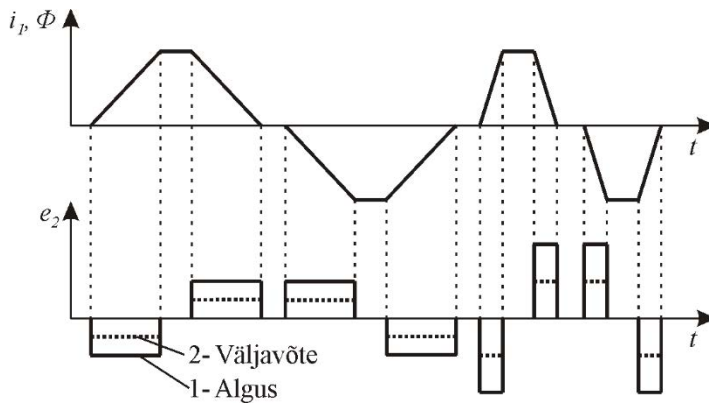
Eespool vaatlesime pinged ja elektromotoorjõu tekkimist magnetväljas liikuvast elektrijuhis. Vaatleme nüüd ajast muutuvat magnetvälja.

Ajast muutuvat magnetvoolu saamiseks võib muuta voolu, mis läbib magnetahela ümber olevat mähist. Mähise w_1 voolu saab muuta reostaadi takistuse R muutmisega (joonis 2.15). Reostaat on reguleeritav takistus. Kui magnetahelal on veel teine mähis w_2 , siis tekitab muutuv magnetvoog Φ selles elektromotoorjõu e . Seda näitab voltmeeter. Meid huvitab Φ ja e vaheline sõltuvus. Magnetvoolu otsene mõõtmine on tülikas. Lihtsam on ampermeetriga mähise voolu mõõta. Kui magnetahelas on õhupilu, muutub magnetvoog ligikaudu võrdeliselt vooluga.

Kui me muudame voolu ning kasutame isekirjutavat ampermeetrit ja voltmeetrit, siis saame joonisel 2.16 toodud kõverad. Selliseid ajast muutuvaid kõveraid nimetatakse ka ostillogrammideks. Ostillogrammidelt on näha, et mähises w_2 tekib emj ainult siis, kui magnetvoog muutub. Konstantse magnetvoolu korral on emj võrdne nulliga.



Joonis 2.15. Ajas muutuva magnetvoo tekitamine ja selle voo abil elektromotoorjõu indutseerimine



Joonis 2.16. Muutuva magnetvoo mõjul mähises w_2 indutseeritud elektromotoorjõud

Indutseeritud emj suund on magnetvoo kasvamisel ja kahanemisel erinev. Elektromotoorjõu suurus sõltub magnetvoo kasvamise kiirusest. Kui voog kasvab kiiremini, on emj suurem. Elektromotoorjõud kasvab ka koos keerdude arvu kasvuga. Voltmeeter näitab mähise algusega 1 ühendamisel kaks korda suuremat pinget, kui väljavõttega 2 ühendamisel, sest viimasel juhul on keerdude arv 2 korda väiksem.

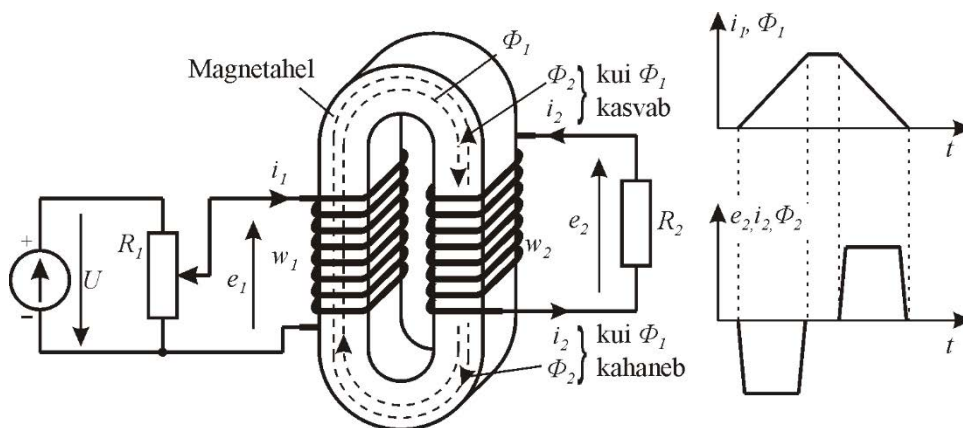
Üldjuhul on indutseeritud elektromotoorjõud määratud **Faraday seadusega**. See seadus ütleb, et **kui muutuva magnetvoog läbib juhtmekeerdu, siis indutseeritakse selles keerus elektromotoorjõud, mille suurus on võrdeline voo muutumisega ajas**. Valemi kujul avaldub Faraday seadus järgmiselt:

$$e = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (2.19)$$

kus e on tekkiv elektromotoorjõud ja Φ magnetvoog. Valemis olev miinusmärk tuleneb Lenzi reeglist indutseeritud pinge polaarsuse kohta. **Lenzi reegel** väidab, et suletud kontuuris tekkiva induksioonivoolu suund on niisugune, et tema magnetväli takistab induksioonivoolu esilekutsuvat magnetvoo muutumist. Lenzi reeglist

järeldub, et **poolil tekkiva pinge suund on alati selline, et pinge mõjul tekkiva voolu väli püüab vähendada algset voomuutust** (algsest suurenev voog väheneb tekkiva voolu välja tõttu ja algsest vähenev voog suureneb tekkiva voolu välja tõttu).

Indutseeritud voolu saamiseks mähises w_2 on selle mähisega ühendatud resistor R_2 (joonis 2.17). Tekkiva indutseeritud pinge ja voolu i_2 suund on selline, et voolust i_2 põhjustatud magnetvoo Φ_2 suund on vastupidine põhivoo Φ_1 suunale, kui põhivoog kasvab. Kui põhivoog kahaneb, on indutseeritud voolu voog põhivooga sama-suunaline. Indutseeritud voolu voog püüab põhivoo muutumist takistada.



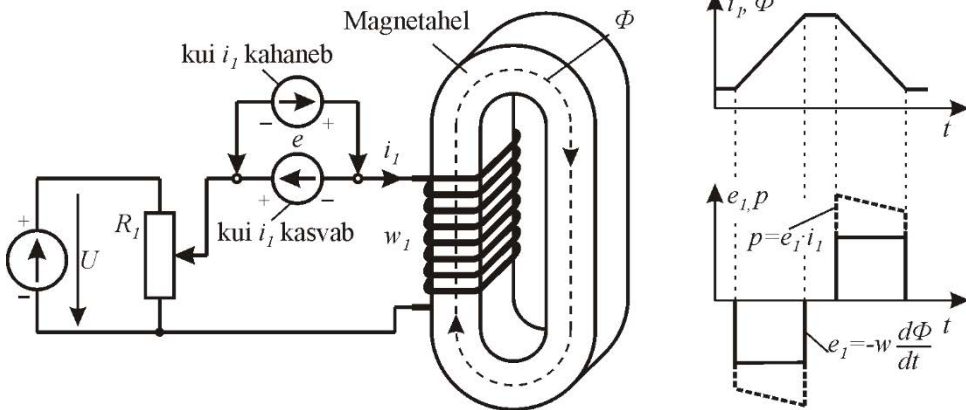
Joonis 2.17. Põhimagnetvoo Φ_1 muutumisele vastu mõjuva voo Φ_2 tekkimine indutseeritud voolu tõttu

2.2.2 Endainduktsioon ja induktiivsus

Joonisel 2.17 näidatud juhtumil on poolid w_1 ja w_2 ühel ja samal magnetahelal. Selles magnetahelas magnetvoog muutub. Tekib küsimus, kas voo muutus indutseerib elektromotoorjõu ainult mähises w_2 või ka mähises w_1 . Asja lähemal uurimisel selgub, et elektromotoorjõud indutseeritakse tõepoolest mõlemas mähises. See ei ole oluline, et mähis w_1 on ise selle muutuva magnetvoo Φ_1 põhjustaja. Mähises w_1 tekkivat elektromotoorjõudu nimetatakse **endainduktsiooni elektromotoorjõuks**. Tekkivat endainduktsiooni elektromotoorjõudu võib arvesse võtta mähisega jadamisi lülitatud pingeallikaga e (joonis 2.18).

Voolu kasvamisel on endainduktsiooni elektromotoorjõud e suunatud vastupidi toitepingele U . Voolu kahanemisel on U ja e samasuunalised. Voolu kasvamisel siseneb vool i pingeallikasse e plussklemmi kaudu. Selline voolu suund vastab energia andmisele pingeallikasse. Antud juhul antakse energiat magnetvälja, sest pingeallika pingeks on mähise endainduktsiooni elektromotoorjõud e . Magnetvälja suunduva energiavoo võimsuse hetkväärtus on

$$p = ie. \quad (2.20)$$



Joonis 2.18. Endainduktsiooni elektromotoorjõu tekkimine magnetvoo muutumisel ja sellega kaasnev energiavahetus magnetvälja ja elektriahela vahel

Voolu kahanemisel on pingeaallika polaarsus voolu suhtes vastupidine. Vool väljub pingeaallika e plussklemmist (joonis 2.18). Selline voolu suund vastab energia võtmisele pingeaallikast. Antud juhul võetakse magnetvälja salvestatud energiat ja antakse see elektriahelasse tagasi. Energiavahetus magnetvälja ja elektriahela vahel toimub endainduktsiooni elektromotoorjõu kaudu.

Miinusmärk valemis (2.19) näitab tekkiva endainduktsiooni elektromotoorjõu suunda toitepinge suhtes. Sageli jäetakse see miinusmärk siiski ära ja õige elektromotoorjõu suund leitakse hiljem teiste kriteeriumide järgi.

Mitme keeruga pooli puhul on indutseeritud elektromotoorjõud

$$e = -w \frac{d\Phi}{dt}. \quad (2.21)$$

Pooli kõigi keerdudega ahelduvate ehk keerde läbivate magnetvoogude summat nimetatakse **aheldusvooks** Ψ . Kui kõigi keerdudega aheldub ühesugune magnetvoog Φ , siis

$$\Psi = w\Phi. \quad (2.22)$$

Aheldusvoo ühik on veeber (Wb). Aheldusvoo mõiste kasutamise korral omandab valem (2.21) kuju

$$e = -\frac{d\Psi}{dt}. \quad (2.23)$$

Kui keskkonnas ei ole ferromagneetikut, on pooli magnetvoog Φ ja aheldusvoog Ψ võrdelised pooli läbiva vooluga i . Aheldusvoo ja magnetimisvoolu vahelist võrdetegurit ehk suhet

$$\Psi/i = L \quad (2.24)$$

nimetatakse **induktiivsuseks**, selle ühikuks SI-süsteemis on henri (H); $1 \text{ H} = 1 \text{ Wb/A}$. Avaldise (2.24) põhjal on aheldusvoog võrdne voolu ja induktiivsuse korrutisega.

Avaldise (2.24), (2.22), (2.17) ja (2.12) koos teisendades saame induktiivsuse jaoks seose

$$L = \frac{w^2}{R_m}, \quad (2.25)$$

kus R_m on magnetahela magnetiline takistus. See avaldis näitab, et pooli induktiivsus on võrdeline keerdude arvu ruuduga ja pöördvõrdeline magnetahela magnetilise takistusega. Magnetiline takistus sõltub keskkonna magnetilisest läbitavusest μ ja magnetahela mõõtmetest. Poolil võib magnetahel ka puududa. Siis sõltub induktiivsus ainult pooli keerdude arvust ja mõõtmetest. Seega: **induktiivsuse suurus on määratud pooli konstruktsiooni ja keskkonna omadustega**. Induktiivsus on ka pooliks kerimata tavalisel sirgel elektrijuhtmel, kuid see on siiski väike. Sirge juhtme pooliks kerimisel kasvab selle juhtme induktiivsus väga palju.

2.2.3 Induktiivpool kui energiat salvestav element elektriahelas

Avaldise (2.24) põhjal on aheldusvoog võrdne voolu ja induktiivsuse korrutisega:

$$\Psi = iL. \quad (2.26)$$

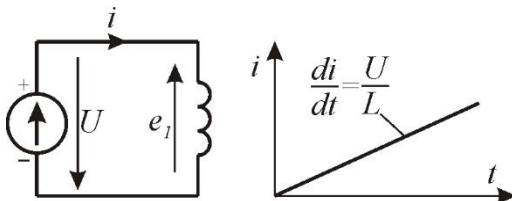
Võrdse voolu korral on suurem selle pooli aheldusvoog, mille induktiivsus on suurem. **Induktiivsus iseloomustab pooliga seotud magnetvoo kogust**.

Endainduktsiooni elektromotoorjõu võib avaldada induktiivsuse kaudu. Mitteferromagnetilises keskkonnas on μ konstantne ja ka induktiivsus L on konstantne. Sel juhul

$$u = e = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d(iL)}{dt} = L \frac{di}{dt}. \quad (2.27)$$

Pooli elektromotoorjõu e peab tasakaalustama elektriahela pingesallikas, mille pinge on U . See on näidatud joonisel 2.19, kus $U = e$. Pingesallika pinge määrab voolu kasvukiiruse

$$di/dt = U/L. \quad (2.28)$$



Joonis 2.19. Voolu kasvukiiruse selgitamiseks

Induktiivse ahela voolu muutumise kiirus on võrdeline rakendatud pingega ja pöördvõrdeline induktiivsusega. Kui ahelas puudub aktiivtakistus, kasvab vool lõpmata suureks. Reaalsuses on aktiivtakistus aga alati olemas ja see piirab voolu kasvu. Väljakujunenud oleku ehk püsitalitluse voolu saab leida Ohmi seaduse $I = U/R$ järgi.

Pool on energiat salvestav elektri ahela element. Pooli induktiivsus iseloomustab selle salvestava elemendi energiamahutavust. Pooli salvestatava magnetvälja energia W_m saab leida poolile antava hetkvõimsuse p integreerimisega ajas

$$W_m = \int p dt = \int u i dt. \quad (2.29)$$

Arvestades avaldist (2.27) ja seda, et $u = e$, saame avaldise (2.29) viia kujule

$$W_m = \int i L \frac{di}{dt} dt = L \int i di = \frac{Li^2}{2}. \quad (2.30)$$

Pooli induktiivsusel tekivad elektromotoorjõud, pooli läbiv aheldusvoog, pooli energia ja selle muutumise võimsus on kahe erineva induktiivsusega pooli jaoks näidatud joonisel 2.20,a. Paneme tähele, et elektromotoorjõu (mis on sisuliselt pinge) ja voolu kõverate kujud on joonisel 2.20,a erinevad. See tuleneb sellest, et pinge ei ole võrdeline mitte vooluga, vaid voolu muutumiskiirusega (avaldis 2.27). Aheldusvoog \mathcal{P} sõltub voolust lineaarselt, energia ja voolu vahel on aga ruut-sõltuvus. Kui energia kasvab lineaarselt, siis vool kasvab ruutsõltuvuse järgi.

Magnetvälja energia arvutusvalem on sarnane elektrivälja energia W_{el} arvutusvalemiga

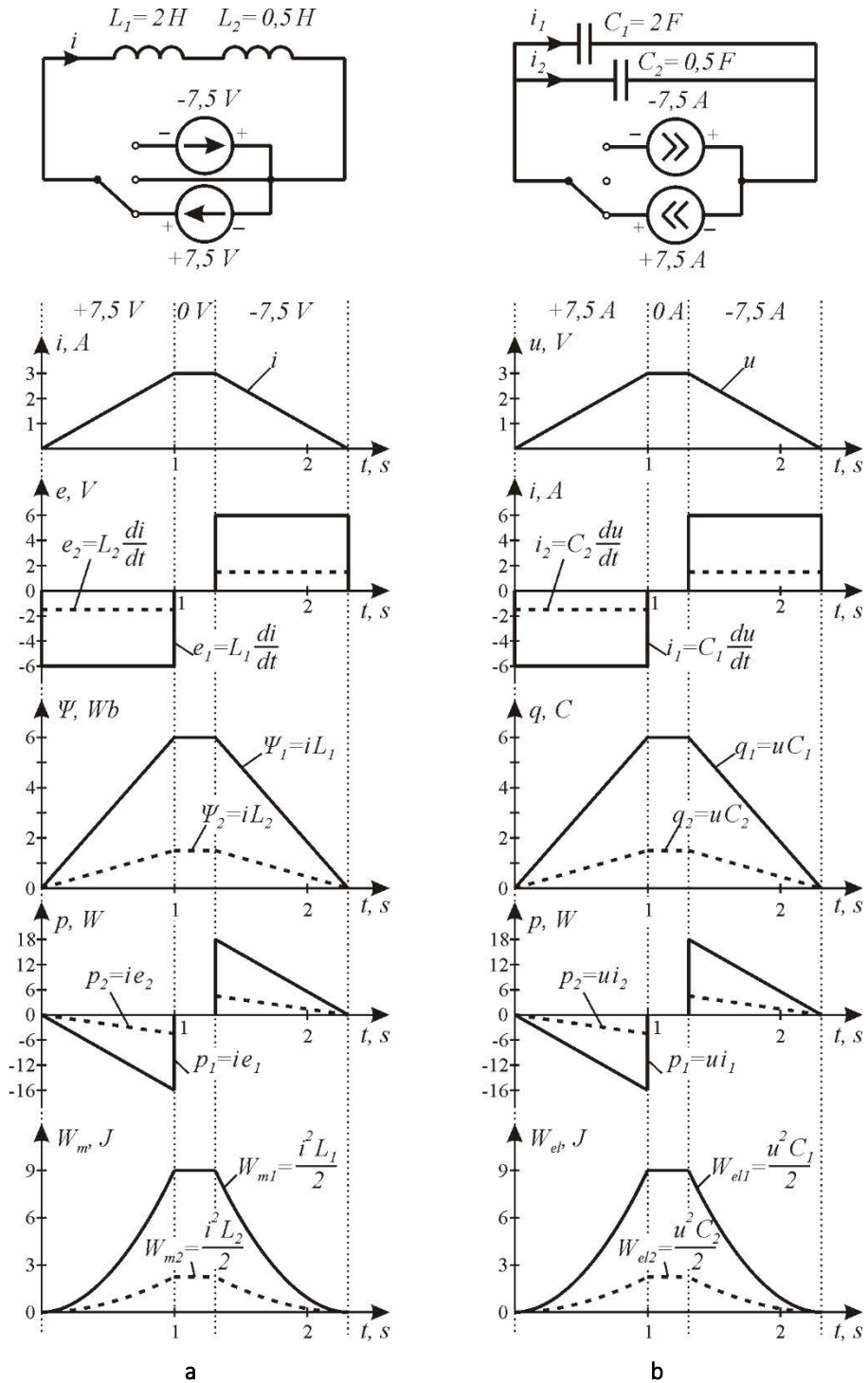
$$W_{el} = \frac{Cu^2}{2}, \quad (2.31)$$

kus C on kondensaatori mahtuvus ja u on kondensaatori pinge. Nii nagu pooli induktiivsus iseloomustab pooli energiamahutavust, iseloomustab kondensaatori mahtuvus kondensaatori energiamahutavust.

Joonisel 2.20,b on näidatud kahe kondensaatori C_1 ja C_2 laadimine konstantse vooluga. Induktiivse ja mahtvusliku ahela ostsillogrammid on sarnased. Voolule vastab pinge ja ka vastupidi. Aheldusvoole \mathcal{P} vastab laeng q . Arvutusvalemid on analoogilised. Induktiivne ahel ja mahtvuslik ahel on duaalsed ahelad. Induktiivpool ja kondensaator või siis mingi elektriseadme osa induktiivsus ja mahtuvus on energiasalvestid. Seevastu takisti või mingi elektriseadme osa takistus on energia muundur, sest muudab elektrienergia soojusenergiaks.




Takisti, induktiivpool ja kondensaator on elektrotehnika põhiobjektid. Need on käegakatsutavalt materiaalsed objektid. Vool, magnetvoog, magnetväli ja elektriväli on samuti objektid, kuid nende materiaalsus ei ole käegakatsutav. Neid võib lugeda mateeria erivormiks.

Ruum, aeg ja energia esinevad elektrotehnilistes põhiseostes samuti objekti funktsioonis. Näiteks on juhtmes indutseeritud pinge väärtus otseses sõltuvuses ruumist ja ajast (juhtme pikkusest ja tema liikumiskiirusest). Elektrotehnika põhiobjektid on koondatud tabelisse 2.3, kus on toodud ka nende objektide lühiiseloomustus ja põhiparameetrid koos mõõtühikutega.

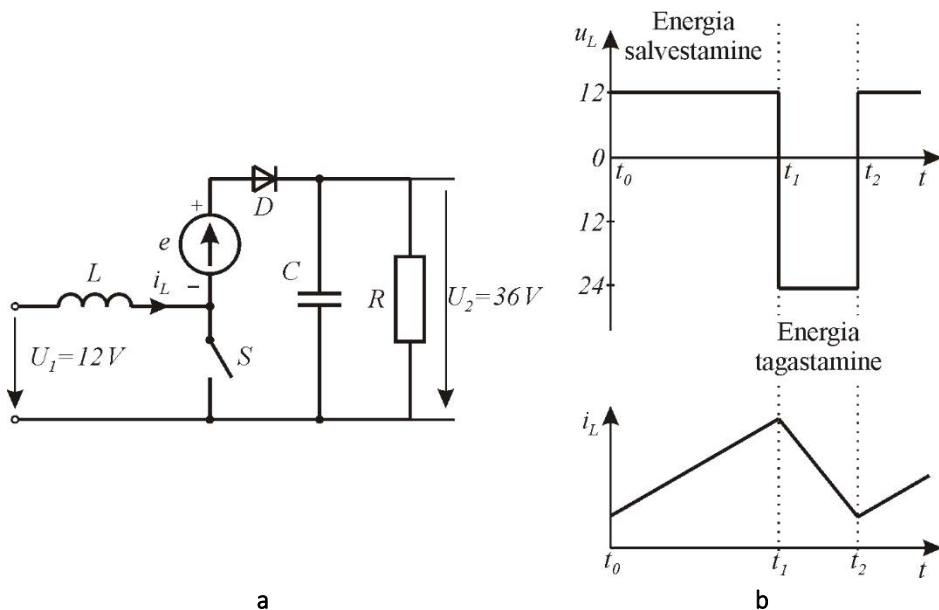


Joonis 2.20. Energia salvestamine induktiivpoolidesse ja kondensaatoritesse

Tabel 2.3 Elektrotehnika põhiobjektid

| Objekti liik | Materiaalne | | | | Mittemateriaalne | | | | | | |
|------------------------|---|---|---|---|---|--|---|------------------------------------|---|--------------------|---------|
| | Objekt | Takisti | Induktiivpool | Kondensaator | Vool | Magnetvoog | Magnetväli | Elektriväli | Ruum | Aeg | Energia |
| Objekti iseloomustus | Muundab elektrienergia soojusenergiaks. Tekitab voolu mõjul pingelangu | Magnetvälja energia salvesti | Elektrivälja energia salvesti | Elektrilaengute liikumine ruumis. Tekitab magnetvälja | Hüpooteetiliste magnetlaengute liikumine ruumis | Ruumi omaduste muutus, mis avaldub indutseeritud jõu ja pinge tekkes | Ruumi omaduste muutus, mis avaldub laetud osakestele mõjuva jõuna | | | | |
| Elektriskeemitingmärk |  |  |  | | | | | | | | |
| Põhi- parameetrid | Takistus | Induktiivsus Induktiiv- takistus | Mahtuvus Mahtuvus- takistus | Voolu- tugevus Voolu- tihedus | Magnetvoo tugevus Magnetvälja tihedus | Magnetvälja tugevus Magneetimis- ergutus Magnetomotoorjõud | Elektrivälja tugevus Pinge Elektro- motoorjõud | Pikkus Pindala Ruumala | Ajaintervall Periood Sagedus Nurksagedus | Energia Võimsus | |
| Parameetrite tähsed | R | L x_L | C x_C | I J | Φ B | H Hl F_m | E U E | l A V | Δt T f ω | W P | |
| Mõõtühik | oom | henri oom | farad oom | amper amper ruutmeetri kohta | veeber veeber ruutmeetri kohta (Tesla) | amper meetri kohta amper amper | volt meetri kohta volt volt | meeter ruutmeeter kuupmeeter | sekund herts radiaani sekundis | džaul vatt | |
| Mõõtühiku tähis | Ω | H Ω | F Ω | A A/m^2 | Wb Wb/m^2 (T) | A/m A A | V/m V V | m m^2 m^3 | s Hz rad/s | J W | |

Mahtuvusi ja induktiivsusi kasutatakse elektrienergia muundamisel. Elektrienergia salvestamist pooli magnetvälja võib teha mingil ühel pingel, näiteks U_1 , kuid pooli salvestatud energia tagastamist magnetväljast elektriahelasse ükskõik millisel teisel pingel. Seda võimalust kasutatakse alalispinge muundamiseks. Lisaks induktiivsusele L kasutatakse sellises muunduris lülitit S (joonis 2.21,a). Ajamomendil t_0 lülitit S suletakse, sellega lülitatakse pool toiteallika pingele 12 V . Vool poolis hakkab kasvama kiirusega $di_L/dt = U_1/L$ (vt joonis 2.21,b). See kestab ajamomendist t_0 kuni ajamomendini t_1 , mil lülitit S avatakse.



Joonis 2.21. Magnetvälja kasutamine pinget tõstvas impulssmuunduris

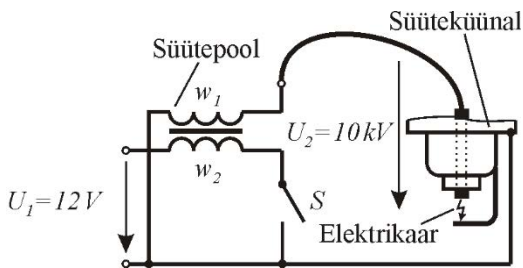
Pooli vool i_L ei saa hetkeliselt muutuda, sest ta on seotud magnetvälja energiaga. Küll aga saab hetkeliselt muutuda pooli endainduktsiooni elektromotoorjõud e , mis muutub Faraday seaduse järgi. Kui vool i_L püüab pärast lülitit S avamist hakata vähenema, tekib hüppeliselt endainduktsiooni elektromotoorjõud e , mis on joonisel 2.21,a näidatud virtuaalse pingeaallikana. Tekkiv elektromotoorjõud on täpselt nii suur, et lülitusmomendile t_1 järgneval ajamomendil säilitab vool i_L sama väärtuse, mis tal oli lülitusmomendile t_1 eelnenud ajamomendil. Lülitusmomendist t_1 edasi kulgeb vool i_L aga uues ahelas, mis on järgmine: pingeaallika U_1 plussklemm – pool L – virtuaalne pingeaallikas e – avatud diod D – rööbiti ühendatud kondensaator C ja koormustakisti R – pingeaallika U_1 miinus klemm. Vool väljub virtuaalse pingeaallika plussklemmist, mis näitab, et energiat viiakse pooli magnetväljast välja.

Virtuaalse pingeaallika elektromotoorjõu suurus on Kirchhoffi pingeseaduse järgi võrdne kondensaatori C pinge (milleks on muunduri väljundpinge $U_2 = 36\text{ V}$) ja muunduri sisendpinge ($U_1 = 12\text{ V}$) vahega. Seega antud juhul $e = U_2 - U_1 = 24\text{ V}$, kui mitte arvestada väikest pingelangu avatud diodil D . Vool poolis kahaneb ja voolu kahanemise kiirus on $di_L/dt = (U_1 - U_2)/L$.

Ajajomendil t_2 suletakse lüliti uuesti ja tsükkel kordub. Magnetvälja hakkatakse uuesti energiat andma ja pooli vool hakkab jälle kasvama. Seega toimub tsükliline magnetvälja energia andmine pooli ühel ajaintervallil ühel pingel ja magnetvälja energia tagastamine elektriahelasse teisel ajaintervallil teisel pingel. Sellist muundurit nimetatakse pinget tõstvaks impulssmuunduriks (*boost converter*).

Pinge, mille juures toimub energia tagastamine magnetväljast elektriahelasse, ei ole määratud ei pooli induktiivsuse ega ka pooli vooluga. Selle pinge määrab elektri-ahel, millesse pooli energiat antakse. Kui elektri-ahela pinge on väga kõrge, siis on voolu kahanemise kiirus väga suur ja vool muutub kiiresti nulliks. Selline olukord esineb elektri-ahela katkestamisel tavalise kontaktidega lülitiga. Igas elektri-ahelas on induktiivsus ja ahela katkestamisel tekib lüliti kontaktidel nii kõrge pinge, et avanevate kontaktide vahel toimub õhklahendus – lühiajaline elektrikaar ehk säde.

Mõnel juhul on vaja teatud kindlaks otstarbeks sädet tekitada, näiteks autodes kasutatavates bensiinimootorites. Selleks kasutatakse kahemähiselist pooli (nn süütepooli), millel on väikese keerdude arvuga mähis w_2 ja suure keerdude arvuga mähis w_1 (joonis 2.22).



Joonis 2.22. Bensiinimootori süüteküünla sädeme tekitamine magnetvälja salvestatud energia arvel

Lüliti S, milleks on katkesti kontakt või transistorlüliti, sulgemisel rakendub mähisele w_2 12-voldine akupinge. Siis toimub energia viimine akust süütepooli magnetvälja. Lüliti S avanemisel tekib nii mähises w_1 kui ka mähises w_2 pinge. Kuna mähise w_1 keerdude arv on mitusada korda suurem kui mähisel w_2 , tekib süüteküünla elektrodide vahel läbilöökk enne kui lülitis S. Seega viiakse magnetvälja energia poolist välja mähise w_1 voolu kaudu, ehkki eelmisel ajaintervallil viidi sinna energia mähise w_2 voolu kaudu.

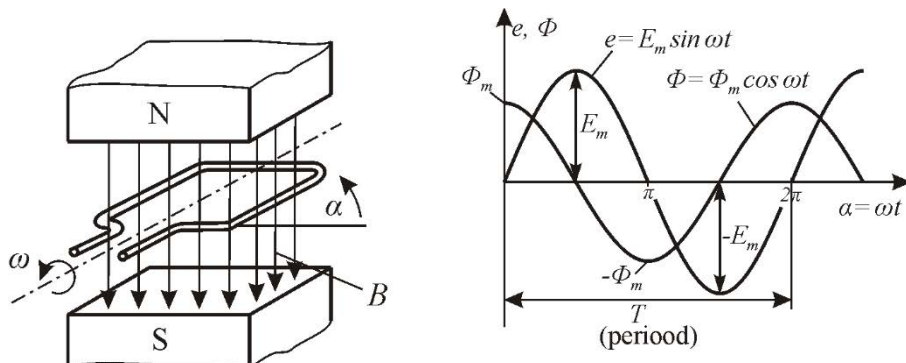
2.2.4 Ajas muutuva magnetvoo saamine homogeenses magnetväljas pöörleva raami abil. Siinuspinge ja siinusvool

Tavaliselt kasutatakse elektri-ahelates siinuspinget. Siinuspinge tekib, kui pool pöörleb homogeenses magnetväljas konstantse kiirusega ω . Joonisel 2.23 on kujutatud ühekeerulise pooli pöörlemist.

Pooli pöörlemisel muutub teda läbiva magnetvoo suurus. Kui pooli tasapind on jõujoontega risti ($\alpha = 0^\circ$), on magnetvoog maksimaalne:

$$\Phi_m = BA, \quad (2.32)$$

kus B – magnetvoo tihedus, Wb/m^2 ;
 A – pooli pindala, m^2 ;
 Φ_m – magnetvoo amplituudväärtus, Wb .



Joonis 2.23. Siinuselektromotoorjõu tekkimine

Kui pooli tasapind on magnetvälja jõujoontega rööbiti ($\alpha = 90^\circ$), võrdub pooli läbiv magnetvoog nulliga:

$$\Phi = 0.$$

Üldjuhul avaldub pooli pöörlemisel teda läbiv magnetvoog järgmiselt:

$$\Phi = \Phi_m \cos \alpha. \quad (2.33)$$

Kui pooli tasapind on jõujoontega risti, siis $\alpha = 0^\circ$ ja $\cos \alpha = 1$. Kui aga pooli tasapind on jõujoontega rööbiti, siis $\alpha = 90^\circ$ ja $\cos \alpha = 0$.

Nurk α kasvab ajas ühtlaselt. Nurga üldavaldis on

$$\alpha = \omega t, \quad (2.34)$$

kus ω on pöörlemise nurkkiirus, rad/s .

Ühe pöörde jooksul on nurga α muutus 2π radiaani. Ühe pöörde tegemiseks kuluv aeg on

$$t_{\text{pööre}} = \frac{\alpha}{\omega} = \frac{2\pi}{\omega} = T. \quad (2.35)$$

Ühe pöörde tegemiseks kuluvat aega nimetatakse ka **perioodiks**, mille tähis on T . Perioodi pikkust mõõdetakse sekundites. Perioodi pöördväärtust nimetatakse **sageduseks**:

$$f = \frac{1}{T}. \quad (2.36)$$

Sageduse mõõtühik on **herts** (Hz); $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$.

Sagedus näitab perioodide arvu ühes sekundis, mis antud juhul on poolikeeru pöörde arv sekundis. Pooli läbiva magnetvoo avaldise võime kirjutada ka kujul, kus nurk α on asendatud ajaga t ja nurksagedusega ω :

$$\Phi = \Phi_m \cos \omega t . \quad (2.37)$$

Keerdu läbiva magnetvoo muutus tekitab selles keerus elektromotoorjõu

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} .$$

Et magnetvoog muutub avaldise (2.37) järgi, siis kujuneb selles keerus indutseeritud elektromotoorjõu avaldis järgmiseks:

$$e = - \frac{d(\Phi_m \cos \omega t)}{dt} = \omega \Phi_m \sin \omega t . \quad (2.38)$$

Kui $\sin \omega t = 1$, siis on elektromotoorjõud maksimaalne:

$$E_m = \omega \Phi_m , \quad (2.39)$$

E_m on siinuselektromotoorjõu **amplituudväärtus**. Elektromotoorjõu väärtust e mingil ajamomendil nimetatakse **hetkväärtuseks**:

$$e = E_m \sin \omega t . \quad (2.40)$$

Kui siinuselektromotoorjõu allikat koormata aktiivtakistusega, tekib ahelas siinusvool, mille kõver on kirjeldatav analoogilise valemiga:

$$i = I_m \sin \omega t . \quad (2.41)$$

Vahelduvvoolu ja -pinge hetkväärtused muutuvad pidevalt nulli ja amplituudväärtuse vahel. Võrreldes alalisvooluga on olukord erinev. Praktikas on sageli vaja võrrelda alalisvoolu ja vahelduvvoolu mõju efektiivsust. Näiteks põleb tavaline hõõglamp nii alalisvoolu kui ka vahelduvvoolu korral. Kui alalisvoolu korral on lambi nimivool näiteks 1 A, siis sama võimsuse saamiseks peab vahelduvvoolu amplituudväärtus olema suurem. Erisuse arvestamiseks on kasutusele võetud vahelduvvoolu **efektiivväärtuse** mõiste, mis on määratletud järgmiselt: **vahelduvvoolu efektiivväärtus on võrdne niisuguse alalisvooluga, mis samas takistis sama ajavahemiku jooksul eraldab sama suure soojushulga.**

On võimalik näidata, et siinusvoolu efektiivväärtuse I_{ef} ja amplituudväärtuse I_m seos on järgmine:

$$I_{ef} = I_m / \sqrt{2} = 0,707 I_m . \quad (2.42)$$

Analoogiliselt kasutatakse ka siinuspinge efektiivväärtust

$$U_{ef} = U_m / \sqrt{2} = 0,707 U_m . \quad (2.43)$$

Euroopa riikides jäetakse harilikult indeks „ef“ ära. Voolu efektiivväärtuse tähiseks on lihtsalt I ja pinge efektiivväärtuse tähiseks U . Ameerikas kasutatakse sagedamini efektiivväärtust näitavat indeksit „rms“ (*root-mean-square*), näiteks tähistab I_{rms} voolu efektiivväärtust. Kui vahelduvvoolu võrgupinge on 230 V, siis selle pinge amplituudväärtus on $U_m = \sqrt{2}U = \sqrt{2} \cdot 230 = 325$ V.

Kui sama sagedusega siinuskõverad on võrdse algfaasiga, siis öeldakse, et **nad on faasis**. Kui algfaaside vahe on $\pm\pi$, siis öeldakse, et **nad on vastufaasis**. **Siinus-suurus on määratud, kui on teada selle amplituudväärtus, sagedus ja algfaas**.

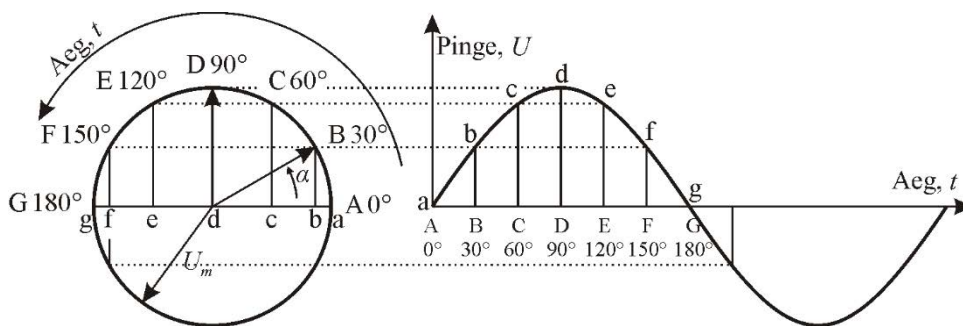
2.2.5 Faasivektorite diagramm ehk faasordiagramm

Graafiliselt kujutatakse siinussuurst kas sinusoidina nagu nägime eespool või pöörleva faasivektori ehk faasorina. Sinusoidi joonestamine on tülikam. Pealegi kaob ülevaatlikkus, kui sinusoidide on palju. Seepärast kasutavad elektrikud enamasti faasordiagrammi ehk faasivektorite diagrammi, mis on lihtsam ja ülevaatlikum kui sinusoidid.

Nimetus faasivektorite diagramm on küll täpne, kuid pikk ja kohmakas. Varem öeldi lihtsalt vektordiagramm – nii on vanemates õpikutes, kuid see nimetus on ebatäpne. Harilikult mõeldakse vektori all pikkuse ja suunaga ruumivektorit (vektor punktist A punkti B) või mõnda füüsikalist suunaga suurust (näiteks vektor õhu liikumiskiiruse ja suuna iseloomustamiseks).

Siinuslaine iseloomustamiseks lihtsustatud kujul kasutatakse aga faasivektorit ehk faasorit. Siinuslaine amplituudi ja faasi vaadeldakse staatilisena, kusjuures amplituud viiakse vastavusse ruumivektori pikkusega ja faas ruumivektori suunaga. Kui panna selline ruumivektor tasapinnal oma alguspunkti ümber pöörlema, saab interpreteerida ka siinuslaine hetkväärtusi. Selline pöörlev vektor ongi siis faasivektor ehk faasor. Pöörleva vektori faasinurk ja aeg hakkavad siinuslaine ostsillogrammil muutuma koos. Ostsillogrammil olevat aega võib selle tõttu mõõta mitte ainult sekundites, vaid ka nurga mõõtühikutes – kas kraadides või radiaanides.

Sinusoidil on ajatelg. Aja voolu kujutatakse kulgliikumisenä mööda horisontaal- telge. Lõigud AB, BC jne joonise 2.24 ajateljel kujutavad endast ajaintervalle. Siinuskõvera punktide kaugused ajateljest Bb, Cc jne näitavad pinge hetkväärtust.



Joonis 2.24. Siinuskõverate asendamine faasoritega

Faasordiagrammil on aja kulgliikumine asendatud pöörleva liikumisega. Pöörlema on pandud aeg. Ajaintervalle kujutavad pöörleva pingevektori ehk faasori U_m poolt moodustatud nurgad (joonisel nurk α) ja samaväärselt ka pöörleva pingevektori ots- punkti poolt läbitud teepikkused (kaar AB). Joonisel on kaar AB pikkuselt võrdeline

ajatelje lõiguga AB. Pinge hetkväärtust näitab pöörleva vektori otspunkti kaugus ajateljest (lõigud Bb, Cc jne). Pöörleva vektori otspunkti kaugus x -teljest muutub siinusseaduse järgi. Joonisel oleva geomeetrilise konstruktsiooni põhjal on näiteks

$$\text{lõik Bb} = U_m \sin \alpha = U_m \sin 30^\circ = 0,5 U_m;$$

$$\text{lõik Cc} = U_m \sin 60^\circ = 0,866 U_m;$$

$$\text{lõik Dd} = U_m \sin 90^\circ = U_m \text{ (pinge amplituudväärtus).}$$

U_m on joonisel oleva faasori pikkus, mis on pingega seotud mõõduteguri kaudu, mõõdutegur võib olla näiteks $m_U = 10 \text{ V/mm}$. Loetakse, et faasor pöörleb ühtlase kiirusega vastupäeva. Võib ka ette kujutada, et faasor on paigal, aga joonise tasapind pöörleb päripäeva. Sisuliselt on see sama. Pöörlemiskiiruse määrab vahelduvvoolu sagedus. Sagedusel 50 Hz teeb pingefaasor 50 pööret sekundis ja läbib seejuures nurga 314 radiaani ehk $18\,000^\circ$.

Tavaliselt tuntakse huvi üksikute suuruste vahelise faasinihke vastu. Faasordiagrammi koostamisel võib vabalt valida esimese faasori suuna. Teisi faasoreid tuleb siis selle suhtes pöörata nurga võrra, mis on võrdne vastava suuruse faasinihkega.

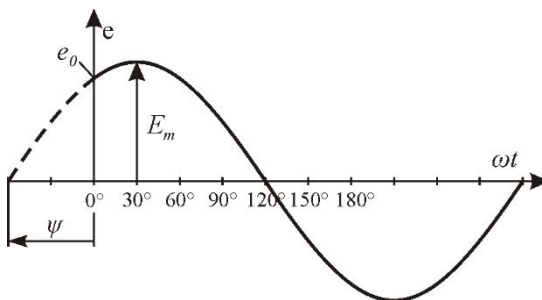
Faasordiagrammil saab erinevate algfaaside ja amplituudidega faasoreid liita vektoralgebra meetoditega. See on palju lihtsam, kui kahe voolu- või pingekõvera järgi kolmanda konstrueerimine.

2.2.6 Faasinurk ja faasinihe

Võrkulülitamise hetkel, kui $t = 0$, ei pruugi võrgupinge omada nullväärtust. Üsna suure tõenäosusega α ei ole null, vaid on mingi muu väärtusega. Selle väärtuse tähiseks on harilikult ψ ja seda nimetatakse **algfaasinurgaks** ehk **algfaasiks** (joonis 2.25). Siis

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi). \quad (2.44)$$

Algfaasinurgaks ehk **algfaasiks** nimetatakse elektrilist nurka ψ , mis on möödunud perioodi algusest vaatluse alghetkeni, mida tähistab teljestiku nullpunkt.



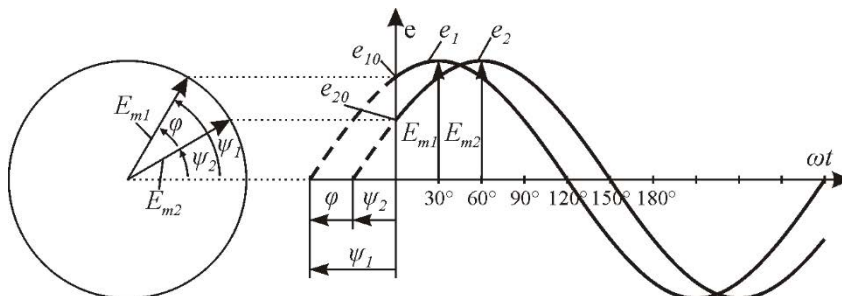
Joonis 2.25. Siinuskõvera algfaas ψ

Ajahetkel $t = 0$, mis on joonisel vaatluse alguspunktiks, on elektromotoorjõu perioodi algusest möödunud 60° ehk $\pi/3$. Sel hetkel $\omega t = 0$ ja elektromotoorjõu **alghetkväärtus** on

$$e_0 = E_m \sin \psi. \quad (2.45)$$

Positiivne algaas jääb koordinaatide alguspunktist vasakule, negatiivne – paremale.

Kui kaks sama sagedusega siinuskõverat, näiteks kahe eri generaatori pinged, on teineteise suhtes ajaliselt nihutatud, räägitakse **faasinihkest** ja **faasinihkenurgast**. Joonisel 2.26 on faasinihe 30° .



Joonis 2.26. Faasinihe kahe siinuselise elektromotoorjõu kõvera vahel

Faasilt ees olev on see siinus, mille periood algab varem ja **faasilt maha jääv** on see, mille periood algab hiljem. Antud joonisel on elektromotoorjõud e_1 faasilt elektromotoorjõust e_2 ees, ehk teisiti öeldes, emj e_2 jääb emj-st e_1 faasilt maha.

Pinge ja voolu vahelise faasinihkenurga tähiseks on kreeka väiketäht φ . See nurk võib olla mõõdetud kas amplituud- või nullväärtuste vahel. Üldisemalt

$$\varphi = \psi_1 - \psi_2,$$

kus φ – faasinihkenurk;
 ψ_1 – pinge siinuskõvera algaas;
 ψ_2 – voolu siinuskõvera algaas.

3 VAHELDUVVOOLUAHELATE PÕHIMÕISTED

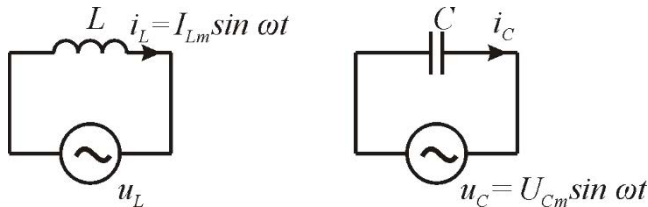
Vahelduvvoolumasinaid toidetakse kas ühe- või kolmefaasilise vahelduvvooluga. Vahelduvvooluahelate arvutamisel on vaja kasutada teistsugust meetodikat, kui alalisvooluahelate arvutamisel. Põhjus on selles, et induktiivsus ja mahtuvus avaldavad vahelduvvoolule hoopis teistsugust takistust kui alalisvoolule.

Vahelduvvooluahelates esineb ka eripärane võimsuse liik. See on reaktiivvõimsus. Kui aktiivvõimsuse energiavoog on ühesuunaline (aktiivvõimsus siseneb elektri-ahelasse ja väljub sealt), siis reaktiivvõimsuse energiavoog pendeldab elektri-ahelas edasi-tagasi. Näiteks induktiivsusesse salvestatud magnetvälja energia läheb elektri-ahela kaudu kondensaatorisse, kus ta salvestub elektrivälja energia kujul ja järgmisel poolperioodil läheb see energia jälle induktiivsusesse tagasi.

Trafod ja vahelduvvoolumootorid vajavad oma töös ka reaktiivvõimsust. Vahelduvvooluahelate teooria tundmine on nendes seadmetes toimuvatest protsessidest arusaamise vajalik eeldus.

3.1 Induktiivsus ja mahtuvus vahelduvvooluahelas. Reaktiivtakistus

Olgu meil kaks lihtsat ahelat. Üks on siinuspingele lülitatud induktiivsus L ja teine siinuspingele lülitatud mahtuvus C (joonis 3.1).



Joonis 3.1. Siinuspingele lülitatud induktiivsus ja mahtuvus

Meid huvitab, kuidas leida neis ahelates tekkivat voolu. Eelnevast on teada voolu ja pinge vahelised diferentsiaalsõltuvused. Induktiivsuse puhul $u = L di/dt$ ja mahtuvuse puhul $i = C du/dt$. Eeldame, et induktiivsuses on siinusvool

$$i_L = I_{Lm} \sin \omega t . \quad (3.1)$$

Sellise voolu tõttu tekib induktiivsusel pinge

$$u_L = L \frac{di}{dt} = L \frac{d(I_{Lm} \sin \omega t)}{dt} = \omega L I_{Lm} \cos \omega t . \quad (3.2)$$

Analoogiliselt saame leida mahtuvuse korral tekkiva voolu

$$i_C = C \frac{du}{dt} = C \frac{d(U_{Cm} \sin \omega t)}{dt} = \omega C U_{Cm} \cos \omega t . \quad (3.3)$$

Avaldised (3.2) ja (3.3) kirjeldavad siinussuursusi. Järelikult tekib nii induktiivsuses kui ka mahtuvuses siinusvool, kui nad on lülitatud siinuspingele. Kordajad avaldises (3.2) määravad ilmselt induktiivsuse pinge amplituudväärtuse

$$\omega L I_{Lm} = U_{Lm} \quad (3.4)$$

ja kordajad avaldises (3.3) kondensaatori voolu amplituudväärtuse

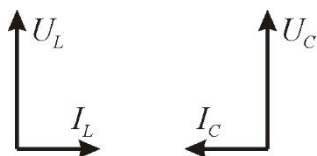
$$\omega C U_{Cm} = I_{Cm} . \quad (3.5)$$

Et $\cos \omega t = \sin(\omega t + \pi/2)$, võime diferentseerimisel saadud koosinusfunktsioonid asendada siinusfunktsioonidega. Asendamise tulemusena saame avaldised (3.2) ja (3.3) kirjutada kujul

$$u_L = U_{Lm} \sin(\omega t + \pi/2) , \quad (3.6)$$

$$i_C = I_{Cm} \sin(\omega t + \pi/2) . \quad (3.7)$$

Avaldisest (3.6) järeldub, et induktiivahela pingefaasor U_L on nurga $\pi/2$ võrra ees volufaasorist I_L , sest $i_L = I_{Lm} \sin \omega t$. Avaldisest (3.7) järeldub, et mahtvusliku ahela volufaasor I_C on nurga $\pi/2$ võrra ees pingefaasorist U_C . Seda on näidatud joonisel 3.2.



Joonis 3.2. Voolufaasori asend pingefaasori suhtes induktiivses ja mahtvuslikus ahelas

Avaldisest (3.4) teisendamisel saame induktiivse ahela pinge ja voolu amplituudväärtuste suhte, mille võime edasi teisendada efektiivväärtuste suhteks

$$\frac{U_{Lm}}{I_{Lm}} = \frac{\sqrt{2}U_L}{\sqrt{2}I_L} = \frac{U_L}{I_L} = \omega L . \quad (3.8)$$

Avaldisest (3.5) analoogilisel teisendamisel saame

$$\frac{U_{Cm}}{I_{Cm}} = \frac{U_C}{I_C} = \frac{1}{\omega C} . \quad (3.9)$$

Alalisvoolu ahelas määrab pinge ja voolu suhe takistuse. Avaldised (3.8) ja (3.9) kirjeldavad samuti pinge ja voolu suhet, järelikult kujutavad võrduste paremad pooled ωL ja $1/\omega C$ vahelduvvoolutakistust ehk reaktiivtakistust. Neid reaktiivtakistusi tähistatakse järgmiselt:

$$\omega L = x_L , \quad (3.10)$$

$$\frac{1}{\omega C} = x_C . \quad (3.11)$$

Siin x_L on **induktiivtakistus** ehk **induktiivne reaktiivtakistus** ja x_C on **mahtvus-**
takistus ehk **mahtvuslik reaktiivtakistus**. Nii induktiiv- kui ka mahtvus- takistust nimetatakse üldiselt **reaktiivtakistuseks** ehk lihtsalt **reaktantsiks**, mille tähiseks on x .

Avaldised (3.8) ja (3.9) võib kirjutada ka kujul

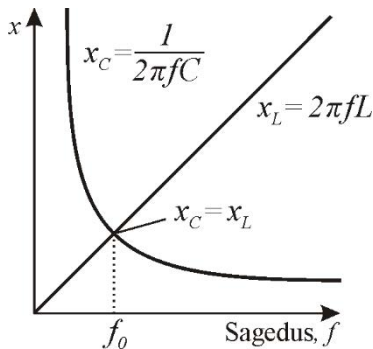
$$x_L = U_L/I_L \quad (3.12)$$

ja

$$x_C = U_C/I_C . \quad (3.13)$$

Avaldised (3.12) ja (3.13) väljendavad Ohmi seadust vahelduvvooluahelas.

Induktiivtakistus x_L kasvab sageduse f kasvades (joonis 3.3). Mahtuvustakistus x_C aga väheneb sageduse kasvades. Kui meil on mingi induktiivsus L ja mingi mahtuvus C , siis leidub alati teatud sagedus f_0 , mille juures induktiivtakistus ja mahtuvustakistus saavad võrdseks. Seda sagedust nimetatakse **resonantssageduseks**.



Joonis 3.3. Induktiiv- ja mahtuvustakistuse sõltuvus sagedusest

Nullsagedusel ehk alalispingel on induktiivtakistus võrdne nulliga ja mahtuvustakistus võrdne lõpmatussega. Kõrgetel sagedustel on vastupidi – induktiivtakistus muutub suureks ja mahtuvustakistus väikeseks.

3.2 Segatakistus vahelduvvooluahelas. Näivtakistus

Kui jadamisi on ühendatud aktiivtakistus r ja induktiivsus L (joonis 3.4,a), läbib neid elemente üks ja sama vool I .

See vool tekitab takistil r pingelangu $U_r = Ir$. See pingelang on vooluga samas faasis (faasorid U_r ja I joonisel). Vool I tekitab induktiivsusel pingelangu $U_L = Ix_L$. Induktiivsuse pingefaasor U_L on voolufaasorist I 90° võrra ees. Järelikult on induktiivsuse ja takistuse pingefaasorid U_L ja U_r teineteise suhtes 90° võrra nihutatud. Nende faasorite geomeetiline summa peab aga võrduma pingevalgiga U :

$$\vec{U}_L + \vec{U}_r = \vec{U} . \quad (3.14)$$

Faasorite geomeetrisel liitmisel saame **pingete kolmnurga** (joonis 3.4,a), kus U_L ja U_r on kaatedid ja U on hüpotenuus. Selle kolmnurga põhjal

$$U = \sqrt{U_r^2 + U_L^2} . \quad (3.15)$$

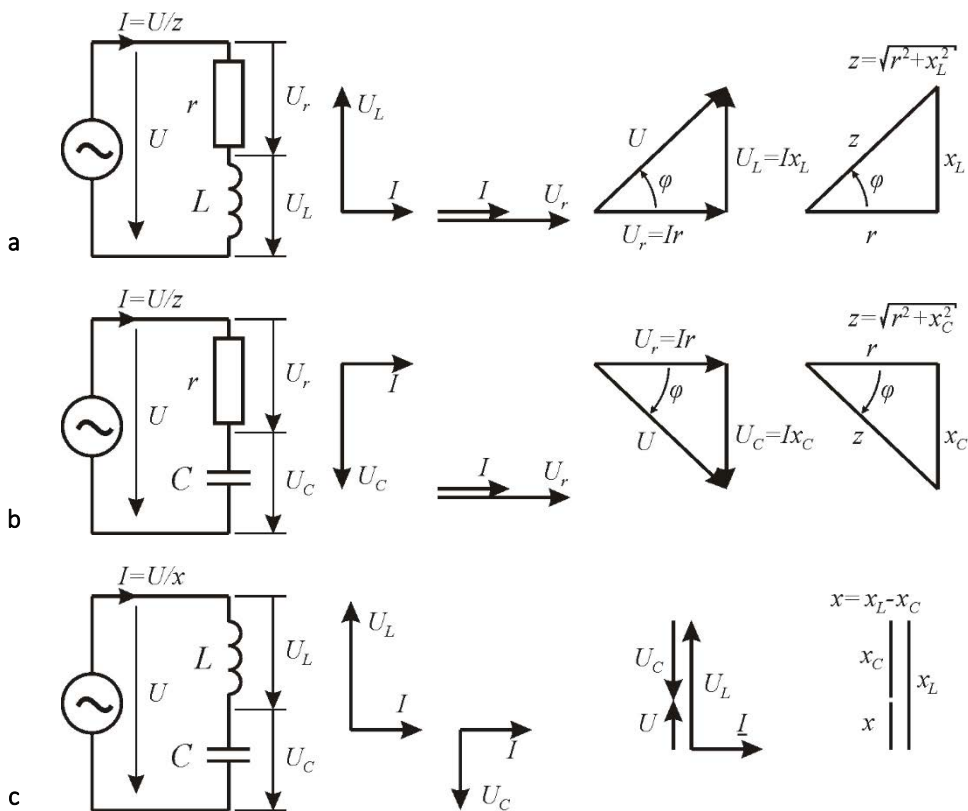
Pingekolmnurgalt saame üle minna pingekolmnurgaga sarnasele **takistuste kolmnurgale**, kui jagame kõiki kolme pinget U_r , U_L ja U vooluga I . Sealjuures $U_r/I = r$, $U_L/I = x_L$ ja

$$U/I = z , \quad (3.16)$$

kus z on ahela **näivtakistus** ehk **impedants**. Näivtakistust mõõdetakse samuti oomides. Näivtakistus määrab ära ahelas tekkiva voolu. Näivtakistuse suuruse saab leida aktiivtakistuse r ja induktiivtakistuse x_L kaudu nende geomeetrilise summana:

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2}. \quad (3.17)$$

Voolu leidmiseks joonisel 3.4,a kujutatud ahelas leiame algul avaldise (3.17) järgi näivtakistuse z ja seejärel avaldise (3.16) põhjal voolu I .



Joonis 3.4. Aktiiv- ja induktiivtakistuse (a), aktiiv- ja mahtuvustakistuse (b) ning induktiiv- ja mahtuvustakistuse (c) jadaühendus

Näide

Kui joonisel 3.4,a kujutatud ahelas on pinge $U = 230$ V, sagedus $f = 50$ Hz, takistus $r = 45 \Omega$ ja induktiivsus $L = 0,1$ H, saame voolu I leida järgmiselt.

1. Leiame induktiivtakistuse

$$x_L = \omega L = 2\pi f L = 2\pi \cdot 50 \cdot 0,1 = 31,4 \Omega.$$

2. Leiame näivtakistuse

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2} = \sqrt{45^2 + 31,4^2} = 54,9 \Omega.$$

3. Leiame voolu

$$I = U/z = 230/54,9 = 4,2 \text{ A} .$$

Faasinihkenurga φ pinge ja voolu vahel saame leida nii pingekolmnurgast kui ka takistuste kolmnurgast:

$$\cos \varphi = U_r/U = r/z . \quad (3.18)$$

Kui jadamisi on ühendatud aktiivtakistus r ja mahtvus C (joonis 3.4,b), läbib neid elemente samuti üks ja sama vool. See vool tekitab samuti mõlemal elemendil pingelangu. Eelneva juhtumiga võrreldes on siin see erinevus, et mahtuvuse pingefaasor U_C on voolufaasorist I 90° võrra järel. Mahtuvuse ja takistuse pingefaasorid U_C ja U_r on teineteise suhtes 90° võrra nihutatud ja neid on vaja liita samuti geometriliselt. Geomeetrisel liitmisel saame pingete kolmnurga (joonis 3.4,b) ja selle kaudu takistuste kolmnurga. Takistuste kolmnurgast saab analoogiliselt leida näivtakistuse

$$z = \sqrt{r^2 + x_C^2} . \quad (3.19)$$

Kui jadamisi on ühendatud mahtvus C ja induktiivsus L (joonis 3.4,c), läbib neid elemente jällegi üks ja seesama vool I . See vool tekitab neil elementidel pingelangud, kusjuures mahtuvuse pingefaasor U_C on voolust 90° võrra taga ja induktiivsuse pingefaasor U_L voolust 90° võrra ees. Faasorite U_C ja U_L omavaheline nihkenurk on seega kaks korda 90° ehk 180° . Seega on faasorid U_C ja U_L samasihilised, kuid vastassuunalised. Nende faasorite summa peab võrduma toitepingega U :

$$\vec{U}_C + \vec{U}_L = \vec{U} . \quad (3.20)$$

Faasorite liitmisel siin kolmnurka ei teki. Summaarse faasori moodul on võrdne liidetavate faasorite moodulite aritmeetilise vahega. Kokkuleppeliselt loetakse U_L suund positiivseks ja U_C suund negatiivseks. Seega efektiivväärtuste kaudu

$$U = U_L - U_C . \quad (3.21)$$

Jagades avaldise (3.21) vooluga I , saame

$$x = x_L - x_C , \quad (3.22)$$

kus $x = U/I$ on ahela reaktiivtakistus ehk reaktants. Kui induktiivtakistus on mahtuvustakistusest suurem ($x_L > x_C$), on reaktants positiivne ja summaarne ahel vastab induktiivsele ahelale. Ahela voolufaasor on siis pingefaasorist 90° võrra taga nagu joonisel 3.4,c. Kui on aga vastupidi – mahtuvustakistus on suurem kui induktiivtakistus ($x_C > x_L$), vastab summaarne ahel mahtvuslikule ahelale. Kui $x_C = x_L$, on joonisel 3.4,c kujutatud vahelduvvoolu jadaahela takistus võrdne nulliga.

Üldjuhul, kui jadaahelas on nii aktiiv-, induktiiv- kui ka mahtuvustakistusi suuremal arvul, saame summaarse näivtakistuse leida kujul

$$z = \sqrt{(\sum r)^2 + (\sum x_L - \sum x_C)^2} . \quad (3.23)$$

3.3 Vahelduvvooluvõimsus

Vahelduvvoolu-hetkvõimsuseks nimetatakse voolu ja pinget hetkväärtuste korrutist

$$p = ui . \quad (3.24)$$

Pinge ja voolu hetkväärtuste avaldised on

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

ja

$$i = I_m \sin(\omega t \pm \varphi) .$$

Seega on hetkvõimsus

$$p = U_m I_m \sin \omega t \sin(\omega t \pm \varphi) . \quad (3.25)$$

Et siinuste korrutise saab teisendada kujule

$$\sin \omega t \sin(\omega t \pm \varphi) = \frac{1}{2} [\cos \varphi - \cos(2\omega t \pm \varphi)]$$

ja et

$$U_m I_m = 2UI ,$$

siis saame hetkvõimsuse avaldiseks

$$p = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t \pm \varphi) . \quad (3.26)$$

Perioodi keskmise võimsuse P saame integreerimisel üle ühe perioodi:

$$P = \int_0^T [UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t \pm \varphi)] dt = UI \cos \varphi . \quad (3.27)$$

Seda keskmist võimsust nimetatakse **aktiivvõimsuseks** ja selle mõõtühik on vatt (W).

Korrutist UI nimetatakse **näivvõimsuseks** S :

$$S = UI . \quad (3.28)$$

Näivvõimsuse mõõtühik on voltamper (V·A).

Aktiiv- ja näivvõimsuse suhet

$$\frac{P}{S} = \frac{UI \cos \varphi}{UI} = \cos \varphi \quad (3.29)$$

nimetatakse **võimsusteguriks**. Korrutist

$$S \sin \varphi = Q \quad (3.30)$$

nimetatakse **reaktiivvõimsuseks** ja selle mõõtühik on varr (var).

Vahelduvvoolu ahelates vaadeldakse seega kolme erinevat võimsust, mis erinevad voolu ja pinget vahelise faasinihkenurga φ arvesse võtmise poolest:

$$S = UI ,$$

$$P = S \cos \varphi = UI \cos \varphi ,$$

$$Q = S \sin \varphi = UI \sin \varphi .$$

Faasinihkenurga tähtsuse mõistmiseks vaatleme eraldi võimsust aktiivkoormusel, näiteks resistoril, ja reaktiivkoormusel, milleks on induktiivpool või kondensaator.

Aktiivtakistusel (resistoril) on vool pingega faasis. See tähendab, et $\varphi=0$ ja $\cos\varphi=1$. Selle tõttu

$$S = P = UI , \quad Q = 0 . \quad (3.31)$$

Resistori puhul kulub kogu võimsus soojuseks. Energia väljub elektriahelast ja antakse edasi keskkonda. Reaktiivvõimsus on võrdne nulliga. Aktiivvõimsus on siin soojusvõimsus ja see on võrdne ka näivvõimsusega.

Aktiivkoormuse hetkvõimsuse avaldise saame avaldisest (3.25), kui võtame $\varphi=0$. Seega

$$p = U_m I_m \sin^2 \omega t = 2UI \sin^2 \omega t = 2P \sin^2 \omega t . \quad (3.32)$$

Aktiivkoormuse hetkvõimsuse kõver on näidatud joonisel 3.5,a. Mõlemal poolperioodil on võimsus positiivne. Võimsuse hetkväärtuse maksimum on 2 korda suurem võimsuse keskvaärtusest, mis arvutatakse kui $P=UI$, ja hetkväärtuse miinimum on võrdne nulliga.

Juhul, kui on tegemist induktiivpooliga, jääb vool pingest maha ja ideaalsel juhul $\varphi=90^\circ$. Siis $\cos\varphi=0$ ja $\sin\varphi=1$. Sel juhul

$$S = Q = UI , \quad P = 0 . \quad (3.33)$$

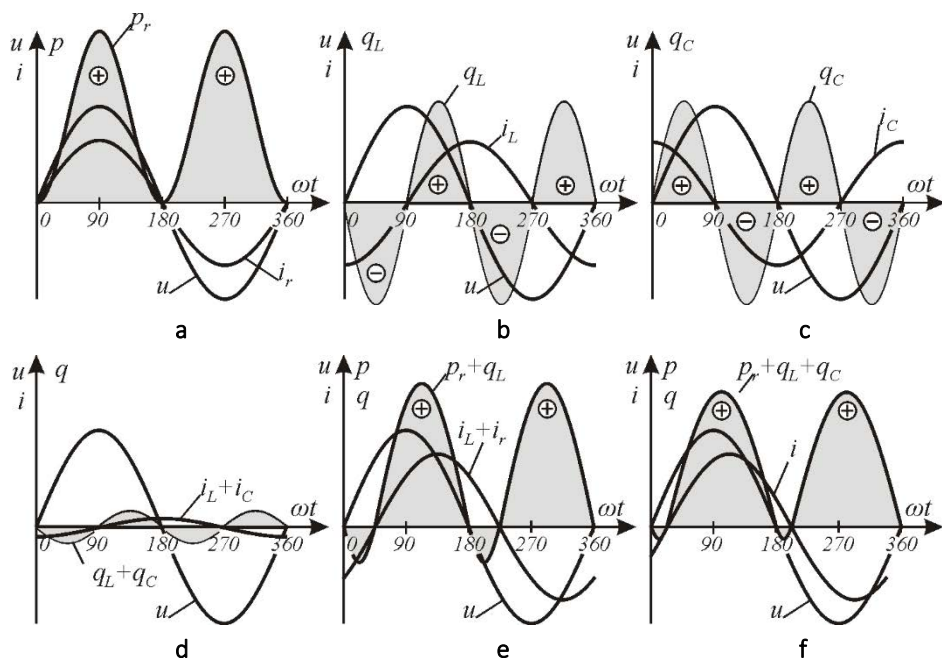
Aktiivvõimsus on võrdne nulliga, sest energia ei välju elektriahelast. Kogu võimsus on reaktiivvõimsus. Selle sisuliseks mõistmiseks vaatleme võimsuse hetkväärtust, mille saame avaldisest (3.25), kui võtame $\varphi=-90^\circ$:

$$p = U_m I_m \sin \omega t \sin(\omega t - 90^\circ) = -U_m I_m \sin \omega t \cos \omega t ,$$

millest edasi teisendades saame

$$p = -UI \sin 2\omega t . \quad (3.34)$$

Induktiivpooli hetkvõimsuse kõver on näidatud joonisel 3.5,b. Hetkvõimsus muutub võrgusagedusest kaks korda suurema sagedusega. Pinge esimese poolperioodi esimesel poolel (0° kuni 90°) on hetkvõimsus negatiivne ja sama poolperioodi teisel poolel (90° kuni 180°) positiivne. Järgmine poolperiood on analoogiline. Negatiivse hetkvõimsuse korral on voolu suund vastupidine pinge suunale. See vastab pinge- või vooluallika aktiivtalitlusele. Negatiivne on hetkvõimsus siis, kui vool induktiivsusel väheneb (vool tekkis eelmisel poolperioodil, mida pole joonisel näidatud). Voolu vähenedes magnetvälja energia väheneb ja see energia antakse toitevõrku. Siin toimib induktiivsus energiaallikana, mis avaldub negatiivse hetkvõimsusena.

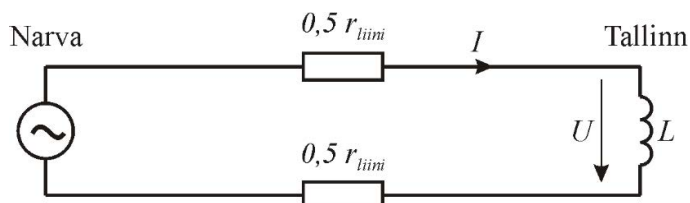


Joonis 3.5. Pinge, voolu ja võimsuse hetkväärtuste kõverad takisti (a), induktiivpooli (b), kondensaatori (c), pooli ja kondensaatori rööpühenduse (d), pooli ja takisti rööpühenduse (e) ning takisti, pooli ja kondensaatori rööpühenduse (f) korral

Poolperioodi teises osas (90° kuni 180°) vool kasvab ja sellega kasvab ka magnetvälja energia. See energia võetakse võrgust (vool ja pinge on otsillogrammil sama-suunalised). Seega reaktiivvõimsuse korral energia elektriahelast ei välju ja seda ei kulutata. Toimub ainult energia pendeldamine induktiivpooli ja pingeallika (elektrivõrgu) vahel. Hetkvõimsuse väärtuse järgi ei saa otsustada, kas on tegemist aktiivvõimsuse või reaktiivvõimsusega. Reaktiivvõimsuse määramiseks tuleb vaadelda vähemalt ühte perioodi.

Elektrivõrkude puhul püütakse tavaliselt reaktiivvõimsust vältida või vähendada. Kui näiteks pingeallikas on Narvas ja induktiivpool Tallinnas, siis on nende vahel üle 200 km liini (joonis 3.6), mille summaarne takistus on r_{liini} . Kui pool tarbib reaktiivvõimsust Q , siis läbib teda vool $I = Q/U$. See vool põhjustab liinis **kaovõimsuse** P_{kadu} , mille saab leida Joule-Lenzi seaduse järgi:

$$P_{\text{kadu}} = I^2 r_{\text{liini}} \cdot \quad (3.35)$$



Joonis 3.6. Reaktiivvõimsuse ülekandmisel tekkiv liini kaovõimsus

Suurematele elektritarbijatele paigaldatakse lisaks aktiivenergia arvestile ka reaktiivenergia arvesti. Reaktiivenergia tarbimise eest võetav tasu vastab liinis sooju- sena hajunud energiale. Tavaliselt on reaktiivenergia tasu umbes 10 korda väiksem aktiivenergia tasust, sest aktiivenergia läheb sajabrotsendiliselt tarbijale, reaktiiv- energia tekitab aga ainult ülekandekadusid. Mõnede seadmetele, näiteks asünk- roonmootoritele, on reaktiivvõimsus vajalik nende magnetväljade ülesehitamiseks.

Kui võrku on induktiivpooli asemel lülitatud kondensaator, tekib samuti voolu ja pinge vahele faasinihe 90° . Erinevus on selles, et kondensaatori voolu faas on 90° võrra pinge faasist ees. See on näidatud joonisel 3.5,c. Kondensaatori puhul on vool ja pinge samasuunalised võrgupinge poolperioodi esimesel poolel (0° kuni 90°). Sel ajal kondensaatorit laetakse ja tema energia suureneb. Võimsuse hetkväärtus on siis positiivne ja energia liigub võrgust kondensaatorisse. Poolperioodi teisel poolel kondensaatorit tühjendatakse ja tema vool on vastassuunaline. Energiat antakse kondensaatorist võrku. Seega on ka kondensaatori võimsus reaktiivvõimsus, mille juures toimub energia pendeldamine pingeallika ja kondensaatori vahel.

Kui võrdleme induktiivpooli ja kondensaatori võimsuse hetkväärtuse ja voolu hetk- väärtuse kõveraid (joonis 3.5,b,c), siis näeme, et need kõverad on vastasfaasis (faasinihe 180°). See võimaldab kasutada kondensaatoreid ülekandeliinide vabasta- miseks induktiivsest reaktiivvõimsusest, mida tekitavad näiteks elektrimootorid. Seda võtet nimetatakse **reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks**. Reaktiivvõimsuse kompenseerimisel liini kaudu võetav reaktiivvõimsus väheneb, nagu on näidatud joonisel 3.5,d. Induktiivpool ja kondensaator vahetavad omavahel energiat neid ühendatavate juhtmete kaudu. Need juhtmed peaksid olema lühikesed, et neis ei tekiks suurt energiakulu. Ettevõttel on vabadus valida, kas kompenseerida reaktiiv- energia ise kondensaatoripatarei abil või osta see reaktiivenergia elektrivõrgult.

Kui reaktiivvõimsus on aktiivvõimsusest palju väiksem (joonis 3.5,e), võib konden- saatoripatarei kasutamine ennast mitte õigustada. Kui aga kondensaatoripatarei siiski panna, saame reaktiivvõimsuse kompenseerida (joonis 3.5,f).

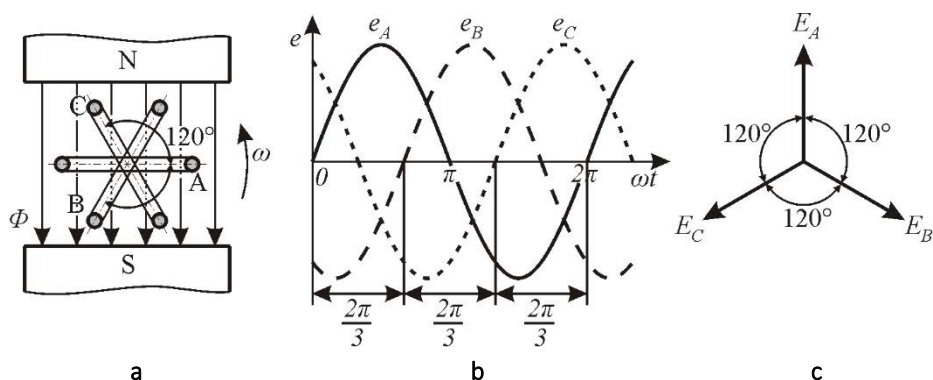
3.4 Kolmefaasilised ahelad

Kolmefaasilised ahelad moodustatakse kolmest ühefaasilisest ahelast. Nende ühe- faasiliste ahelate toitepinged tekitatakse harilikult ühes ja samas vahelduvpinge generaatoris. Eri faaside pinged on ajaliselt ühe kolmandiku perioodi võrra ni- hutatud (joonis 3.7). Faase tähistatakse harilikult ladina tähtedega A, B ja C.

Kolme faasi elektromotoorjõudude hetkväärtused on vastavalt

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t ; \\ e_B &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ) ; \\ e_C &= E_m \sin(\omega t + 120^\circ) . \end{aligned} \tag{3.36}$$

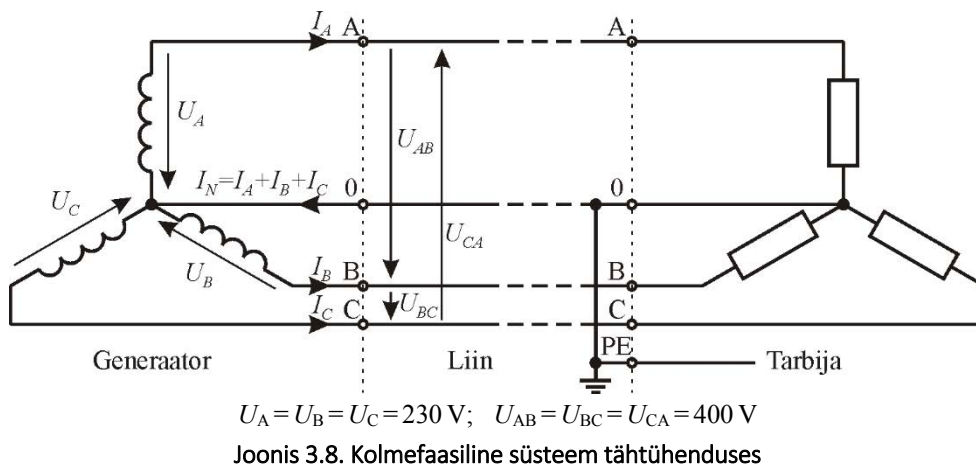
Kolme üksteisega seotud faasi nimetatakse kolmefaasiliseks süsteemiks.



Joonis 3.7. Kolmefaasilise generaatori mudel (a), elektromotoorjõudude kõverad (b) ja faasordiagramm (c)

3.4.1 Kolmefaasilise süsteemi tähtühendus

Kui me ühendame kolmefaasilise generaatori mähiste lõpud kokku, siis saame neljajuhtmelise pingesüsteemi, millel on faaside A, B, ja C väljundklemmid ja mähiste ühenduspunkt, mida nimetatakse neutraalpunktiks ehk nullpunktiks (joonis 3.8).



Joonis 3.8. Kolmefaasiline süsteem tähtühenduses

Generaatorist läheb tarbijatele neljajuhtmeline liin, kus on kolm liinijuhet A, B ja C ja neutraal- ehk nulljuhe. Voolusid I_A , I_B ja I_C nimetatakse liinivooludeks.

Kui kõikides faasides on ühesugused võrdse võimsusega tarbijad, on voolud I_A , I_B ja I_C võrdsed ja üksteisest faasis 120° võrra nihutatud. Nende voolude summa on võrdne nulliga. Sellist juhtu nimetatakse sümmeetriliseks koormuseks. Sümmeetrilise koormuse korral neutraaljuhtmes vool puudub ja selle juhtme võib ära jätta. Siis on tegemist kolmejuhtmelise kolmefaasilise süsteemiga, mis on kasutusel ülekandeliinides.

Tootmishoonete ja elumajade madalpingevõrgud on tavaliselt viiejuhtmelised: faasid A, B ja C, neutraaljuhe N ja viiendana maaühendusjuhe – kaitsemaandus PE.

Neutraaljuhe ühendatakse kaitsemaandusega ühes punktis hoonesse sisenemisel, kuid edasi kulgevad neutraaljuhe (sinist värvi) ja kaitsemaandus (kollase ja roheline triibuline) eraldi ja isoleeritult. Normaalolukorras kaitsemaanduse juhe vooluga koormatud ei ole. Liinijuhtmete vahelised pinged U_l on $\sqrt{3}$ korda suuremad kui neutraaljuhtme ja liinijuhtmete vahelised pinged. Neid neutraaljuhtme ja liinijuhtmete vahelisi väiksemaid pingeid nimetatakse faasipingeteks U_f .

$$U_l = \sqrt{3} U_f. \quad (3.37)$$

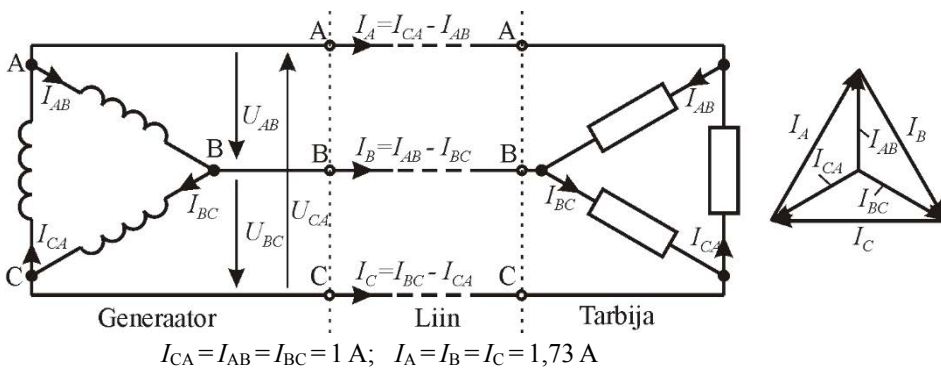
Euroopa riikides, sealhulgas Eestis, on kasutusel süsteem, kus faasipinge on 230 V ja liinipinge 400 V (Nõukogude Liidu ajal oli Eestis faasipinge 220 V ja liinipinge 380 V). Need pingete väärtused on nimipinged. Tegelik võrgupinge on harilikult nimiväärtusest erinev, kuid erinevus peab jääma lubatud piiridesse. Lubatud pingeerinevus on $\pm 10\%$ nimipingest.

3.4.2 Kolmefaasiline süsteem kolmnurkühenduses

Generaatoril võib ühendada ka ühe faasi mähise lõpu järgmise faasi mähise algusega (joonis 3.9). Nii saadakse kolmnurkühendus. Kolmnurkühenduses puudub neutraaljuhe. Tarbijad on ühendatud faasijuhtmete vahele. Pinged liinijuhtmete vahel on võrdsed tarbijate pingetega. Kuid liinivoolud I_A , I_B ja I_C on suuremad kui faasivoolud I_{AB} , I_{BC} ja I_{CA} .

$$I_l = \sqrt{3} I_f, \quad (3.38)$$

kus I_l on liinivool ja I_f faasivool. Põhjus selgub faasordiagrammilt joonisel 3.9, kus on näha, et liinivool saadakse kahe teineteise suhtes 120° nurga võrra pööratud voolufaasori liitmisel.



Joonis 3.9. Kolmefaasiline süsteem kolmnurkühenduses

Kolmefaasilise süsteemi võimsus P on võrdne kolme faasi võimsuste summaga:

$$P = 3P_f = 3U_f I_f \cos \varphi. \quad (3.39)$$

Võimsuse arvutamiseks saab kasutada ka liinisuurusi. Tähtühenduse korral on liini- ja faasivoolud võrdsed, kuid pinged erinevad. Järelikult

$$P = 3 \frac{U_1}{\sqrt{3}} I_1 \cos \varphi = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi . \quad (3.40)$$

Kolmnurkühenduse korral on liini- ja faasipinged võrdsed, kuid voolud erinevad. Järelikult

$$P = 3 U_1 \frac{I_1}{\sqrt{3}} \cos \varphi = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi . \quad (3.41)$$

Seega kujuneb arvutusvalem mõlema ühendusviisi jaoks ühesuguseks. Avaldised (3.40) ja (3.41) kehtivad ainult sümmeetriliste tarbijate korral, kus kõikide faaside voolud on võrdsed.

Sümmeetriliste tarbijate korral võib kolmefaasilise süsteemi näivvõimsuse S ja reaktiivvõimsuse Q arvutada järgmiselt:

$$S = \sqrt{3} UI , \quad (3.42)$$

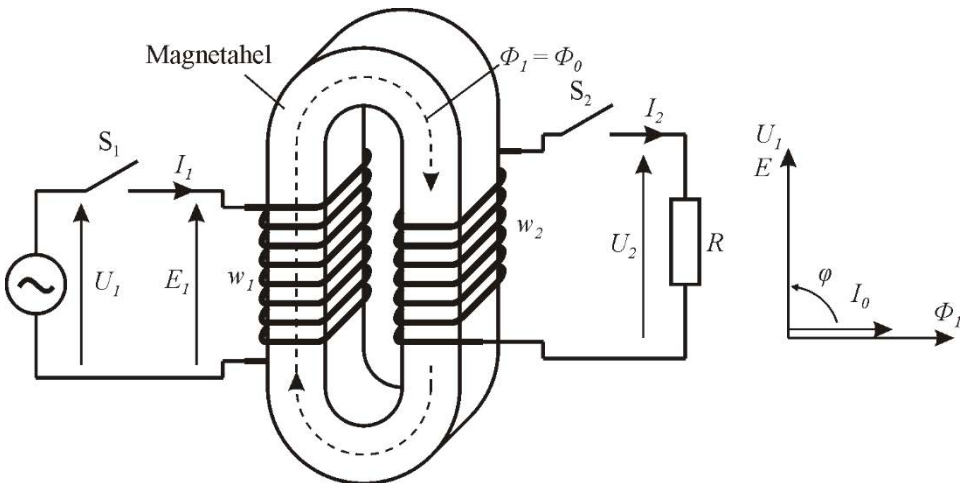
$$Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi . \quad (3.43)$$

4 TRAFOD

Esimeses peatükis vaatlesime trafo üldist tööpõhimõtet ja konstruktsiooni. Nüüd vaatleme trafo erinevaid talitlusi ja nendes talitlustes toimuvaid protsesse. Sealhulgas trafo koormamisel tekkivat pingelangu ja selle arvutamist aseskeemi alusel, trafo lühisetalitluses tekkivate voolude suuruse määramist, trafo pinge reguleerimist, kolmefaasiliste trafode mähiste ühendusskeeme ja nende trafode lülitamist rööptöole, eritüüpi trafosid ja siirdeprotsesse trafodes nende pingestamisel ja järsu lühise korral.

4.1 Kadudeta trafo tühijooks

Lüliti S_1 sulgemisega lülitatakse trafo siinuspingele U_1 ja mähises w_1 tekib vool I_1 (joonis 4.1). See vool tekitab piki südamikku **tühijooksu magnetvoo** Φ_0 . Muutuv magnetvoog indutseerib mõlemas mähises **elektromotoorjõu**. Kui lüliti S_2 on suletud, tekib sekundaarahelas samuti vool ja seda nimetatakse **koormusvooluks** I_2 . Kui lüliti S_2 on avatud, siis sekundaarvool puudub. Seda olukorda nimetatakse **tühijooksuks**. Primaarvool I_1 on olemas ka tühijooksul ja siis nimetatakse seda voolu **tühijooksuvooluks** ehk **magneetimisvooluks** I_0 .



Joonis 4.1. Tühijooksul trafo ja idealiseeritud tühijooksu faasordiagramm

Jätame esialgu arvestamata trafo südamikus esineva hüstereesi- ja pöörisvoolukao. Ignoreerime ka suhteliselt väikest aktiivvõimsuse kadu, mis tekib voolu läbiminekul primaarmähisest. Faraday seaduse järgi on magnetvoog Φ_1 ja indutseeritud elektromotoorjõud e_1 seotud järgmiselt:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_1}{dt}, \quad (4.1)$$

w_1 on primaarmähise keerdude arv.

Kui trafo primaarahelas takistus puudub, peab elektromotoorjõu hetkväärtus e_1 olema igal hetkel võrdne primaarpinge hetkväärtusega, mis muutub siinusseaduse $u_1 = U_{1m} \sin \omega t$ järgi. Järelikult võime sel juhul avaldises (4.1) elektromotoorjõu e_1 asendada pingega u_1 ja saame

$$U_{1m} \sin \omega t = -w_1 \frac{d\Phi_1}{dt}. \quad (4.2)$$

Avaldise (4.2) vasak pool kirjeldab muutuvat pinget ja parem pool seda muutuvat pinget tasakaalustavat magnetvoogu. Kui Faraday seadus kirjeldab magnetvoo muutumisel tekkivat elektromotoorjõudu, siis avaldis (4.2) kirjeldab vastupidist protsessi, s.o pinge muutumisel tekkivat magnetvoo muutumist. Meid huvitab, millise seaduspärasuse järgi magnetvoo muutumine toimub. Selleks teisendame avaldise (4.2) kujule

$$d\Phi = -\frac{\sqrt{2}U_1}{w_1} \sin \omega t dt,$$

mida integreerides saame

$$\Phi = -\frac{\sqrt{2}U_1}{w_1} \int \sin \omega t dt = \frac{\sqrt{2}U_1}{\omega w_1} \cos \omega t = \frac{\sqrt{2}U_1}{2\pi f w_1} \cos \omega t + K, \quad (4.3)$$

sest $-\int \sin \omega t d(\omega t) = \frac{1}{\omega} \cos \omega t + K$ (ilma alaliskomponendita voo korral $K = 0$) ja $\omega = 2\pi f$, kus f on toitepinge sagedus.

Järelikult **pinge muutumisel siinusseaduse järgi muutub magnetvoog koosinuseaduse järgi**. Magnetvoo Φ kõver jääb pingekõverast 90° võrra maha, nagu on näidatud joonisel 4.1 toodud faasordiagrammil. Idealiseeritud tühijooksuvool I_0 on samuti siinuseline ja magnetvooga samas faasis. Seega on voolu ja pinge vaheline faasinihkenurk $\varphi = 90^\circ$. Kadudeta trafo poolt tühijooksul tarbitav aktiivvõimsus on

$$P = 3U_1 I_0 \cos 90^\circ = 0, \quad (4.4)$$

reaktiivvõimsus aga

$$Q = U_1 I_0 \sin 90^\circ = U_1 I_0. \quad (4.5)$$

Reaktiivvõimsuse tarbimine võrgust on trafo töötamiseks vältimatult vajalik. Ilma selleta ei saa tekitada muutuvat magnetvoogu, mida on vaja sekundaarpinge indutseerimiseks.

Kadude esinemisel on φ veidi väiksem kui 90° ja (4.4) järgi määratav aktiivvõimsus on nullist suurem. Avaldise (4.3) võib kirjutada ka kujul

$$\Phi = \Phi_m \cos \omega t,$$

kus Φ_m on magnetvoo amplituudväärtus

$$\Phi_m = \frac{\sqrt{2}U_1}{2\pi f w_1}. \quad (4.6)$$

Avaldisest (4.6) võime teha kaks järeldust. Esiteks, magnetvoo amplituud väheneb sageduse f kasvades. Kui magnetvoog on väiksem, siis me võime vähendada ferromagnetilise südamikuga (s.o magnetahela) ristlõiget. Ühtlasi muutub sellega lühemaks mähise keeru pikkus ja kogu trafo tuleb väiksem ja kergem. Kui 50 Hz asemel kasutada sagedust 500 Hz, tuleks trafo kaal samal võimsusel umbes 10 korda väiksem. Miks siis kasutatakse elektrienergia ülekandel ja jaotamisel sagedust 50 Hz? Põhjus on selles, et koos sageduse kasvuga suureneb reaktiivvõimsus. Sagedus 50 Hz (või 60 Hz nagu USAs) oli enam-vähem optimaalne aastal 1900. Praegu loetakse optimaalseks sageduseks ~ 400 Hz, kuid olemasolevat energiasüsteemi ja tarbijaid ei saa välja vahetada. See on ülimalt kallis.

Teiseks järeldub avaldisest (4.6), et magnetvoog väheneb primaarmähise keerdude arvu kasvades. Selle tõttu on sama pingega ja sageduse korral väikese ristlõikepindalaga südamikuga trafo primaarmähisel alati palju rohkem keerde kui suure ristlõikepindalaga südamikuga trafol.

Kuna eespool tehtud lihtsustusi arvestades (aktiivkadude ignoreerimine) on primaarpinge U_1 võrdne mähises indutseeritud vastuelektromotoorjõuga, st $U_1 = E_1$, saame avaldisest (4.6), et

$$E_1 = \sqrt{2} \pi f w_1 \Phi_m = 4,44 f w_1 \Phi_m . \quad (4.7)$$

Elektromotoorjõud ei sõltu ahela takistusest. Selle tõttu kehtib avaldis (4.7) ka reaalse kadudega trafo korral ja seda nimetatakse transformatoorse elektromotoorjõu võrrandiks. See on üks trafo põhiseostest siinuspinge korral.

Avaldist (4.7) võime kasutada ka sekundaarmähise elektromotoorjõu E_2 leidmiseks, kui paneme sellesse sekundaarmähise keerdude arvu w_2 :

$$E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m . \quad (4.8)$$

Trafo primaarmähise ja sekundaarmähise elektromotoorjõudude suhet nimetatakse trafo **ülekandeteguriks** (kasutatakse ka terminit ülekandesuhe) k_{12} :

$$E_1/E_2 = k_{12} . \quad (4.9)$$

Avaldistest (4.7)...(4.9) näeme, et

$$k_{12} = w_1/w_2 , \quad (4.10)$$

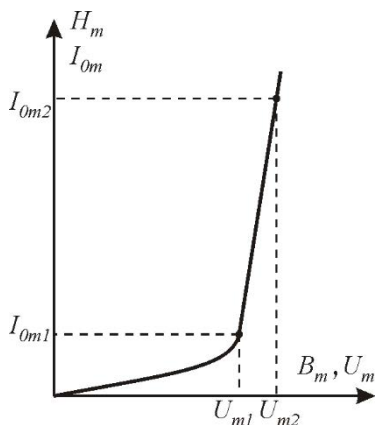
ehk et trafo ülekandetegur on võrdne ka keerdude arvu suhtega. Ingliskeelses kirjanduses ongi trafo ülekandeteguri tähenduses kasutusel termin keerdude arvu suhe (*turns ratio*). Lineaarne seos keerdude arvu ja elektromotoorjõu vahel järeldub ka otseselt Faraday seadusest $e = -w d\Phi/dt$. **Elektromotoorjõu ja koos sellega ka pingega vähendamiseks peab sekundaarmähise keerdude arv olema väiksem kui primaarmähisel.**

Transformatoorse elektromotoorjõu võrrandit võib teisendada järgmiselt:

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m = 4,44 f w_1 B_m A , \quad (4.11)$$

kus B_m – magnetvoo tiheduse amplituud trafo südamikus,
 A – trafo südamiku plekkide ristlõikepindala.

Magnetvoo tiheduse amplituud on piiratud trafo südamiku küllastumisega ja on olenevalt südamiku materjalist piirides $1,0 \dots 1,7 \text{ Wb/m}^2$. Trafo konstrueeritakse nii, et selline magnetvoo tiheduse amplituud tekib trafo nimipingel. Sellise magnetvoo tiheduse amplituudi juures jääb trafo tühijooksuvool suhteliselt väikeseks, tavaliselt alla 10% nimivoolust. Kui trafotele rakendatakse nimipingest suurem pinge, suureneb magneetimisvool väga järsult. Seda selgitab joonis 4.2.



Joonis 4.2. Trafo tühijooksuvoolu amplituudi I_{0m} järsk suurenemine, kui pinge ületab nimipinget

Magnetvoo tihedus B trafo südamikus suureneb avaldise (4.11) järgi võrdeliselt elektromotoorjõuga E . Ja ligikaudu $E = U$. Teisest küljest, koguvoolu seadusest järeldub, et trafo tühijooksuvoolu I_0 ja südamiku magnetvälja tugevuse H vaheline sõltuvus on lineaarne. Selle tõttu on trafo tühijooksuvoolu ja pinge amplituudide vahelise sõltuvuse $I_{0m} = f(U_m)$ kõver joonisel 4.2 sarnane trafo südamiku materjali magneetimiskõverale $B_m = f(H_m)$. Nimipingel juures on pinge amplituud U_{m1} ja tühijooksuvoolu amplituud I_{0m1} . Kui pinge ületab nimipinget näiteks 20% (U_{m2}), suureneb tühijooksuvool umbes 5 korda (I_{0m2}) ja võrdub juba ligi poolega nimivoolust. Kui aga rakendada trafotele nimipingest 1,5...2 korda suurem pinge, läheb tühijooksuvool palju suuremaks kui nimivool ja trafo isolatsioon rikneb ülekuumenemise tõttu isegi koormuse täielikul puudumisel. Nimipingest väiksemal pingel töötab trafo probleemideta.

Avaldise (4.11) võime võtta aluseks ka trafo mähiste keerdude arvu määramisel, kui meil on olemas näiteks mingi vana magnetahela plekipakk ja me soovime sinna kerida uued mähised. Primaarmähise keerdude arv avaldub kujul

$$w_1 = U_1 / 4,44f B_m A . \quad (4.12)$$

Tundmatu plekimaterjali puhul võime võtta $B_m = 1,0 \text{ Wb/m}^2$, magnetahela ristlõikepindala saame mõõta ja toitepinge väärtuse teadmisel ongi meil kõik vajalikud suurused olemas.

Ülesanne 4.1

Vanast manteltrafost on alles jäänud südamikü plekid. Plekkide kokkupanemisel saame raua ristlõikeks sambas 12 cm^2 . Sambale oleks vaja kerida mähised, et saada $230/36 \text{ V}$, 50 Hz trafo. Leida mähiste keerdude arvud.

Lahendus

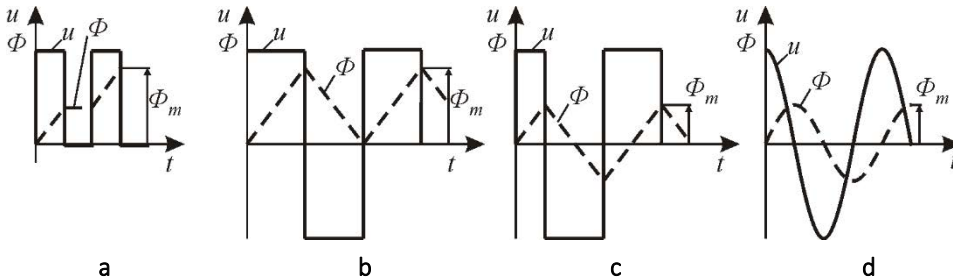
Kuna plekkide materjal on teadmata, siis valime magnetvoo tiheduse amplituudiks $B_m = 1,0 \text{ Wb/m}^2$. Primaarmähise keerdude arv on

$$w_1 = \frac{U_1}{4,44fB_mA} = \frac{230}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,0 \cdot 12 \cdot 10^{-4}} = 863 \text{ keerdu} .$$

Sekundaarmähise keerdude arv on

$$w_2 = \frac{U_2}{4,44fB_mA} = \frac{36}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,0 \cdot 12 \cdot 10^{-4}} = 135 \text{ keerdu} .$$

Muundurites kasutatavatel trafodel võib siinuspinge asemel olla ka nelinurkpinge. Joonisel 4.3 on näidatud magnetvoo muutumine selle juhtumi jaoks.



Joonis 4.3 Magnetvoo muutumine trafos: ühepolarsed pingepulsid (a); kahepolarsed pingepulsid (b); kahepolarsed pingepulsid, kusjuures esimese impulsi kestus on poole lühem (c); siinuspinge (d)

Lihtsuse mõttes eeldame kadudeta ja puisteta trafot. Nelinurkimpulsi kestel on pinge väärtus konstantne. Seetõttu saame avaldise (4.2) kirjutada kujul

$$d\Phi = -\frac{U_1}{w_1} dt . \quad (4.13)$$

Miinusmärki ei tarvitse antud juhul arvestada ja integreerides saame

$$\Phi = \frac{U_1}{w_1} t + K . \quad (4.14)$$

Siin K on magnetvoo algväärtus pingepulsi alguses. Pingepulsi kestel kasvab magnetvoog ajas lineaarselt. Kui pingepulsid on ühepolarsed ja nende vahel on paus (joonis 4.3,a), on pausi ajal pinge võrdne nulliga. Magnetvoo väärtus sel ajal ei muutu. Selle tõttu peab ka magneetimisvool olema konstantne. See on võimalik, kui elektriühela takistus võrdub nulliga ja ka pingelika sisetakistus on null. Reaalselt nii harilikult ei ole ja kahe impulsi vahel magnetvoog veidi väheneb.

Järgmise pingeimpulsi ajal hakkab magnetvoog endises suunas kasvama. Magnetvoog muutub alati lõpuks nii suureks, et südamik küllastub. Magnetvoo edasiseks suurenemiseks peab magneetimisvool hakkama väga järsult kasvama. Idealiseeritud juhtumil (nelinurkne magneetimiskõver) kasvab vool lõpmata suureks. Reaalselt omandab vool aga mingi lõpliku väärtuse ja magnetvoo kasv peatub. Siis kaob täielikult ka indutseeritud elektromotoorjõud ja sekundaarpinge. Siit saab selgeks, et ühepolaarsete impulsside ja alalisvoolu korral läheb trafo kiiresti küllastusse ja lakkab talitlemast. Enamgi veel. Primaarvool muutub mitukümmend korda suuremaks kui arvutuslik nimivool, trafo mähis kuumeneb üle ja isolatsioon rikneb. Seda muidugi juhul, kui puudub kaitse, mis liiga suure voolu korral trafo välja lülitab.

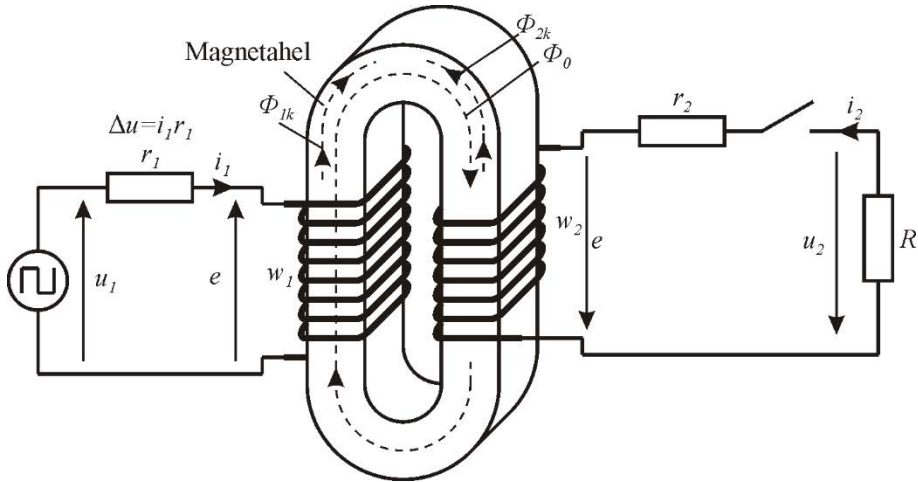
Kui pingeimpulsside polaarsus vaheldub, muutub magnetvoog negatiivse impulsi ajal alanemise suunas ja trafo küllastusse ei lähe. Töövõime säilib. Vahelduva polaarsusega pinge korral võib magnetvoog (ja ka magneetimisvool) olla ühepolaarne nagu joonisel 4.3,b. Magnetahela jaoks on parem joonisel 4.3,c toodud variant, kus magnetvoog on vahelduva polaarsusega. Samal pingel on magnetvoo amplituud Φ_m siis kaks korda väiksem. Vahelduva magnetvooga talitluse võib saada sel teel, et esimene pingeimpulss antakse poole lühema kestusega. Siinuspinge korral saadakse kohe ilma alaliskomponendita magnetvoog, kui trafo lülitatakse sisse võrgupinge maksimumi hetkel (joonis 4.3,d). Kui sisselülitus toimub mõnel teisel hetkel, tekib alaliskomponent, mis aga reaalsel trafodel sumbub mõnekümne toitepinge perioodi jooksul (alaliskomponendi korral ei ole magnetvoo positiivne ja negatiivne poolperiood võrdsed).

Nelinurkpinge korral on pinge ja magneetimisvoolu kõverate kujud erinevad – magneetimisvoolu kõver on kolmnurkne ja pinge kõver nelinurkne kujuga. Siinuspinge korral on nende kõverate kujud idealiseeritud juhul sarnased. Reaalsete trafode magneetimisvoolu kõver on aga osalise küllastuse tõttu moonutatud.

4.2 Primaarvoolu koormuskomponendi tekkimine sekundaarvoolu mõjul

Vaatleme trafo sekundaarvoolust tingitud primaarvoolu ehk täpsemalt primaarvoolu koormuskomponenti. Lihtsuse huvides eeldame, et kõik magnetvälja jõujooned läbivad mõlemat mähisepooli ühtviisi ja mähised on võrdse keerdude arvuga. Ignoreerime tegelikkuses esinevaid puistevälju. Sealjuures peame silmas, et voolu läbiminekul mähisest tekib sellel teatud pingelang. Me võime ette kujutada, et mähised on ilma takistusega, aga see-eest on mähistega jadamisi lülitatud takistid r_1 ja r_2 , nagu joonisel 4.4.

Oletame, et trafo primaarmähis lülitatakse riskülikpingele u_1 (vt ostsillogramm joonisel 4.5). Hetkel t_1 lülitatakse sisse koormustakisti R ja tekib sekundaarvool i_2 . Koormustakisti väärtust vähendatakse kuni hetkeni t_2 . Sealt edasi hoitakse ta konstantne ja hetkel t_3 lülitatakse koormus välja. Sekundaarahela koormusvoolu mõjul tekib trafos terve rida vastastikmõjusid, mis on joonisel 4.5 näidatud nooltega ühest kuueni.



Joonis 4.4. Trafo koormamine vooluga

Sekundaarvoolu I_2 mõjul primaarvoolu I_1 suurenemise protsessi võib sümbolite abil kirjeldada ka järgmiselt:

$$I_2 \uparrow \Rightarrow \Phi_2 \uparrow \Rightarrow (\Phi_1 - \Phi_2 = \Phi_0) \downarrow \Rightarrow E_1 \downarrow \Rightarrow (U_1 - E_1) \uparrow \Rightarrow \Delta U \uparrow \Rightarrow I_1 \uparrow$$

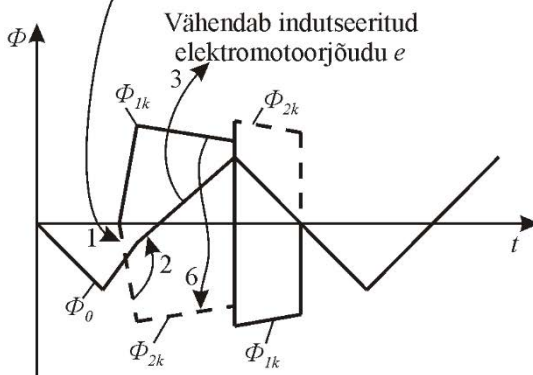
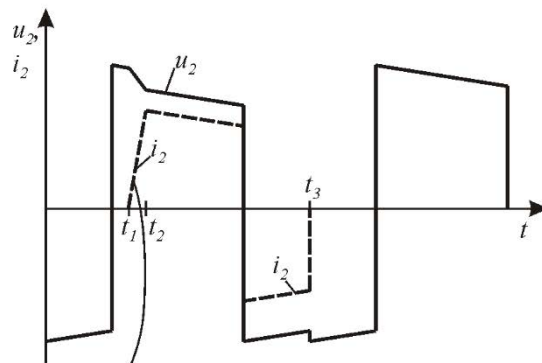
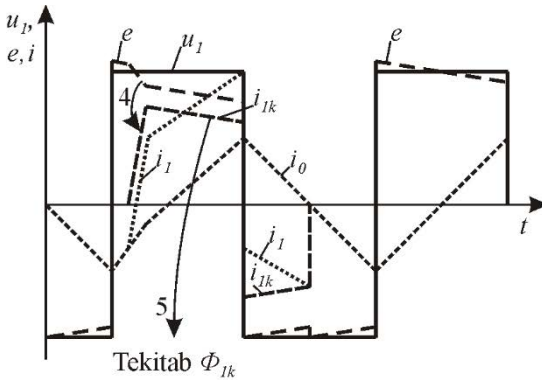
Lühemalt öeldes, sekundaarvoolu väli hävitab magnetimisvoolu välja ja selle välja taastamiseks võetakse toiteallikast voolu juurde. Energiavahetuse protsess toimub magnetvälja kaudu. Primaarpoleelt võetava koormusvoolu energia muutub välja energiaks ja välja energia muutub sekundaarvoolu energiaks. Kui me punktis 2.1 nägime, et elektrivool tekitab alati magnetvälja ja viib sinna energiat, siis siin on ka vastupidine protsess – primaarmähise magnetväljast läheb energia üle sekundaarmähisesse, kus ta avaldub vooluna.

Harilikult ilmneb tagajärg pärast põhjust teatud viitega. Põhjuse ja tagajärje vahel on ajavahe. Voolu tekke ja tema magnetvälja tekke vahel puudub ajavahe absoluutselt. Voolu ja tema magnetvälja suhe on selle poolest unikaalne. Seega muutub mõttetuks küsimus, kumb on primaarne – kas vool või väli. Väli võib sama hästi primaarne olla kui vool. Voolu ja magnetvälja vahelisel seosel põhineb trafo töö. Eespool kirjeldatud protsessid ei järgne ajaliselt üksteisele, vaid kõik toimub üheaegselt. Toimuva mõistmiseks on aga otstarbekas neid protsesse vaadelda kuue üksteisele järgneva sammuna.

Magnetimisvool i_0 ja primaarvoolu koormuskomponent i_{1k} summeeruvad trafo primaarmähises ja annavad kokku voolu i_1 (punktiirjoon joonisel 4.5).

Trafo elektromotoorjõu e kõver erineb primaarpinge kõverast, sest primaarmähise takistusel (r_1 joonisel 4.4) tekib pingelang. Tühijooksul on ristikülükimpulsi alguses elektromotoorjõud pingest suurem, sest sel ajal antakse magnetahela magnetvälja salvestatud energiat toiteallikasse tagasi (voolu suund on vastupidine pinge suunale). Kui magnetimisvoolu hetkväärtus on null ja koormusvool puudub, on elektromotoorjõud sellel hetkel primaarpingega võrdne (vt parempoolset positiivset pingeimpulssi joonisel 4.5). Elektromotoorjõu väärtust vähendavad nii magnetimisvool

kui ka koormusvool, mis mõlemad tekitavad mähise takistusel pingelangu. Sekundaarpinge erineb elektromotoorjõust veel sekundaarmähise takistusel r_2 tekkiva pingelangu võrra, kuid tema kõver on antud juhul elektromotoorjõu kõveraga sarnane. Sekundaarpinge kõveral on tema koormusvoolust tingitud vähenemine hästi näha.



Vastastikmõjud:

1. Vool i_2 tekitab magnetahelas magnetvoo Φ_{2k} .
2. Lenzi reegli järgi on magnetvoo Φ_{2k} magneetimisvoolu i_0 magnetvooga Φ_0 vastassuunaline ja vähendab seda veidi (vaata ka magnetvoo suundi joonisel 4.4).
3. Magnetvoo Φ_0 vähenemise tõttu väheneb indutseeritud vastuelektromotoorjõud e (võrdle vastuelektromotoorjõuga järgmisel positiivsel pingepulsil, kus koormusvool i_2 puudub).
4. Vastuelektromotoorjõu e vähenemise tõttu suureneb pinge takistil r_1 . Selle tulemusena suureneb Ohmi seaduse kohaselt vool. Tekib primaarvoolu koormuskomponent i_{1k} .
5. Primaarvoolu koormuskomponent i_{1k} tekitab magnetahelas oma magnetvoo Φ_{1k} .
6. Primaarvoolu koormuskomponenti magnetvoo Φ_{1k} on sekundaarvoolu magnetvooga Φ_{2k} vastassuunaline ja need vood kompenseeruvad. Seega väheneb magneetimisvoo Φ_0 ainult pingelangu Δu kasvamise tõttu ja see vähenemine on väike.

Joonis 4.5. Primaarvoolu koormuskomponenti i_{1k} tekkimine sekundaarvoolu i_2 mõjul

Reaalse trafo voolu ja pinge kõverad erinevad mõnevõrra joonisel 4.5 toodutest, sest reaalses trafos on primaar- ja sekundaarmähise magnetvood puistevoogude tõttu alati erinevad.

4.3 Trafode üldlevinud kasutusvaldkonnad ja konstruktsioonid

Kõige suurem trafode kasutusvaldkond on elektrivarustus. Elektrienergia liigub elektriijaamast kuni lõpptarbijani mitmekordselt läbi alajaamades olevate trafode. Elektrivarustuse trafod on reeglina kolmefaasilised ja sagedusel 50 Hz või 60 Hz. Kuna elektrivõrgus on mitmesugused nimipinged (0,4 kV, 10 kV, 110 kV jne), siis valmistatakse ka trafod nendele pingetele. Trafosid võib koormata kuni nimivooluni. Suuremat voolu ei tohi pikaajaliselt kasutada, sest siis kuumeneb trafo üle ja rikneb. Selle vältimiseks varustatakse trafod kaitsmete või kaitselülititega. Trafo kuumenemise seisukohalt ei ole oluline, kas trafo koormusvool on pingega faasis (sellist koormusvoolu nimetatakse aktiivkoormuseks) või on trafo koormusvoolu faas pinge faasi suhtes nihutatud. Sellepärast mõõdetakse trafode võimsust kilovoltamprites (kVA), mis on näivvõimsuse mõõtühik. Näivvõimsuse annab pinge ja voolu korrutis ilma faasinihkenurka arvestamata.

Küllaltki palju kasutatakse trafosid ka tarbijate juures, sest sageli ei ole võrgupinge väärtus tarbijatele sobiv. Tarbijate juures kasutatakse ka trafosid, mille sagedus on võrgusagedusest kõrgem. Kõrgemal sagedusel on trafo kaal, gabariidid ja hind väiksem. Kuid kõrgema sageduse saamiseks tuleb võrgu vahelduvpinge kõigepealt alaldada ja seejärel pooljuhtlülitite abil uuesti teistsuguse sagedusega vahelduvpingeks muuta.

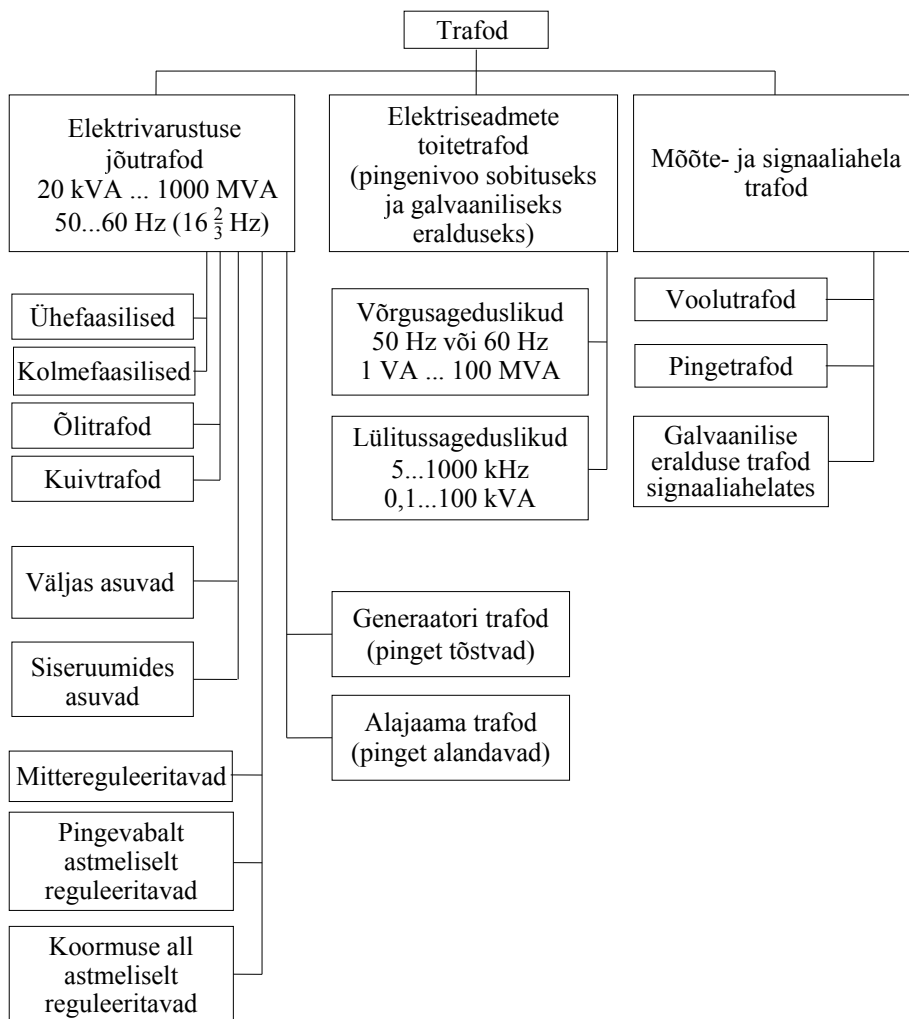
Trafosid kasutatakse ka kõrgete pingete ja suurte voolude mõõtmisel, sest siis saab mõõteriista ehitada optimaalse suurusega nimivoolule (tavaliselt 5 A) ja nimipingele (tavaliselt 100 V).

Trafode kasutamist iseloomustab joonisel 4.6 toodud liigitus.

4.3.1 Trafode magnetahelate ehitus

Sagedusel 50 Hz või 60 Hz koostatakse trafo magnetahelad 0,35...0,5 mm paksustest elektrotehnilise terase lehtedest. Õhukeste teraslehtede kasutamise vajadus on tingitud sellest, et massiivses magnetahelas tekivad suured pöörivoolud ja suur pöörivoolukadu.

Vahelduva magnetvoo korral indutseeritakse elektromotoorjõud kõikides kontuuri- des, mida see magnetvoog läbib (Faraday seadus). Kui kontuur on juhtiv, siis tekib seal ka elektrivool. Joonisel 4.7 vasakul on näidatud massiivse magnetahela osa, mida läbib vahelduvmagnetvoog. Elektromotoorjõud ja vool indutseeritakse nii magnetahela ümber olevas lühiskeerus (lühiskeerd on näidatud kadude tekke selgitamiseks) kui ka igas juhtivas kontuuris, mis asub selle magnetahela enese sees. Massiivse magnetahela korral on voolukontuuri ristlõige suur, takistus väike ja pöörivool suur. Voolu tõttu magnetahel kuumeneb. Kuumenemine toimub magnetahelat läbiva vahelduvvoo energia arvel. Magnetväljas kaduma läinud energia asendamiseks võetakse toiteallikast uut juurde. Tekkivat energiakadu nimetatakse pöörivoolukaoks.



Joonis 4.6. Trafode liigitus

Kui valmistada magnetahel omavahel isoleeritud teraslehtedest, nagu on näidatud joonisel 4.7 paremal pool, saab vool tekkida ainult kontuurides, mis asuvad üksikute teraslehtede sees. Et leht on õhuke, on voolukontuuri ristlõige väike, takistus suur ja tekib pöörivool väike. Teraslehed isoleeritakse üksteisest kas laki, oksüüdikihi või õhukese immutatud paberiga. Pöörivoolukao P_e väärtuse saab määrata avaldisest

$$P_e = VK_e f^2 d^2 B_m^2, \quad (4.15)$$

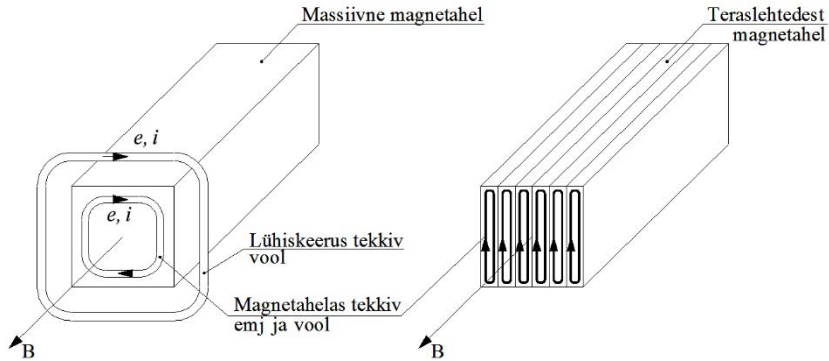
kus V – magnetahela ruumala;

K_e – mõõtühikuid ja magnetahela materjali eritakistust arvestav tegur;

f – sagedus;

d – teraslehe paksus;

B_m – magnetvoo tiheduse amplituud.

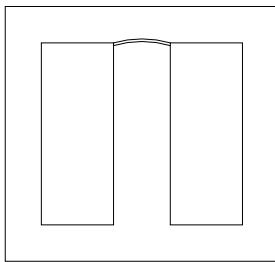


Joonis 4.7. Pöörisvoolu kontuurid massiivses ja teraslehtedest koostatud magnetahelas

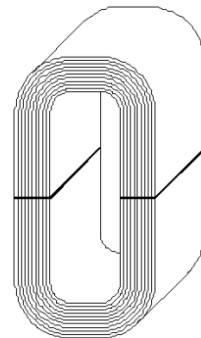
Pöörisvoolukadu kasvab võrdeliselt sageduse, teraslehe paksuse ja magnetvoo tiheduse amplituudi ruuduga. Suuremal sagedusel vähendatakse teraslehe paksust või võetakse kasutusele mittejuhtivast materjalist (**ferriit** jt) magnetahelad, kus rauale on lisatud mitmesuguseid aineid elektri juhtivuse vähendamiseks.

Trafosüdamiku trafoplekkidest kokku panemisel kasutatakse mitut erinevat moodust. Väikese võimsusega trafode jaoks võib stantsida trafoplekid, kus ikked ja sambad on ühes tükis (joonis 4.8).

Trafopleki omaduste parandamiseks kasutatakse ka **külmvaltsitud teraslehte**. Külmvaltsitud teraslehe omadused on valtsimise suunas paremad kui ristipidi. Sellepärast valmistatakse trafo magnetahel **teraslindist** kerimise teel. Keritud magnetahel lõigatakse seejärel keskelt pooleks, et saaks mähiseid peale panna (joonis 4.9). Õhupilu vähendamiseks lihvitakse lõikepind siledaks.



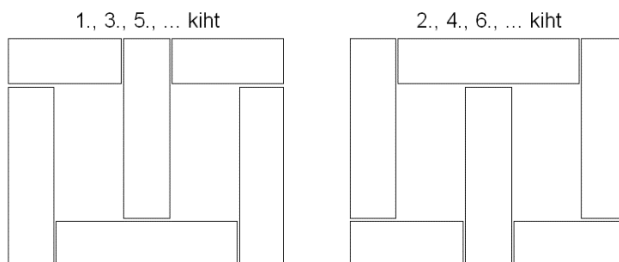
Joonis 4.8. Väiketrafo magnetahela stantsitud terasplekk



Joonis 4.9. Ühefaasilise sammastrafo teraslindist keritud magnetahel

Suurtel trafodel (alates mõnest kilovoltamprist) koostatakse magnetahel ristkülikukujulistest plekitükkidest. Plekitükkidest südamiku koostamisel jäävad magnetvoo kulgemise teega risti olevatesse ühenduskohtadesse paratamatult väikesed õhupilud. Mida suurem on õhupilu, seda suuremat magneetimisergutust vajab magnetahel ja seda suurem on trafo tühijooksuvool. Õhupilu vähendamiseks võib magnetahela koostada nii, et kahe üksteise peal paikneva kihi õhupilud ei ole kohakuti

(joonis 4.10). Selliseid südamikke nimetatakse **vaheliti laotud südamikeks**. Siiski kasutatakse lihtsuse huvides ka sellist ladumisviisi, kus õhupilu on kõikides kihtides ühel ja samal kohal. Selliselt laotud südamikuga trafot nimetatakse **põkksüdamikuga** trafoks.



Joonis 4.10. Trafosüdamiku koostamine plekkide vaheliti ladumisega

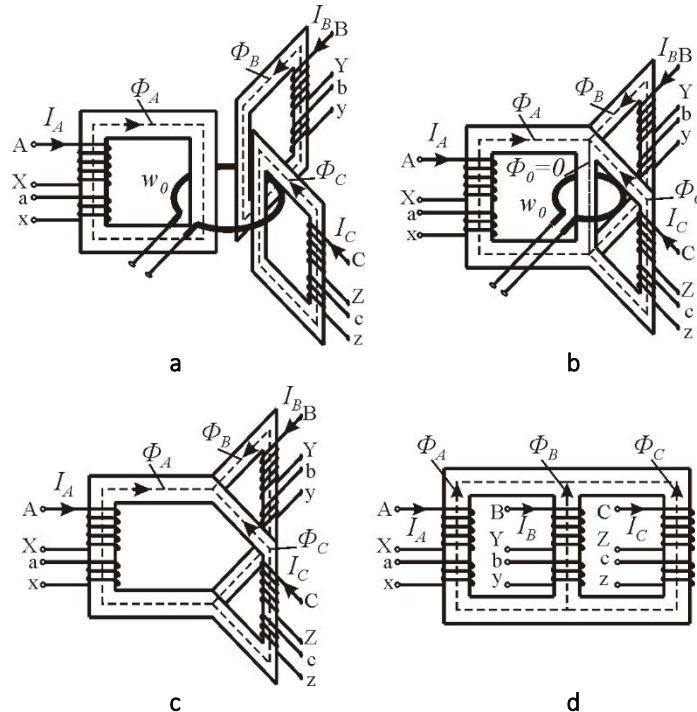
Väiketrafoode plekipakki hoiab koos poolialus. Et suurte trafode terassüdamik koos seisaks, tehakse plekkidesse augud, millest pannakse läbi **poldid** kogu plekipaki kokkutõmbamiseks. Üksikute plekkide omavahelise elektrilise ühenduse ja seeläbi lühisevoolukontuuride tekke vältimiseks ümbritsetakse poldid isoleerainest hülsidega ning mutrite alla pannakse isoleermaterjalist seibid.

Kolmefaasiliste trafode magnetahelad

Kolmefaasilise voolu transformeerimiseks võib kasutada kolme ühefaasilist trafot. Need kolm trafot moodustavad siis kolmefaasilise trafogrupi. Kuid sagedamini kasutatakse siiski ühte kolmefaasilist trafot, millel on üks ühine südamik kõigi kolme faasi jaoks. Selline võimalus tuleneb kolmefaasilise pingesüsteemi sümmeetrilisusest. Kolmefaasilise trafo moodustamist on selgitatud joonisel 4.11.

Iga trafo südamikus olev magnetvoog Φ on võrdeline vastava trafo primaarmähise pingega. Kui sümmeetrilise kolmefaasilise süsteemi igas faasis on üks trafo, on eri trafode vahelduvad magnetvood pingete sümmeetrilisuse tõttu ajas nihutatud selliselt, et nende magnetvoogude hetkväärtuste summa on igal hetkel null (faasordiagrammil on kolme võrdse, aga faasis 120° võrra nihutatud faasori summa null). Seda on arvestatud joonisel 4.11,a, kus kolme ühefaasilise trafo magnetahelad on lihtsuse mõttes näidatud ainult ühest plekist koosnevana. Faaside A, B ja C trafodel on mähised ainult ühel sambal. Kõigi kolme trafo külgikked on paigutatud üksteise vastu ja nende ümber on ühine mähis w_0 . Mähises w_0 pinget ei teki, sest eri faaside magnetvoogude Φ_A , Φ_B ja Φ_C summa on kogu aeg null (ühe faasi magnetvoog on igal hetkel võrdne ja vastassuunaline kahe ülejäänud faasi magnetvoogude summaga, ehkki kõik magnetvood pidevalt muutuvad). Kui panna kolme rööpse külgikke asemele ainult üks külgike, mis on ühine kõigile kolmele trafole (joonis 4.11,b), on ka selles ühises külgikkis magnetvoogude summa null. See tähendab, et selles külgikkis magnetvoogu ei ole ja selle võib ära jätta (joonis 4.11,c). Ühise külgikke ärajätmisega ei muutu midagi. Lisaks võib lühendada B-faasi trafo ikke nullini ja pöörata faaside A ja C magnetahelad ühte tasapinda. Sellega tekib küll kolmefaasilise magnetahela asümmeetria, sest B-faasi magnetahel on lühem, kuid trafo

tööd see oluliselt ei mõjuta – tekib ainult mõningane faaside tühijooksuvoolude erinevus. Tulemuseks on aga tasapinnaline magnetahel, mida on lihtne valmistada. Ainult neil juhtudel, kui tekib raskusi väga suure võimsusega trafo transportimisega, kasutatakse igas faasis eraldi trafot.



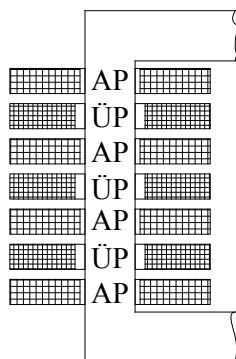
Joonis 4.11. Kolmefaasilise trafo saamine kolme ühefaasilise trafo liitmisel

4.3.2 Trafo mähiste tüübid

Trafo mähiste ehitus peab tagama nende elektrilise ja mehaanilise tugevuse ning vajaliku temperatuurikindluse. Peale selle peab mähiste valmistamise tehnoloogia olema võimalikult lihtne ja odav ning elektriline kadu mähistes peab jääma ettenähtud piiridesse.

Ülempinge- ja alampingemähised (ÜP- ja AP-mähised) jaotatakse südamikul ja teineteise suhtes paiknemise viisi järgi **kontsentrilisteks** ehk **silindrilisteks mähisteks** (vt joonised 1.40, 1.42) ja **ketasmähisteks** (joonis 4.12).

Silindrilised mähised keritakse isoleermaterjalist torudele, kusjuures alampingemähis paigaldatakse südamikule lähemale. Ülempinge- ja alampingemähise vahele jäetakse vertikaalne 5...8 mm laiune jahutuskanal. Ülempingemähise suure keerdude arvu tõttu jaotatakse see mähis üksteise kohal asuvateks poolideks, kusjuures ühe pooli pinge on kuni 1000 V. Poolid on mitmekihilised ja kihtide vaheline pinge on kuni 100 V.

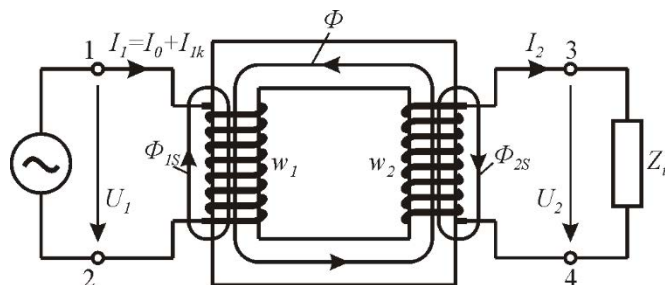


Joonis 4.12. Ketasmähised trafo sambal

Ketasmähiste ülempinge- ja alampingekeetad paigaldatakse piki südamikku vaheldumisi (joonis 4.12). Alampingekeetaste siseläbimõõt on veidi väiksem kui ülempingekeetastel, mis oma suurema siseläbimõõdu tõttu on sambast veidi kaugemal. Kõige ülemiseks ja kõige alumiseks on alampingekeetas. Ketasmähiste valmistamine on keerukam, kuid nende eeliseks on väiksem elektromagnetiline puiste. Puiste vähendamine on oluline väga kõrgetel pingetel (110 kV ja rohkem), kus peab suurendama mähiste vahelist kaugust, et vältida läbilööki.

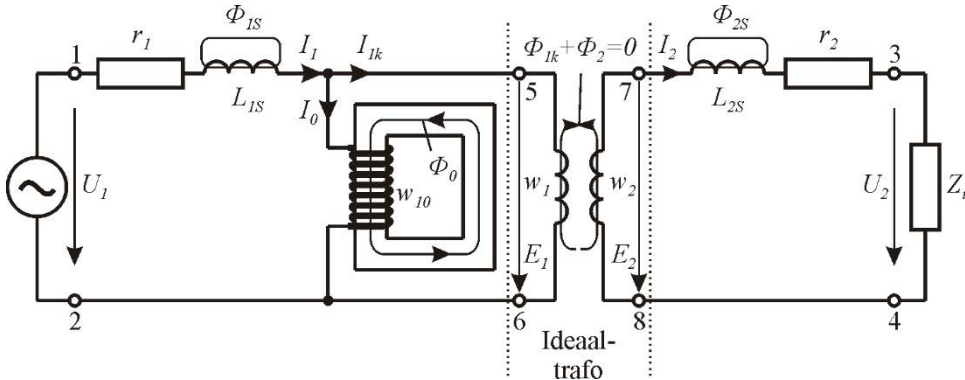
4.4 Trafo parameetrid ja mudel

Reaalse koormatud trafo skemaatiline kujutus koos põhiliste arvestamist vajavate parameetritega on toodud joonisel 4.13.



Joonis 4.13. Reaalne trafo ja selle parameetrid

Trafol on kaks isoleeritud elektri ahelat, mis töötavad erinevatel pingetel. Need ahelad on omavahel seotud ühise magnetvooga Φ . Lisaks ühisele magnetvoolele Φ on kummalgi mähisel veel oma magnetvoog, vastavalt Φ_{1s} ja Φ_{2s} , mis sulgub läbi õhu ja teise mähisega ei aheldu. Neid voogusid nimetatakse puistevoojudeks. Tegelik puistevälja jõujoonte asetus ruumis on keerukam kui joonisel 4.13, kus on lihtsustatult näidatud ainult üks jõujoon, kuid antud juhul pole see oluline. Elektriliste ja magnetiliste suuruste üheskoos arvestamine on tülikas. Asja lihtsustamiseks on kasutusele võetud ekvivalentne skeem ehk trafo aseskeem, milles on ainult elektri ahela parameetrid. Ekvivalentse skeemi saab koostada vaheastme kaudu, milleks on joonisel 4.14 toodud trafo mudel.



Joonis 4.14. Trafo mudel, kus primaarmähise voolu kaks komponenti on viidud eraldi ahelatesse ning puisteinduktiivsused ja mähiste takistused on mähistest eraldatud

Mudeli koostamisel on tehtud alljärgnevad ekvivalentsed teisendused.

- Primaarmähise voolu kaks komponenti, milleks on magneetimisvool I_0 ja koormusvool I_{1k} , on viidud eraldi vooluahelatesse. Selleks on primaarmähis jagatud mõtteliselt kaheks rööpseks osaks, millest üks osa w_{10} asub magnetahelal ja tekitab magnetvoo, teine osa ehk primaarmähis w_1 on magnetvälja kaudu ideaalselt sidestatud sekundaarmähisega w_2 .
- Mähiste puistevoog on mähistest eraldatud ja viidud mõttelistesse induktiivpoolidesse L_{1S} ja L_{2S} . Samuti on mähistest lahutatud nende aktiivtakistus ja viidud eraldi resistoritesse r_1 ja r_2 .
- Primaar- ja sekundaarmähise ideaalne sidestus on realiseeritud mõttelise seadmega, mida nimetatakse ideaaltrafoks. Ideaaltrafol ei ole puistevälja ega mähiste aktiivtakistust. Ideaaltrafo kannab primaarklemmidele 5 ja 6 rakendatud pinge üle sekundaarklemmidele 7 ja 8. Samal ajal kannab ideaaltrafo sekundaarahelas tekkiva voolu üle primaarahelasse. Ideaaltrafo pinge ja elektromotoorjõud on alati võrdsed. Joonisel 4.14 esitatud mudelis on ideaaltrafo elektromotoorjõud võrdne reaaltrafo elektromotoorjõuga.

Trafo mudelis oleva magneetimisahela magnetvoo Φ_0 saab omakorda teisendada elektrialhelaks vastavalt joonisele 4.15,b või 4.15,c.

Resistor $r_{\mu p}$ (joonis 4.15,b) on siin valitud sellise suurusega, et temas eralduv võimsus on võrdne südamikü rauaskaoga P_{Fe} , mis on eeldatavalt teada. Indeks μ viitab siin sellele, et selle takistuse suurus ei ole konstantne, vaid sõltub magneetiskõveral olevast tööpunktist. Joule-Lenzi seaduse põhjal võime leida, et

$$P_{Fe} = \frac{E_1^2}{r_{\mu p}} \quad \text{ehk} \quad r_{\mu p} = \frac{E_1^2}{P_{Fe}}. \quad (4.16)$$

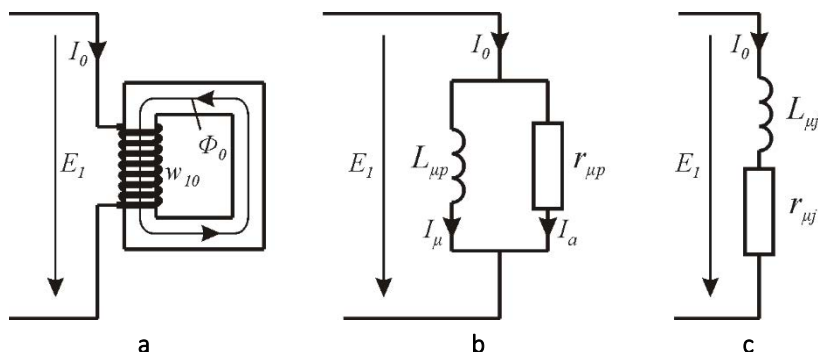
Kadudeta induktiivsus $L_{\mu p}$ arvestab trafosüdamiku magnetvälja salvestatud energiat. Induktiivsuse $L_{\mu p}$ saab leida magnetvoo Φ_0 , magneetimisvoolu I_0 ja primaarmähise keerdude arvu w_1 kaudu. Kasutades teises peatükis toodud aheldusvoo avaldist

(2.22) $\Psi = \omega\Phi$ ja induktiivsuse avaldist (2.24) $L = \Psi/i$, saame pärast teisendamist ja vastavate indeksite lisamist, et

$$L_{\mu p} = \frac{w_1 \Phi_0}{I_\mu},$$

kus Φ_0 on magnetvoo efektiivväärtus. Tavaliselt kasutatakse magnetahelate arvutamisel magnetvoo amplituudväärtust Φ_m . Seda arvestades saame

$$L_{\mu p} = \frac{w_1 \Phi_{0m}}{\sqrt{2} I_\mu}. \quad (4.17)$$



Joonis 4.15. Trafo magnetahela (a) asendamine ekvivalentse rööpühenduses (b) või jadaühenduses (c) elektrialelaga

Vajaduse korral võib kasutada ka aseskeemi, kus kadusid arvestav resistor ja induktiivsus on ühendatud jadamisi (joonis 4.15,c). Jada-aseskeemi aktiivtakistuse saame leida järgmiselt (jällegi Joule-Lenzi seaduse põhjal):

$$r_{\mu j} = p_{Fe} / I_0^2. \quad (4.18)$$

Puistevoogusid arvestavate poolide induktiivsused L_{1s} ja L_{2s} on võimalik arvutada puistevoogu teekonna magnetilise takistuse R_{ms} kaudu, kui see takistus trafo konstruktsiooni põhjal leida. Valmishitatud trafo korral on puisteinduktiivsuste takistusi võimalik määrata ka eksperimentaalselt lühisekatsetel, mida vaatleme edaspidi.

4.4.1 Vool, pinge ja võimsus ideaaltrafos

Kuna ideaaltrafos puistevoogu ei ole, on sekundaarmähise magnetvoog Φ_2 täpselt võrdne primaarmähise vastassuunalise magnetvooga Φ_1 . Selle tõttu peab sekundaarmähise magneetimisergutus $F_{m2} = I_2 w_2$ võrduma primaarmähise magneetimisergutusega $F_{m1} = I_1 w_1$. Järelikult võime kirjutada, et

$$I_1 w_1 = I_2 w_2$$

ehk

$$w_1 / w_2 = I_2 / I_1. \quad (4.19)$$

Kuna ideaaltrafol on pinge ja elektromotoorjõud võrdsed, siis eespool toodud avaldiste (4.9) ja (4.10) põhjal

$$U_1/U_2 = w_1/w_2 . \quad (4.20)$$

Avaldiste (4.19) ja (4.20) alusel võime kirjutada

$$U_1/U_2 = I_2/I_1 = w_1/w_2 \quad (4.21)$$

ehk

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 . \quad (4.22)$$

Avaldis (4.21) näitab, et ideaaltrafo **sekundaarpinge muutub võrdeliselt keerdude arvu suhtega ja sekundaarvool muutub pöördvõrdeliselt** keerdude arvu suhtega. **Pinget vähendades vool suureneb.** Avaldisest (4.22) näeme, et primaarpoole näivvõimsus $S_1 = U_1 I_1$ on võrdne sekundaarpoole näivvõimsusega $S_2 = U_2 I_2$:

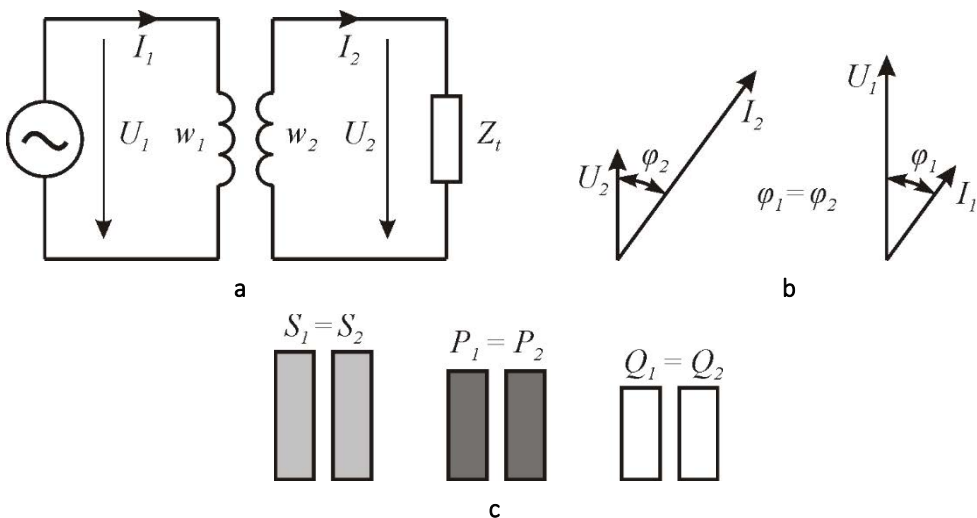
$$S_1 = S_2 . \quad (4.23)$$

Kadude puudumise tõttu ei muutu ka aktiivvõimsus:

$$P_1 = P_2 . \quad (4.24)$$

Avaldistest (4.23) ja (4.24) järeldub, et ka reaktiivvõimsus ei muutu (joonis 4.16,c):

$$Q_1 = Q_2 . \quad (4.25)$$



Joonis 4.16. Koormatud ideaaltrafo aseskeem (a), voolu- ja pingefaasorite diagramm, kui $w_1 > w_2$ (b), ja trafo kaudu ülekantavad võimsused (c)

Sekundaarpoolel määrab voolu ja pinge vahelise faasinihkenurga φ_2 koormuse näivtakistus Z_t . Sama suur faasinihkenurk on ka primaarahelas (φ_1 joonisel 4.16,b).

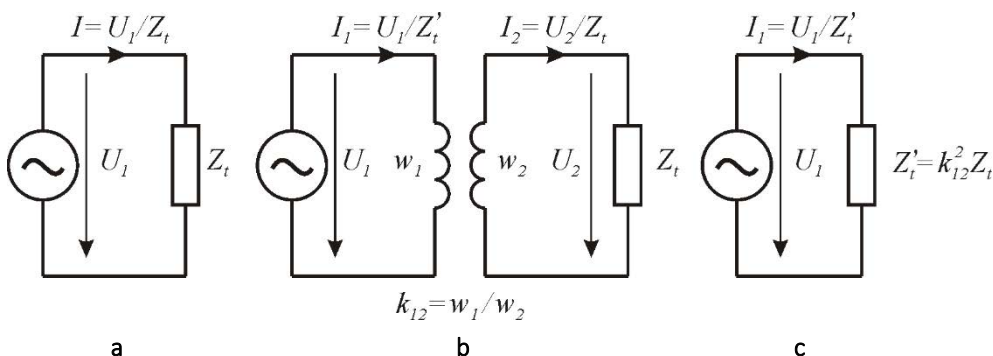
Kokku võttes võib öelda, et ideaaltrafo kannab nii aktiiv-, reaktiiv- kui ka näivvõimsust üle kadudeta (joonis 4.16). Ülekandmisel muudetakse ainult pingete ja

voolude vahetada. Suur pinge ja väike vool muudetakse väikeseks pingeks ja suureks vooluks või vastupidi. Ideaaltrafo tühijooksuvool võrdub nulliga.

Trafo kasutamise mõte ongi just pingete ja voolude vahetamine. Ideaaltrafo täidab seda ülesannet kõige paremini. Ideaaltrafot ei ole aga kahjuks võimalik valmistada ja tuleb leppida reaalsete trafodega. Reaalsel trafol esinevad aktiivkaod ja puistevoogude tõttu tarbivad nad ka reaktiivvõimsust. Selle tõttu reaaltrafode puhul ei kehti võrdused (4.23)...(4.25) ja ka (4.21) täpselt. Siiski ei ole erinevused ideaaltrafo ja reaalse trafo vahel väga suured (tavaliselt alla 10%). Seega võib ligikaudsetes arvutustes reaalsel trafot käsitleda kui ideaalset. Suuremat täpsust nõudvatel juhtudel, näiteks pingeniivo hoidmisel elektrivõrkudes, on vaja arvestada ka kadusid, puistet ja tühijooksuvoolu. Seda tehakse harilikult trafo aseskeemi kasutades, mida käsitleme allpool.

4.4.2 Näivtakistuse ehk impedantsi muutmine ideaaltrafoga

Kui mingi näivtakistuslik koormus Z_t on ühendatud toiteallika pingele U_1 (joonis 4.17,a), on tema koormusvool määratud Ohmi seadusega $I = U_1/Z_t$. Võib juhtuda, et tekkiva voolu I väärtus meid millegipärast ei rahulda. Olukorra parandamiseks võime selle koormuse Z_t ühendada toitepingele trafo kaudu.



Joonis 4.17. Ühe ja sama näivtakistuse ühendamine toiteallikaga otse (a) ja trafo kaudu (b) ning ekvivalentse näivtakistuse ühendamine toiteallikaga ilma trafota (c)

Vaatleme ideaaltrafo kasutamist, kui selle ülekandetegur on $k_{12} = w_1/w_2$ (joonis 4.17,b). Meid huvitab, kui suur on koormuse ja trafo näivtakistus üheskoos. Seda uut näivtakistust ehk impedantsi Z_t' nimetatakse näivimpedantsiks (*apparent impedance*). Selle saab leida trafo primaarvoolu ja pingele kaudu.

$$Z_t' = U_1/I_1. \quad (4.26)$$

Kuna ideaaltrafol $U_1 = k_{12}U_2$ ja $I_1 = I_2/k_{12}$, siis saame

$$Z_t' = \frac{U_1}{I_1} = \frac{k_{12}U_2}{\frac{I_2}{k_{12}}} = k_{12}^2 \frac{U_2}{I_2}. \quad (4.27)$$

Ohmi seaduse põhjal $U_2/I_2 = Z_t$, seega saame, et

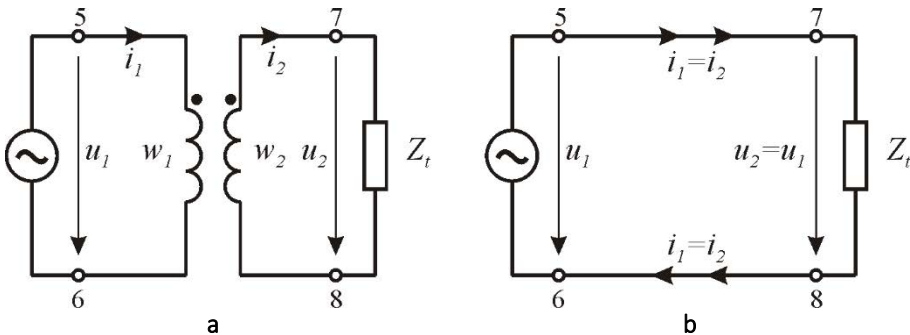
$$Z'_t = k_{12}^2 Z_t. \quad (4.28)$$

Avaldisest (4.28) võime järeldada, et **mingi koormuse ühendamisel toiteallikaga ideaaltrafo kaudu, mille ülekanalitegur on k_{12} , muutub selle koormuse takistus võrdeliselt ülekanaliteguri ruuduga**. Koormuse Z_t ühendamine toiteallikaga trafo kaudu annab sama tulemuse, mis ekvivalentse koormuse Z'_t ühendamine otse, ilma trafota (joonis 4.17,c). Trafo abil saab toiteallika pinget ja koormuse takistust sobitada.

4.4.3 Ideaalset trafot sisaldava ahela arvutamine

Trafo primaar- ja sekundaarahel on erinevatel pingetel, mis muudab arvutuse tülikaks. Arvutuse lihtsustamiseks asendatakse kas primaar- või sekundaarahel **ekvivalentse ahela** (*equivalent circuit*) ehk **aseskeemiga**. Sealjuures valitakse selline aseskeem, et trafo poolte pinged on võrdsed (trafo ülekanalitegur on siis 1:1 ja mähiste keerdude arvud on võrdsed). Trafo ühe poole ekvivalentset asendamist nimetatakse trafo ühe poole teisele poolele **taandamiseks** (*reflecting or refering*). Ekvivalentsuse säilitamiseks tuleb taandatavas ahelas olevate takistuste väärtusi muuta vastavalt eelmises punktis leitud avaldisele (4.28).

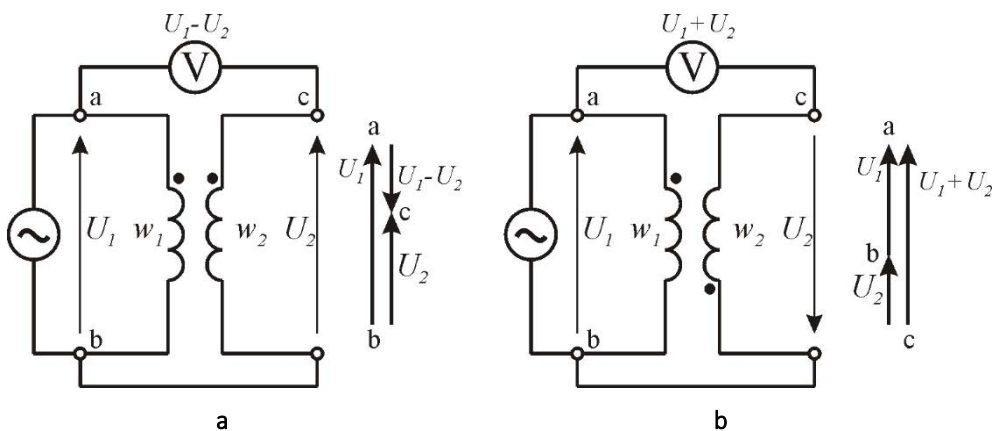
Ideaaltrafol (joonis 4.18,a), mille ülekanalitegur on 1:1, on võrdsed nii mõlema poole pinged ($u_1 = u_2$) kui ka mõlema poole voolud ($i_1 = i_2$). Sellise trafo võib asendada joonisel 4.18,b näidatud ekvivalentse ahelaga. See ekvivalentne ahel sisaldab ainult kahte ühendust. Omavahel on kokku ühendatud primaar- ja sekundaarpoole samanimelised klemmid (antud juhul **märgitud klemmid 5 ja 7 ning vastavalt ka kaks märkimata klemmi 6 ja 8**). Skeemil tähistatakse märgitud klemmid rasvaste punktidega. Trafo klemme on vaja märkida suhtelise polaarsuse arvestamiseks. Klemmide märkimist nimetatakse ka trafo mähiste faasi määramiseks ehk **faseerimiseks**.



Joonis 4.18. Ideaaltrafo (a) võib mähiste võrdse keerdude arvu korral asendada primaar- ja sekundaarpoole vastavate klemmide ühendusega (b)

Kui näiteks klemmile 5 joonisel 4.18,a on mingil hetkel rakendatud positiivne pinge ja magneetimisvool siseneb selle klemmi kaudu trafo mähisesse, tekib küsimus, milline klemm on samal hetkel positiivne sekundaarmähisel – kas klemm 7 või klemm 8. Selle määramiseks kõrvaldamiseks klemmid märgitakse. Ühe

mähise, tavaliselt primaarmähise, ühele klemmile pannakse märk suvaliselt (näiteks klemmile 5 joonisel 4.18,a). Teiste mähiste märgiga klemmid määratakse mõõteriista (ostsilloskoobi või voltmeetri) abil. Märgid pannakse nii, et kõikide märgitud klemmide polaarsus on vahelduvpinge ühel ja samal poolperioodil ühesugune. Trafo mähiste faasierimist voltmeetriga on näidatud joonisel 4.19.



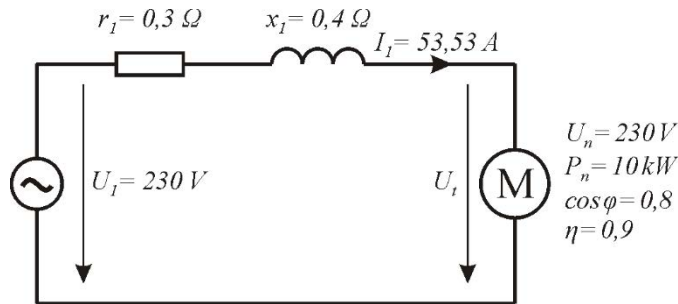
Joonis 4.19. Trafo mähiste faasi määramine voltmeetriga, kui voltmeeter on ühendatud samanimeliste (a) või erinimeliste (b) klemmide vahele

Faseerimisel ühendatakse üks vabalt valitud primaarmähise klemm (klemm b joonisel 4.19) ühe sekundaarmähise klemmiga, mis on samuti vabalt valitud. Ülejäänud kahe klemmi (a ja c) vahele ühendatakse voltmeeter. Juhul, kui klemmide a ja b pinged on samas faasis, näitab voltmeeter primaarpinge U_1 ja sekundaarpinge U_2 vahet (joonis 4.19,a). Sel juhul võime märgitud klemmideks võtta kas voltmeetriga ühendatud klemmid nagu joonisel 4.19,a või ülejäänud kaks klemmi. Primaar- ja sekundaarpinge vahe $U_1 - U_2$ kujunemine on näidatud faasordiagrammil. Kui aga juhuslikult valitud klemmide kokkuühendamisel näitab voltmeeter primaar- ja sekundaarpinge summat, tuleb klemmid märkida nii, nagu on seda tehtud joonisel 4.19,b.

Kui ideaaltrafol, mille mähised on võrdse keerdude arvuga, ühendada kokku mõlema mähise märgitud klemmid (klemmid 5 ja 7 joonisel 4.18,a), on ülejäänud klemmide 6 ja 8 vahel pinge null, sest $U_1 - U_2 = 0$. Seega võime ka klemmid 6 ja 8 kokku ühendada. Peale selle võime veel trafo mähised eemaldada, tulemuseks on joonisel 4.18,b toodud aseskeem. Trafo sekundaarpoole ja primaarpoole vool ja pinge selle tagajärjel ei muutu. Koormustakisti Z_t , mis on ühendatud sekundaarklemmidele 7 ja 8, võime nüüd ka otse primaarklemmidele 5 ja 6 ühendada ja mitte midagi selle tõttu ei muutu. Vaatame ideaaltrafot sisaldava ahela arvutamist ka näite varal.

Ülesanne 4.2

Ühefaasiline vahelduvvoolumootor, mille nimivõimsus P_n on 10 kW, võimsustegur 0,8 ja kasutegur 0,9, saab toitepinge 230 V pika liini kaudu. Toiteliini aktiivtakistus on $r_1 = 0,3 \Omega$ ja induktiivtakistus $x_1 = 0,4 \Omega$ (joonis 4.20). Leida pinge mootoril ja võimsuskadu ülekanaliinis.



Joonis 4.20. Elektrimootori toitmise madalpinge elektriliinist

Lahendus

Leiame mootori niminäivvõimsuse S_n ja tarbitava aktiivvõimsuse P_t :

$$S_n = \frac{P_n}{\cos \varphi \cdot \eta} = \frac{10}{0,8 \cdot 0,9} = 13,89 \text{ kVA},$$

$$P_t = \frac{P_n}{\eta} = \frac{10}{0,9} = 11,11 \text{ kW}.$$

Leiame mootori näivtakistuse z_t :

$$z_t = \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{230^2}{13,89 \cdot 10^3} = 3,81 \Omega.$$

Selle komplekstakistuse nurk on määratud võimsusteguriga, $\varphi = \arccos 0,8 = 36,87^\circ$.

Leiame liini koormuseks oleva mootori komplekstakistuse reaali- ja imaginaarosa:

$$r_t = z_t \cos \varphi = 3,81 \cdot 0,8 = 3,05 \Omega,$$

$$x_t = z_t \sin \varphi = 3,81 \cdot 0,6 = 2,29 \Omega.$$

Vool liinis on

$$\begin{aligned} I_l &= U_l / (r_l + jx_l + r_t + jx_t) = 230 \angle 0^\circ / (0,3 + j0,4 + 3,05 + j2,29) \\ &= 230 \angle 0^\circ / (3,35 + j2,69) = 230 \angle 0^\circ / 4,30 \angle 38,76^\circ = 53,53 \angle -38,76^\circ \text{ A}. \end{aligned}$$

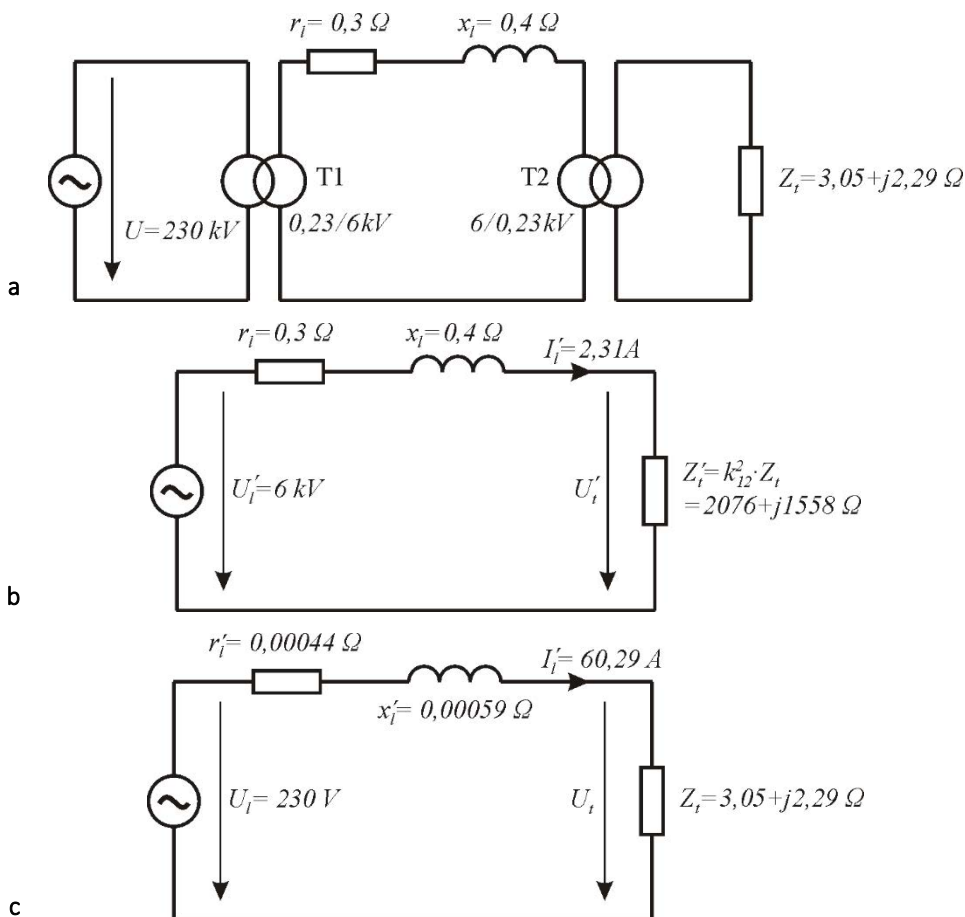
Mootori pingel on

$$U_t = I_l z_t = 53,53 \angle -38,76^\circ \cdot 3,81 \angle 36,86^\circ = 204 \angle -1,9^\circ \text{ V}$$

ja kadu liinis

$$P_{\text{kadu}} = I_l^2 r_l = 53,53^2 \cdot 0,3 = 860 \text{ W}.$$

Kehtivad normid lubavad tavaliselt minimaalse toitepingena 10% nimipingest väiksemat pinget. Seega oleks mootori lubatav minimaalne pingel $230 \cdot 0,9 = 207 \text{ V}$. Järelikult tuleb liini pingelangu vähendada. Teeme seda trafodega, mis on liini pingelangu vähendamise üldlevinud viis. Selleks paneme liini algusesse trafo T1 (joonis 4.21,a), mis tõstab pinget 0,23 kilovoldilt kuuele kilovoldile ja liini lõppu teise trafo T2, mis langetab pinget kuult kilovoldilt tagasi 0,23 kilovoldile. Liini takistus jääb samaks ja trafod loeme ideaaltrafodeks.



Joonis 4.21. Elektrimootori toitmine 6 kV elektriliini kaudu (a), 6 kV pingeniivole taandatud aseskeem (b) ja 230 V pingeniivole taandatud aseskeem (c)

Leiame pinge mootoril ja kaod liinis uues olukorras. Arvutamisel kasutame taandatud aseskeemi. Taandamist on võimalik teha kahel erineval viisil. Võime näiteks kogu skeemi viia pingeniivole 6 kV (joonis 4.21,b). Sel juhul jääb liini takistus muutumatuks, sest liin ongi sellel pingel, kuid tarbija takistus tuleb taandada 0,23 kilovoldilt kuuele kilovoldile. Taandamisvalemit (4.28) kasutades saame

$$Z_t' = k_{12}^2 Z_t = \left(\frac{6000}{230}\right)^2 \cdot (3,05 + j2,29) = 2075,6 + j1558,4 \Omega.$$

Nüüd leiame voolu liinis

$$I_{l\ 6kV} = \frac{U_l k_{12}}{r_l + jx_l + r_t' + jx_t'} = 230 \cdot \frac{6000}{230} / (0,3 + j0,4 + 2075,6 + j1558,4) \\ = 6000 / (2075,9 + j2558,8) = 6000 \angle 0^\circ / 2596 \angle 36,9^\circ = 2,31 \angle -36,9^\circ \text{ A}.$$

Mootori pinge 6 kV nivool on

$$U'_t = I_{l_{6kV}} z'_t = 2,31 \angle -36,90^\circ (2075,6 + j1558,4) = 5995,6 \angle 0^\circ \text{ V}$$

ja 230 V nivool

$$U_t = k_{21} U'_t = \frac{230}{6000} \cdot 5995,6 = 229,8 \text{ V}.$$

Kadu liinis on

$$P_{\text{kadu}} = I_{l_{6kV}}^2 r_l = 2,31^2 \cdot 0,3 = 1,6 \text{ W}.$$

Sama arvutuse võime teha ka nii, et taandame kogu skeemi 230-voldisele pingeniivoole (joonis 4.21,c). Sel juhul tarbija takistus ei muutu, sest tarbija ongi sellel pingel, kuid vaja on taandada liini takistust, sest liini pinge on 6 kV. Nüüd on vaja taandada trafo T2 primaarpoolelt sekundaarpoolele ja pinge taandamistegur on $k_{21} = 230/6000$. Taandamisel on alati kasulik silmas pidada, et kõrgemalt pingelt madalamale liikudes takistus väheneb ja vastupidises suunas liikudes suureneb. 6 kV liini takistus 230 V nivool on

$$r'_l = k_{21}^2 r_l = \left(\frac{230}{6000}\right)^2 \cdot 0,3 = 0,00044 \, \Omega,$$

$$x'_l = k_{21}^2 x_l = \left(\frac{230}{6000}\right)^2 \cdot 0,4 = 0,00059 \, \Omega.$$

Vool liinis on

$$I_l = \frac{U_l}{r'_l + jx'_l + r_t + jx_t} = \frac{230 \angle 0^\circ}{0,00044 + j0,00059 + 3,05 + j2,29} \\ = \frac{230 \angle 0^\circ}{3,815 \angle 36,90^\circ} = 60,29 \angle -36,90^\circ \text{ A}.$$

Mootori pingel on

$$U_t = I_l z_t = 60,29 \angle -36,90^\circ \cdot 3,81 \angle 36,86^\circ = 229,7 \angle -0,04^\circ \text{ V}.$$

Kadu liinis on

$$P_{\text{kadu}} = I_l^2 r'_l = 60,29^2 \cdot 0,00044 = 1,6 \text{ W}.$$

Mõlemad aseskeemid annavad arvutustäpsuse piires sama tulemuse. 230 voldile taandatud aseskeemilt (joonis 4.21,c) on näha, et liini pinge tõstmisel väheneb tema ekvivalentne takistus väga palju. Selle tõttu muutuvad ülekandeliini pingelang ja kaod liinis madalpingelise ülekandega võrreldes väga väikeseks.

Optimaalseks pingeniivoks loetakse umbes 1 V meetrile ehk 1000 V kilomeetrile. Sõiduautos on näiteks kasutusel pingel 12 V, kuid autobussis juba 24 V. Tarbetult kõrge pinget tekitab probleeme isolatsiooni ja elektriohutusega. Elektrienergia ülekandevõrkudes kasutatakse mitmesuguseid pingeniivoosid, mille vahel on trafod. Eestis kasutatakse järgmisi võrgupingeid:

| | |
|---|------------------------------------|
| Kõrgepingel (HV, <i>high voltage</i>) | 110 ja 330 kV, |
| Keskpingel (MV, <i>middle voltage</i>) | 6, 10, 20 ja 36 kV, |
| Madalpingel (LV, <i>low voltage</i>) | 230/400 V (Nliidu ajal 220/380 V). |

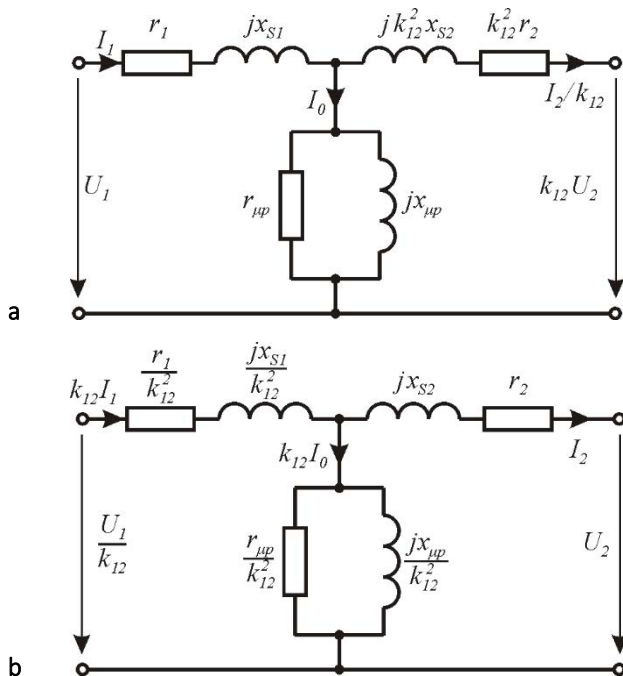
Mõnede tarbijate jaoks (kantavad valgustid, käsitööriistad) on kasutusel ka madalamad pinged, mille standardsed väärtused ja nimetused on:

Väikepinge (ELV, *extra low voltage*) 36 V,

Ohutu väikepinge (SELV, *safety extra low voltage*) 12 V.

4.5 Trafo askeem

Trafo askeem kirjeldab reaalse trafo kõiki olulisi parameetreid ja nendevahelisi seoseid elektriskeemi abil. Kahemähiselise trafo jaoks saab koostada kaks askeemi, millest üks on primaarpinge nivool (joonis 4.22,a) ja teine sekundaarpinge nivool (joonis 4.22,b).

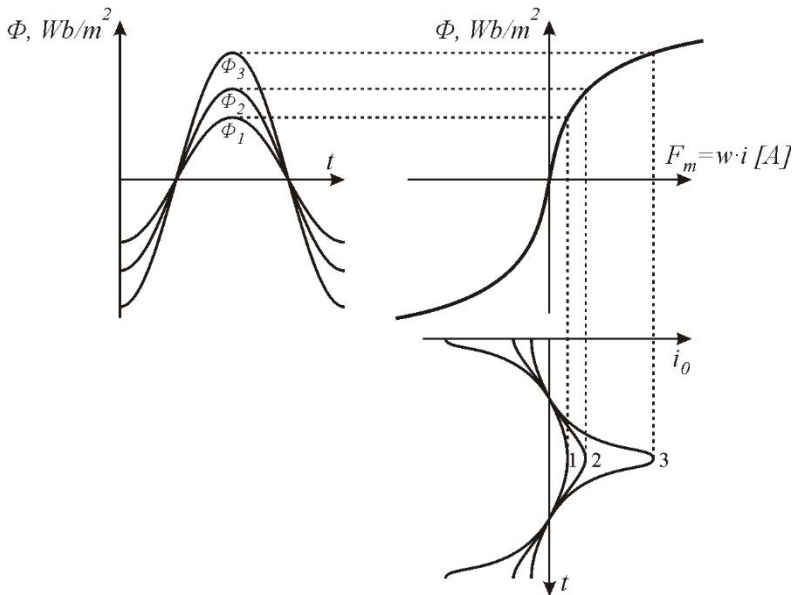


Joonis 4.22. Primaarpoolele taandatud trafo askeem (a) ja sekundaarpoolele taandatud trafo askeem (b)

Need askeemid on koostatud joonisel 4.14 toodud trafo mudeli alusel. Tehtud on järgmised muudatused. Magnetahel on asendatud ekvivalentse rööpse elektriskeemiga. Ühel juhul on sekundaarmähise takistused taandatud primaarpoolele (joonis 4.22,a), teisel juhul on primaarmähise ja magneetimisahela takistused taandatud sekundaarpoolele (joonis 4.22,b). Ideaaltrafo, mille ülekandesuhe taandamise tulemusena on 1 : 1, on asendatud vastavalt klemmide 5 ja 7 ning 6 ja 8 vaheliste ühendustega. Induktiivsused on askeemis asendatud induktiivtakistustega. Sellega on kaudselt arvesse võetud toitepinge sagedus.

Taandamist primaarpoolele on sobiv teha siis, kui uuritakse toitevõrgus toimuvaid protsesse. Taandamist sekundaarpoolele on sobiv teha siis, kui uuritakse koormus-

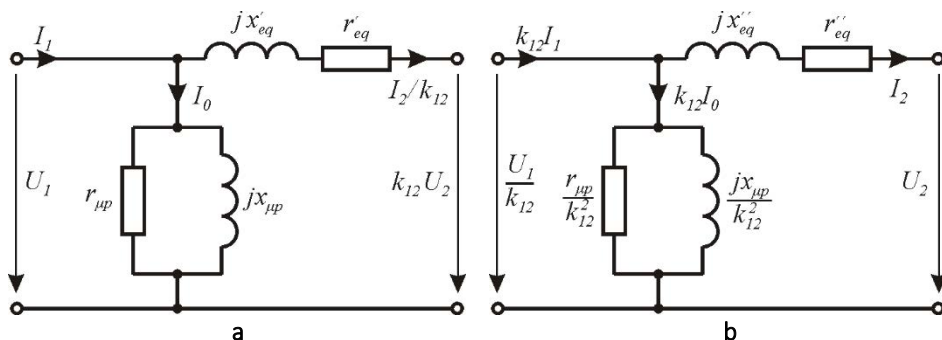
ahelas toimuvaid protsesse. Näiteks on võimalik uurida koormusvoolu I_2 suurusest tingitud sekundaarpinge U_2 muutumist. Aseskeem kirjeldab piisavalt täpselt mähiste aktiivtakistuse ja puiste induktiivtakistuse mõju, samuti ka südamiku rauaskao mõju. Kõige ebatäpsemalt kirjeldab aseskeem magnetimisharu voolu I_0 , sest ei ole arvestatud magnetahela mittelineaarsust. Aseskeemis oleva induktiivtakistuse vool on siinuseline ja pingega võrdeline. Tegelikult magnetimisvool siinuseline ei ole ja nimipingest suuremal pingel kasvab vägagi järsult. Selle põhjuseks on trafo südamikuks kasutatava elektrotehnilise terase magnetimiskõvera mittelineaarsus, mille mõju selgitab joonisel 4.23 toodud graafiline konstruktsioon.



Joonis 4.23. Trafo südamiku magnetvoo amplituudväärtuse mõju magnetimisvoolule

Kui magnetvoo amplituud on väike (Φ_1 joonisel 4.23), liigub tööpunkt magnetimiskõvera ligikaudu lineaarsel osal ja magnetimisvoolu i_0 kõver on ligikaudu siinuseline. Magnetvoo amplituudi kasvades läheb tööpunkt kõvera põlve piirkonda ja üle selle (vastavalt Φ_2 ja Φ_3). Selles piirkonnas kasvab magnetimisvool kiiresti ja muutub mittesiinuseliseks. Magnetvoog muutub võrdeliselt pingega. Juba 20-protsendiline pinge tõus üle nimipingega võib trafo primaarmähise magnetimisvooluga üle koormata. Aseskeem seda aga ei kajasta, sest selles on induktiivsus lineaarne. Nimipingel ja sellest madalamal tasemel on aseskeem siiski piisavalt korrektne.

Magnetimisvool I_0 on koormusvooluga võrreldes suhteliselt väike (orienteerivalt 10%). Selle voolu põhjustatud pingelang aseskeemi elementidel r_1 ja $j_{X_{S1}}$ on väga väike (tavaliselt alla ühe protsendi nimipingest) ja enamasti võib selle arvestamata jätta. Seega võib kasutada joonisel 4.24 toodud lihtsustatud aseskeemi, kus primaar- ja sekundaarmähise aktiivtakistused ja puisteinduktiivtakistused on taandamistegurit arvestades kokku liidetud ja saadud ekvivalentsed takistused r_{eq} ja x_{eq} .



Joonis 4.24. Trafo lihtsustatud askeem kokku liidetud primaar- ja sekundaarmähise aktiivtakistuste ja puisteinduktiivtakistustega: a – taandatud primaarpoleele; b – taandatud sekundaarpoleele

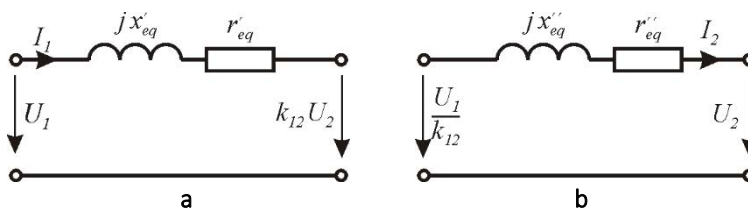
Primaarpoleele taandamisel

$$\begin{aligned} r'_{eq} &= r_1 + k_{12}^2 r_2, \\ x'_{eq} &= x_{S1} + k_{12}^2 x_{S2}. \end{aligned} \quad (4.29)$$

Sekundaarpoleele taandamisel

$$\begin{aligned} r''_{eq} &= \frac{r_1}{k_{12}^2} + r_2, \\ x''_{eq} &= \frac{x_{S1}}{k_{12}^2} + x_{S2}. \end{aligned} \quad (4.30)$$

Mõnel juhul võib magnetimisvoolu ja koos sellega magnetimisharu askeemil (joonis 4.24) ignoreerida. Siis saame veelgi lihtsama askeemi (joonis 4.25).



Joonis 4.25. Trafo lihtsustatud askeem magnetimisharuta: a – taandatud primaarpoleele; b – taandatud sekundaarpoleele

4.6 Suhteliste ühikute süsteemi kasutamine

Kui me tahame teha arvutusi elektriahelas, kus on üks kahemähiseline trafo, peame valima, kas taandada kogu skeem ülepinge või alampinge tasemele. Suurema arvu trafomähiste või trafode korral tuleb valida mingi ühe mähise pinge, millele kõik ülejäänud taandada. Mõnel juhul saab sellist tülikat ja aeganõudvat tööd vältida suhteliste ühikute süsteemi kasutamisega. Suhteliste ühikute süsteemi korral kasutatakse pingete, voolude ja takistuste tegelike väärtuste asemel nende suhteid baasväärtustesse. Baaspinge, baasvool, baasnäivtakistus ja baasnäivvõimsus moodustavad

baasväärtuste süsteemi. Baasväärtuste süsteemi loomisel tuleb esmalt valida kaks baasväärtust, ülejäänud kaks on siis tuletatud baasväärtused. Trafode puhul sobib baasväärtusteks valida mingi ühe mähise nimipinge U_n ja trafo nimivõimsus S_n . Tuletatud baasväärtused on siis nimivool

$$I_n = \frac{S_n}{U_n} \quad (4.31)$$

ja nimiräivtakistus

$$Z_n = \frac{U_n}{I_n} = \frac{U_n^2}{S_n}. \quad (4.32)$$

Nimiräivtakistust nimetatakse vahel lihtsustatult ka nimitakistuseks.

Tegelike väärtuste ja baasväärtuste kaudu leitakse pinge, voolu, võimsuse ja näivtakistuse suhtelised väärtused. Eestis on levinud tava tähistada suhtelisi suurusi väiketähtedega, mille ülaindeksiks on tärn. Suhteline pinge

$$u^* = U/U_n. \quad (4.33)$$

Suhteline näivtakistus

$$z^* = z/Z_n. \quad (4.34)$$

Suhteline aktiivtakistus

$$r^* = r/Z_n. \quad (4.35)$$

Suhteline induktiivtakistus

$$x^* = x/Z_n. \quad (4.36)$$

Suhtelised suurused on kõik ilma ühikuta, kuid mõnikord siiski kasutatakse tähist "sü" (suhteline ühik), näiteks $r^* = 0,2$ sü. Ingliskeelses kirjanduses kasutatakse suhteliste suuruste tähistamiseks tavaliselt suuri tähti, millele on lisatud alaindeks "pu" (*per-unit* ehk ühiku kohta), näiteks $Z_{pu} = 0,3$ pu. Paneme tähele, et trafo puhul võrdub suhtelistes ühikutes nimivõimsus ühega ($S_{pu} = S_n/S_n = 1$ sü), ja et suhtelistes ühikutes aktiiv-, reaktiiv- ja näivtakistuse väärtused ei sõltu sellest, milline oli valitud baaspinge. Küll aga sõltub baaspinge väärtusest nimiräivtakistus.

Näide

Meil on 230/12 V trafo (primaarpinge on 230 V ja sekundaarpinge 12 V), mille nimivõimsus on 400 VA ja mida koormatakse aktiivtakistusega $r_{koormus} = 1 \Omega$.

Valime baaspingeks $U_{1n} = 230$ V. Baastakistus primaarpingel on

$$Z'_n = \frac{U_{1n}}{I_n} = \frac{U_{1n}^2}{S_n} = \frac{230^2}{400} = 132,3 \Omega.$$

Kui valime baaspingeks sekundaarpinge $U_{2n} = 12$ V, siis on baastakistus

$$Z''_n = \frac{U_{2n}^2}{S_n} = \frac{12^2}{400} = 0,36 \Omega.$$

Sekundaarpoole takistuse 1Ω väärtus suhtelistes ühikutes on

$$r_{\text{koormus}}^* = \frac{r_{\text{koormus}}}{Z_n''} = \frac{1}{0,36} = 2,78 \text{ s\u00f9}.$$

Kui me nüüd muudame koormustakistust nii, et $r_{\text{koormus}}^* = 1 \text{ s\u00f9}$, on vastav sekundaarpoole tegelik takistus oomides

$$r_{\text{koormus}} = r_{\text{koormus}}^* Z_n'' = 1 \cdot 0,36 = 0,36 \Omega$$

ja sellise takistusega takistil eralduv võimsus pingel 12 V on

$$P = \frac{U^2}{r_{\text{koormus}}} = \frac{12^2}{0,36} = 400 \text{ W}.$$

Kui meil on primaarpoolel koormustakisti, mille takistuse väärtus suhtelistes ühikutes on samuti $r_{\text{koormus}}^* = 1 \text{ s\u00f9}$, on selle takistus oomides

$$r_{\text{koormus}} = r_{\text{koormus}}^* Z_n' = 1 \cdot 132,3 = 132,3 \Omega$$

ning sellel takistil eralduv võimsus pingel 230 V on

$$P = \frac{230^2}{132,3} = 400 \text{ W}.$$

Sellest näitest järeldub, et kui takistus on antud suhtelistes ühikutes, ei sõltu sellel eralduv võimsus pinge nivoost (sekundaar- või primaarpinge). Küll aga sõltub sellel takistil eralduv võimsus baasnäivvõimsusest, milleks tavaliselt on trafo niminäivvõimsus. Kui ükskõik millise võimsusega trafo ükskõik millise mähise klemmidele on ühendatud koormustakistus $r_{\text{koormus}}^* = 1 \text{ s\u00f9}$, eraldub sellel koormustakistusl trafo nimivõimsusega võrdne võimsus. Selle tõttu on suhteliste ühikute kasutamisel võimalik võrrelda ka erineva võimsusega trafode aktiiv- ja induktiivtakistusi, kadusid ja muud sarnast.

4.7 Trafo lühis ja lühisekatse

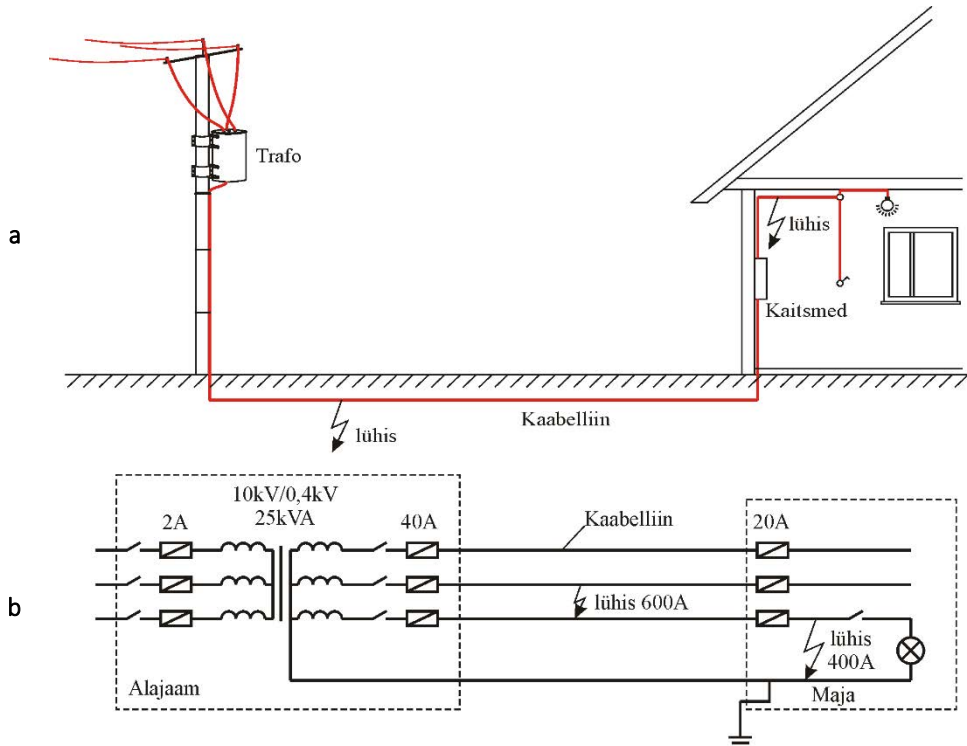
4.7.1 Miks on vaja uurida trafo lühisetalitlust?

Enamik maju on tänapäeval varustatud elektriga. Elektrijuhtmeid on peaaegu igas ruumis. Kui elektrijuhtmete isolatsioon saab vigastada, tekib nn lühis. Paljad elektrijuhtmed puutuvad üksteise vastu ja kahe pingestatud juhtme vaheline takistus muutub väga väikeseks (nullilähedaseks). Ohmi seadus ütleb, et kui takistus muutub nulliks, muutub vool lõpmatult suureks. Tegelikult vool lõpmatult suureks ei muutu, kuid normaalsest voolust väga palju suuremaks ikkagi. Suur vool on ohtlik, sest juhtmed kuumenevad ja kergesti võib tekkida tulekahju.

Ehkki juhtmete isolatsiooni vigastusi ei esine just iga päev, on kehtestatud siiski range nõue, et kõik elektripaigaldised peavad olema lühise vastu kaitstud. Lühisevastane kaitse seisneb selles, et juhtmetes ohtlikult suure voolu tekkimisel lülitatakse pinge nii kiiresti kui võimalik välja. Siis ei jõua juhtmed veel liigselt kuumeneda. Väljalülitamine toimub kas kaitselülitil või sulavkaitsmete abil. Nii kaitse-

lülitid kui ka sulavkaitsmed ei suuda välja lülitada väga suurt voolu. Elektrivõrgus tekkida võiva lühisevoolu suurust on vaja teada, et vastavalt sellele valida kaitse. Kaitse ei tohi rakenduda normaalsel töövoolul, kuid peab rakenduma lühise korral. Kaitsmete rakendusvoolud on teada ja me peame olema veendunud, et lühise korral tekib kaitsme rakendusvoolust suurem vool.

Joonisel 4.26 on näidatud osa maja elektrivarustusest ja sellele vastav elektriskeem. Elektriskeemile on märgitud ka lühisevoolu väärtused neiks juhtudeks, kui kas kaabelliinis või maja sees tekib lühis.

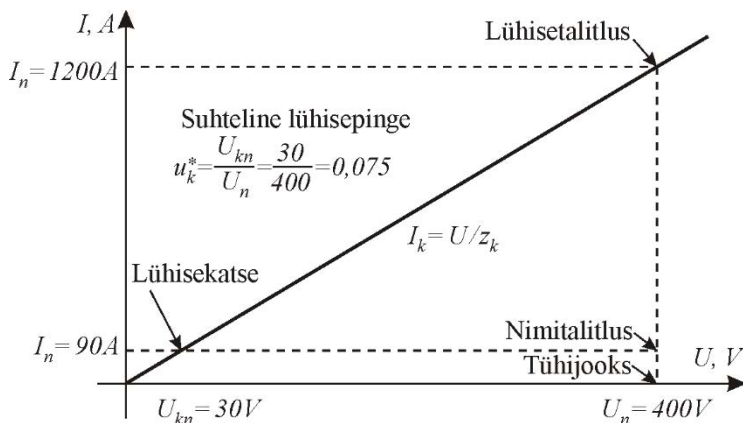


Joonis 4.26. Maja varustamine elektriga (a) ja elektrivarustuse skeem, kus on näidatud ka võimalike lühisevoolude väärtused (b)

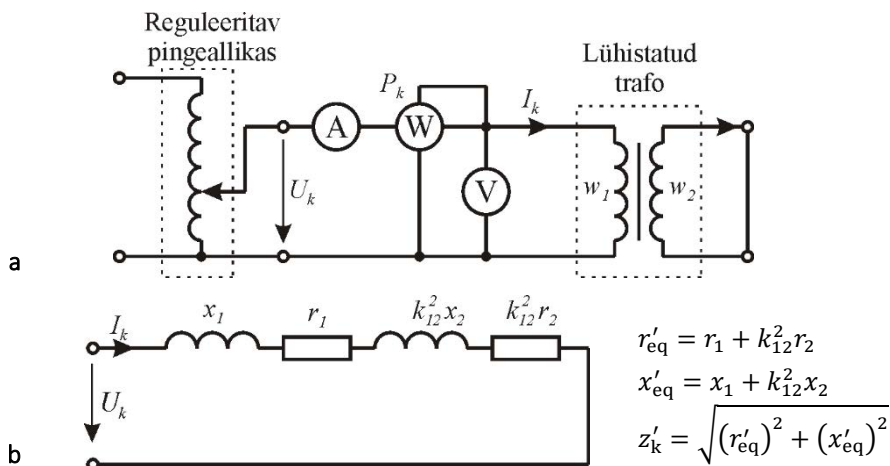
Lühisel ei lähe voolud kunagi lõpmatult suureks, sest liinidel ja trafodel on alati olemas nii aktiivne kui ka induktiivne takistus. Lühisevoolu piiramisel on oluline osa just trafo takistusel, sest see on küllalt suur ja püsiv. Lühis võib tekkida kohe liini alguses, kus liinijuhtmete pikkus ja seetõttu ka liini takistus on veel tühisid. Trafo näivtakistuse lühise korral ja selle näivtakistuse aktiiv- ja reaktiivkomponendid saab leida nii arvutuslikult kui ka katseliselt. Vastavat katset nimetatakse lühisekatseks. Kui lühis tekib trafo nimipingel, siis on tekkivad lühisevoolud trafo arvutuslikust nimivoolust umbes 20 korda suuremad. Katseks selline olukord ei sobi, sest nii suure voolu peab kaitse otsekohe välja lülitama ja mõõtmisi teha ei saa. Selleks, et mõõtmisi teha saaks, kasutatakse lühisekatse jaoks nimipingest 10...20 korda väiksemat pinget.

4.7.2 Lühisekatse tegemine

Joonisel 4.27 on näidatud lühisekatse, lühisetalitluse, nimitalitluse ja tühijooksu tööpunktid trafo jaoks, mille nimipinge $U_n = 400\text{ V}$, nimivool $I_n = 90\text{ A}$ ja lühise näivtakistus $z_k = 0,33\ \Omega$. Joonisel 4.28 on näidatud ühefaasilise trafo lühisekatse skeem ja lühistatud trafo aseseem.



Joonis 4.27. Trafo erinevad talitlused ja lühisekatse tööpunkt



Joonis 4.28. Ühefaasilise trafo lühisekatse skeem (a) ja lühistatud trafo aseseem (b)

Katsetatava trafo sekundaarmähis on lühistatud, primaarmähisega on rööbiti ühendatud voltmeeter ja wattmeetri pingemähis ning jadamisi ampermeeter ja wattmeetri voolumähis (joonis 4.28,a). Primaarmähis saab pinge reguleeritavast pingellikast, milleks antud juhul on autotrafo, läbi ampermeetri ja wattmeetri mähiste. Katse alustamisel on reguleeritava pingellika pinge null ja seda hakatakse tõstma, jälgides samaaegselt ampermeetri näitu. Pinget tõstetakse sammhaaval ja igal sammul registreeritakse mõõteriistade näidud, et hiljem konstrueerida lühise tunnusjooned pinge funktsioonina. Pinget tõstetakse seni, kuni ampermeeter näitab primaarmähise

nimivoolu. Sellega on katsetatav trafo viidud lühisekatse nimitööpunkti. Joonisel 4.27 on lühisekatse nimitööpunkt näidatud ühe konkreetse trafo jaoks. Sellel trafol on nimivoolu 90 A juures primaarmähisele antav pinge $U_{kn} = 30$ V. Lühisetalitlusele vastavaid suurusi tähistatakse indeksiga k . Samal joonisel on toodud ka trafo nimitööpunkt, kus voolul 90 A on pinge 400 V. Siinjuures on vaja silmas pidada, et nimitalitluses ei ole trafo sekundaarmähis lühistatud, vaid seal on mingi tarbija, mis võtab 90 A voolu. Kui aga sellel nimipingel tekib trafo sekundaarahelas lühis, suureneb primaarpoole vool väärtuseni $I_k = 1200$ A (joonis 4.27). See voolu väärtus ei ole mõõdetud, vaid on arvatud lühisetakistuse z_k kaudu. Lühisetakistus z_k määratakse aga lühisekatsest, kus vastavalt eeltoodule on voolud ja pinged oluliselt väiksemad. Niiviisi on lahendatud lühisel tekkivate suurte ja ohtlike voolude katselise määramise probleem.

Lühistatud trafo aseskeemil joonisel 4.28,b puudub magneetimisharu. Lühisekatsel on primaarmähise pinge tema nimipingest väga palju väiksem. Selle tõttu on magneetimisvool tühiselt väike ja seda pole mõtet arvestada. Tegelikul lühisel on magneetimisharu pinge nimipingest umbes kaks korda väiksem, sest suur vool tekitab primaarmähisel suure pingelangu. Selle tõttu on magneetimisvool mitu korda väiksem kui nimitalitluses (magneetimisharu vahelduvvoolutakistus on mitte-lineaarne). Lõppkokkuvõttes on ka tegelikul lühisel magneetimisvoolu osatähtsus lühisevoolus väga väike ja seda pole vaja arvestada.

4.7.3 Lühisekatsel saadud andmete kasutamine

Trafo lühisekatsel registreeritakse ampermeetri, vattmeetri ja voltmeetri näidud. Nende näitude põhjal arvutatakse lühise näivtakistus z_k , reaktiivtakistus x_k ja aktiivtakistus r_k . Ühefaasilise trafo korral on arvutusvalemid järgmised:

$$z_k = U_k/I_n ; \quad r_k = P_k/I_n^2 ; \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} . \quad (4.37)$$

Mõõtmistulemuste järgi arvatud aktiivtakistus r_k vastab joonisel 4.28,b näidatud lühise aseskeemi ekvivalentsele aktiivtakistusele r'_{eq} . Lühise aktiivtakistus on seotud punktis 4.5 toodud aseskeemi takistustega järgmiselt:

$$r_k = r_1 + k_{12}^2 r_2 = r_1 + r'_2 . \quad (4.38)$$

Analoogiliselt reaktiivtakistus

$$x_k = x_1 + k_{12}^2 x_2 = x_1 + x'_2 \quad (4.39)$$

ja näivtakistus

$$z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2} . \quad (4.40)$$

Seega on lühisekatse põhjal leitavad takistused primaarpoole ja sekundaarpoole vastavate takistuste summad, kusjuures sekundaarpoole takistused on taandatud primaarpoolele. Lühisekatse ei võimalda määrata primaarmähise ja sekundaarmähise takistusi eraldi. Juhul, kui on siiski vaja neid takistusi ligikaudselt eraldi teada, võib näiteks aktiivtakistuse jaoks lugeda, et

$$r_1 \approx r'_2 \approx 0,5 r_k. \quad (4.41)$$

Kolmefaasiliste trafode korral mõõdetakse voolud ja pinged kõikides faasides ja määratakse seejärel liinivoolu I_{ln} ja lühisekatse liinipinge U_{lk} keskmised väärtused. Võimsus määratakse kõigi kolme faasi summaarse lühisevõimsusena P_k .

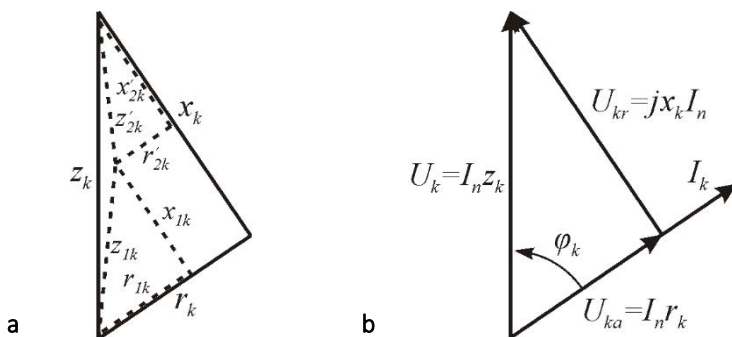
Primaarmähiste tähtsuse korral arvutatakse faasi lühiseparameetrid järgmiselt:

$$z_k = U_{lk}/\sqrt{3}I_{ln}; \quad r_k = P_k/3I_{ln}^2; \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}. \quad (4.42)$$

Kolmnurkühenduse korral:

$$z_k = \sqrt{3} U_{lk}/I_{ln}; \quad r_k = P_k/I_{ln}^2; \quad x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2}. \quad (4.43)$$

Katsetulemuste põhjal leitud lühisetakistuste z_k , x_k ja r_k järgi saab joonestada lühisetakistuste kolmnurga (joonis 4.29,a). Lühisetakistuste korrutamise nimivooluga annab lühisepinge $U_k = z_k I_n$, lühisepinge reaktiivkomponendi $U_{kr} = x_k I_n$ ja lühisepinge aktiivkomponendi $U_{ka} = r_k I_n$. Nende pingete järgi saab koostada lühisekatse faasordiagrammi (joonis 4.29,b).



Joonis 4.29. Trafo lühisetakistuste kolmnurk (a) ja lühisekatse faasordiagramm (b)

Nurk φ_k lühise pingefaasori U_k ja voolufaasori I_k vahel on lühise faasinihkenurk. Lühisetakistuste kolmnurga sees saab eraldi näidata ka primaarmähise ja sekundaarmähise takistuste kolmnurgad (joonis 4.29,a). Lühisekatset mõõdetud ja arvatud pingeid, voolusid ja takistusi U_{kn} , I_n , z_k , r_k ja x_k saab väljendada ka suhtelistes ühikutes. Suhteliste ühikute süsteemi baaspingeks võetakse nimipinge U_n ja baasvooluks nimivool I_n . Baastakistuseks on siis $Z_n = U_n/I_n$. Suhteline lühisepinge u_k^* avaldub siis järgmiselt:

$$u_k^* = U_{kn}/U_n. \quad (4.44)$$

Saab näidata, et suhteline lühisepinge u_k^* on võrdne lühise suhtelise näivtakistusega:

$$u_k^* = U_{kn}/U_n = z_k I_n / U_n = z_k / Z_n = z_k^*. \quad (4.45)$$

Praktikas väljendatakse suhtelist lühisepinget tihti ka protsentides:

$$u_{k\%} = \frac{U_{kn}}{U_n} \cdot 100 = 100 u_k^* . \quad (4.46)$$

Kasutatakse ka lühise suhtelist aktiivtakistust r_k^* ja suhtelist reaktiivtakistust x_k^* :

$$r_k^* = r_k / Z_n ; \quad x_k^* = x_k / Z_n . \quad (4.47)$$

Saab näidata, et lühisepinge suhteline aktiivkomponent u_{ka}^* on võrdne suhtelise aktiivtakistusega r_k^* ja analoogiline seos on ka lühisepinge reaktiivkomponendi ja reaktiivtakistuse vahel

$$u_{ka}^* = r_k^* ; \quad u_{kr}^* = x_k^* . \quad (4.48)$$

Lühisepinge on trafo oluline parameeter. Suhteline lühisepinge protsentides näidatakse trafo nimesildil. Jõutrafodel $u_{k\%} = 5 \dots 15\%$, kusjuures suurem lühisepinge on kõrgema pingega trafodel, mille mähised asetsevad üksteisest kaugemal ja mille puistevood on seetõttu suuremad. Paljudel juhtudel näidatakse trafo nimesildil ka suhtelise lühisepinge aktiivkomponent $u_{ka\%}$ ja reaktiivkomponent $u_{kr\%}$.

Trafo lühisekatsel on pinge umbes 20 korda nimipingest väiksem. Selle tõttu on ka magnetvoo tihedus väike ja trafo südamikus tekkiv rauaskadu on mitusada korda väiksem kui nimitalitluses. See on tähtsusetult väike. Lühise aktiivvõimsus P_k läheb peamiselt mähiste vaseskao katmiseks. Palju väiksem, kuid siiski märkimisväärne osa võimsusest P_k läheb mööda trafo paaki ja kinnitusdetailide külgevatest puistevoogudest põhjustatud hüsteresi- ja pöörisvoolukadudeks. Need puistevood on lühisekatsel sama suured kui nimitalitluses, sest voolud on nimivooludega võrdsed. Lühisevõimsuse P_k põhjal arvatud lühisetakistus r_k võtab arvesse ka neid puistevoogudest tingitud lisakadusid ja on selle tõttu mähiste oomilisest takistusest veidi suurem. Oomiline takistus mõõdetakse oommeetriga.

Kui meil on olukord, kus trafo lühisepinge aktiiv- ja reaktiivkomponendid on teada (näiteks trafo sildiantmete põhjal) ja me tahame teada trafo vaseskao ja puistevoogudest põhjustatud kadude summat P_{Cu} mingil koormusvoolu väärtusel I , saab selle leida lühisetakistuse r_k kaudu:

$$P_{Cu} = r_k I^2 . \quad (4.49)$$

Ülesanne 4.3

Ühefaasilise trafo kohta on teada nimipinge $U_{1n} = 230$ V, nimivõimsus $S_n = 630$ VA ja lühisepinge aktiivkomponent $u_{ka} = 7\%$. Leida trafo vaseskaovõimsus poolel nimi-koormusel.

Lahendus

Leiame trafo ninäivtakistuse primaarpoolel:

$$Z'_n = \frac{U_{1n}^2}{S_n} = \frac{230^2}{630} = 83,97 \Omega .$$

Leiame primaarpoole lühisetakistuse:

$$r'_k = u_{ka}^* Z'_n = 0,07 \cdot 83,97 = 5,88 \Omega.$$

Leiame primaarpoole nimivoolu:

$$I_n = S_n / U_{1n} = 630 / 230 = 2,74 \text{ A}.$$

Vaseskaovõimsus poolel nimikoormusel on

$$P_{Cu} = r'_k (0,5 I_{1n})^2 = 5,88 \cdot 0,5^2 \cdot 2,74^2 = 11 \text{ W}.$$

Trafo nimesildil oleva suhtelise lühisepinge ja teiste nimiaandmete kaudu saab leida selle trafo lühisevoolud. Kui lühis on nimiprimaarpingel, on lühisevool primaarpoolel

$$I_{1k} = U_{1n} / z'_k, \quad (4.50)$$

kus I_{1k} – primaarmähise lühisevool;

U_{1n} – primaarmähise nimipinge;

z'_k – primaarpoolele taandatud lühisenäivtakistus.

Avaldise (4.50) võib kirjutada ka suhtelistes suurustes:

$$I_k^* = 1 / z_k^* = 1 / u_k^*. \quad (4.51)$$

Suhteliselt lühisevoolult I_k^* saab üle minna tegelikule lühisevoolule

$$I_k = I_k^* I_n = I_n / u_k^*. \quad (4.52)$$

Ülesanne 4.4

Ühefaasilise trafo primaarpoole nimipinge on 400 V ja nimivool 6 A. Tühijooksul on sekundaarpinge 36 V. Trafo suhteline lühisepinge on $u_{k\%} = 7\%$. Kui suur on trafo primaarvool ja sekundaarvool, kui sekundaarahelas tekib juhuslikult lühis.

Lahendus

Primaarpoole lühisevool on

$$I_{1k} = \frac{I_{1n}}{u_k^*} = \frac{I_{1n}}{u_{k\%}} \cdot 100 = \frac{6 \cdot 100}{7} = 85,7 \text{ A}.$$

Sekundaarpoole nimivool on

$$I_{2n} = \frac{U_1 I_{1n}}{U_2} = \frac{400 \cdot 6}{36} = 66,67 \text{ A}.$$

Sekundaarpoole lühisevool on

$$I_{2k} = \frac{I_{2n}}{u_{k\%}} \cdot 100 = \frac{66,67 \cdot 100}{7} = 952,4 \text{ A}.$$

Kui on teada trafo suhtelise lühisepinge aktiiv- ja reaktiivkomponendid, saab nende andmete põhjal määrata ka trafo sekundaarpinge koormuse all ja koormusest tingitud sekundaarpinge muutuse.

Ülesanne 4.5

Ühefaasilise trafo nimiparameetrid on $U_{1n} = 400 \text{ V}$, $S_n = 2 \text{ kVA}$ ja sekundaarmähise nimitühijooksupinge on $U_{20} = 115 \text{ V}$. Selle trafo lühisepinge aktiivkomponent on $u_{ka\%} = 7\%$ ja reaktiivkomponent $u_{kr\%} = 5\%$. Trafo sekundaarahelasse on lülitatud aktiivtakistus $r = 10 \Omega$ ja trafo on lülitatud pingele 400 V . Leida trafo sekundaarvool, sekundaarpinge koormuse all ja sekundaarpinge muutus.

Lahendus

Leiame trafo näivtakistuse sekundaarpoolele vastavalt avaldisele (4.32):

$$Z_n'' = \frac{U_{20}^2}{S_n} = \frac{115^2}{2000} = 6,6125 \Omega.$$

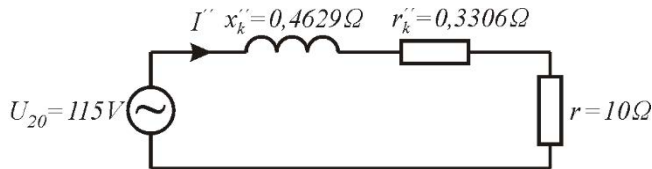
Kasutades avaldist (3.49) ja võttes arvesse, et $u_{ka}^* = 0,01u_{ka\%}$ ja $u_{kr}^* = 0,01u_{kr\%}$, leiame sekundaarpoolele taandatud lühise aktiiv- ja reaktiivtakistuse:

$$r_k'' = u_{ka}^* Z_n'' = 0,07 \cdot 6,6125 = 0,4629 \Omega,$$

$$x_k'' = u_{kr}^* Z_n'' = 0,05 \cdot 6,6125 = 0,3306 \Omega.$$

Leiame sekundaarvoolu I'' , kasutades sekundaarpoole jaoks koostatud aseskeemi (joonis 4.30):

$$I'' = \frac{U_{20}}{\sqrt{(r_k'' + r)^2 + (x_k'')^2}} = \frac{115}{\sqrt{(0,4629 + 10)^2 + 0,3306^2}} = 10,99 \text{ A}.$$



Joonis 4.30. Sekundaarpoolele taandatud trafo aseskeem ülesande 4.6 juurde

Leiame koormustakisti r pinget, mis kujutab endast trafo sekundaarpinget koormuse all:

$$U_2 = I'' r = 10,99 \cdot 10 = 109,9 \text{ V}.$$

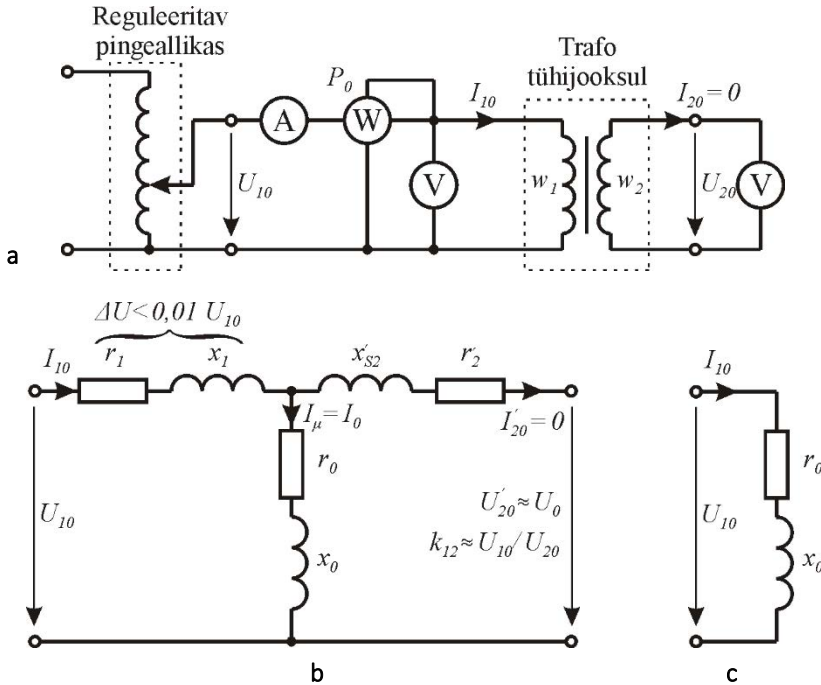
Trafo sekundaarpinge muutus koormuse all on

$$\Delta U = U_{20} - U_2 = 115 - 109,9 = 5,1 \text{ V}.$$

4.8 Trafo tühijooksukatse

Trafo lühisekatse annab ühe osa trafo aseskeemi parameetritest, kuid puudu jäävad aseskeemi magneetimisharu parameetrid. Need saab määrata tühijooksukatsest. Tühijooksukatsest saab määrata ka trafo ülekandesuhte ja tühijooksukaod.

Tühijooksukatse tegemiseks koostatakse joonisel 4.31,a toodud skeem. Primaarpoolele on lülitatud ampermeeter, vattmeeter ja voltmeeter, sekundaarpoolel on ainult voltmeeter. Primaarpinget tõstetakse nullist kuni 1,1-kordse nimipingeni ja registreeritakse teatud sammuga primaarpinge U_{10} , sekundaarpinge U_{20} , vool I_{10} ja võimsus P_0 . Mõõtetulemuste põhjal konstrueeritakse tühijooksu tunnusjooned funktsioonina primaarpingest.



Joonis 4.31. Ühefaasilise trafo tühijooksukatse skeem (a), trafo tühijooksu aseskeem (b) ja lihtsustatud aseskeem, mida kasutatakse tühijooksukatsetel (c)

Nimipingel $U_{10} = U_{1n}$ registreeritud mõõteriistade näitude alusel arvutatakse tühijooksu näivtakistus z_0 , aktiivtakistus r_0 ja induktiivtakistus x_0 (tühijooksusuuruste tunnuseks on indeks 0):

$$z_0 = \frac{U_{10}}{I_{10}}; \quad r_0 = \frac{P_0}{I_{10}^2}; \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}. \quad (4.53)$$

Niiviisi leitud aktiivtakistus r_0 ja induktiivtakistus x_0 on ligikaudu võrdsed trafo aseskeemi magnetimisharu jadaühenduses aktiiv- ja induktiivtakistusega (joonis 4.31,b,c).

Katseandmete põhjal leitakse ka ülekandesuhe

$$k_{12} = w_1/w_2 \approx U_{10}/U_{20},$$

võimsustegur

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_{10}I_{10}} \quad (4.54)$$

ja suhteline tühijooksuvool i_0^*

$$i_0^* = \frac{I_{10}}{I_{1n}}.$$

Suhteline tühijooksuvool on tavaliselt 3...8% nimivoolust, kusjuures suuremad väärtused vastavad väiksematele trafodele. Tühijooksu induktiivtakistus x_0 on harilikult palju suurem kui aktiivtakistus r_0 ja selle tõttu tühijooksu võimsustegur $\cos\varphi_0 \leq 0,1$. Tühijooksukadu P_0 kujutab endast praktiliselt ainult teraseskadu P_{Fe} (hüstereesikao ja pöörisvoolukao summat) trafo südamikus

$$P_0 = I_0^2 r_0 \approx P_{Fe}, \quad (4.55)$$

sest vaseskadu on tühijooksul ainult primaarmähises ja see on väga väike.

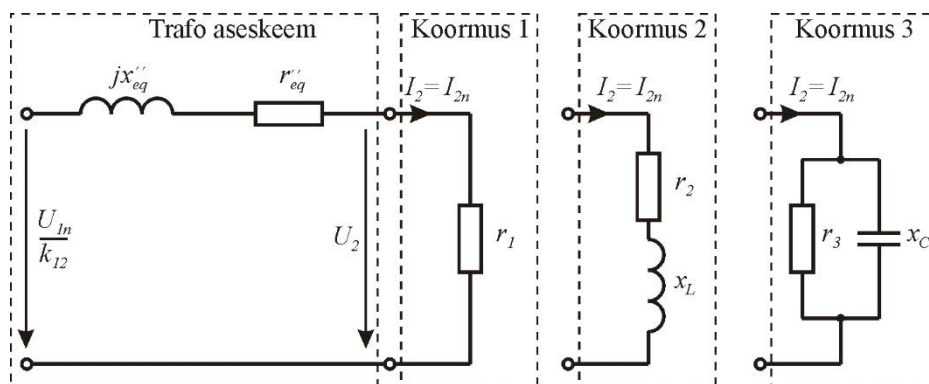
Tühijooksukadu ehk teraseskadu esineb trafo igasugusel koormusvoolul. Selle väärtus trafo koormusvoolust ei sõltu. Küll aga sõltub tühijooksukadu pingest. Kui pinge on näiteks 10% üle nimipinge, on tühijooksukadu umbes 30% suurem. Seevastu eespool vaadeldud vaseskadu, mis määrati lühisekatsest, on koormusvoolust tugevasti sõltuv. Trafo kaovõimsus on teraseskaovõimsuse ja vaseskaovõimsuse summa.

4.9 Trafo pingemuutus

Trafo pingemuutus on määratletud kui sekundaarmähise tühijooksupinge ja selle sama mähise nimikoormusel esineva pinge aritmeetiline vahe. Eeldatud on, et trafo primaarpinge ja sagedus pingemuutuse määramisel ei muutu.

Määratluses ei ole öeldud, mis iseloomuga nimikoormus on – kas aktiivne, induktiivne, mahtuvuslik või mingi segakoormus. Pingemuutuse suurus sõltub aga koormuse iseloomust oluliselt ja seda tuleb silmas pidada. Alajaama trafo pinge muutumine kutsub esile pingemuutuse tarbijal. See on mittesoovitav. Tarbija pingemuutus peab jääma standardiga määratud piiridesse. Et standardi nõudeid täita, on oluline teada trafo pingemuutuse väärtusi. Trafo annab olulise osa üldisest pingemuutusest.

Trafo pingemuutuse saab piisavalt täpselt määrata tema kõige lihtsama askeemi alusel (joonis 4.32). Leida tuleb sekundaarpinge U_2 , kui sekundaarvool I_2 on võrdne nimivooluga I_{2n} . Seda tuleks teha mitme iseloomuga koormuse korral (näiteks variandid 1, 2 ja 3 joonisel 4.32).



Joonis 4.32. Trafo pingemuutuse määramise skeem

Induktiivkoormuse korral langeb trafo pinge kõige rohkem. Pinge langus võib sel juhul olla võrdne trafo lühisepingega u_k (vt faasordiagrammi joonisel 4.33,a). Kui madalpingevõrgus nimipingega 400 V on trafo suhteline lühisepinge näiteks $u_k^* = 5,6\%$, on suurim pingemuutus 22,4 V (see muutus on pinge langus). Märkime siinkohal, et tavaliselt on madalpingevõrgus lubatud pinge erinevus nimipingest $\pm 10\%$. Seega on trafo suurim pingemuutus umbes pool võrgus lubatud pinge erinevusest.

Aktiivkoormusel on trafo pingemuutus väiksem kui induktiivkoormusel. Kui kasutatakse reaktiivvõimsuse kompensatorit, näiteks kondensaatorpatareid, vähendab see kompensator trafo induktiivkoormust ja sellega ka trafo pingemuutust. Kui kondensaatoreid on nii palju, et reaktiivvõimsus muutub mahtvuslikuks (voolufaasor on pingefaasorist ees, nagu see on joonistel 4.33,c,d), on trafo pingemuutus kas null (joonis 4.33,c) või isegi negatiivne (joonis 4.33,d). Negatiivne pingemuutus tähendab seda, et koormatud trafo pinge on kõrgem kui tühijooksul oleva trafo pinge.

Faasordiagrammi põhjal on võimalik tuletada ka trafo pingemuutuse arvutusvalem

$$\Delta U_{\%} = u_{ka\%} \cos \varphi_2 + u_{kr\%} \sin \varphi_2 + \frac{(u_{kr\%} \cos \varphi_2 - u_{ka\%} \sin \varphi_2)^2}{200}. \quad (4.56)$$

Siin $\Delta U_{\%}$ – trafo pingemuutus protsentides;

$u_{ka\%}$ – lühisepinge aktiivkomponent protsentides;

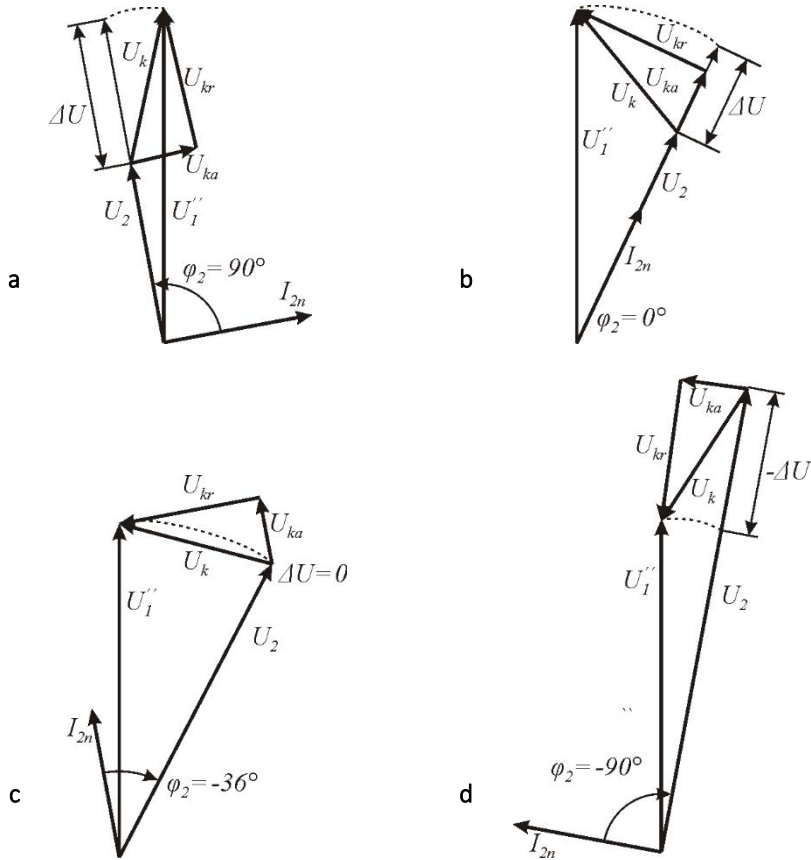
$u_{kr\%}$ – lühisepinge reaktiivkomponent protsentides;

φ_2 – faasinihkenurk sekundaarvoolu ja -pinge vahel.

Valemi (4.56) viimane liige on suhteliselt väike, mistõttu võib selle ära jätta ja seega

$$\Delta U_{\%} \approx u_{ka\%} \cos \varphi_2 + u_{kr\%} \sin \varphi_2. \quad (4.57)$$

Valemist (4.57) on näha, et aktiivkoormusel ($\cos \varphi_2 = 1$) on pingemuutus $\Delta U_{\%} \approx u_{ka\%}$ ja reaktiivkoormusel ($\cos \varphi_2 = 0$) vastavalt $\Delta U_{\%} \approx u_{kr\%}$.



Joonis 4.33. Koormuse iseloomu mõju pingemuutusele ΔU :

a) induktiivkoormus, $\varphi_2 = 90^\circ$; b) aktiivkoormus, $\varphi_2 = 0^\circ$;

c) aktiivmahtuvuslik koormus, $\varphi_2 = -36^\circ$; d) mahtuvuslik koormus, $\varphi_2 = -90^\circ$

Ülesanne 4.6

Alajaama 180 kVA trafo lühisepinge aktiivkomponent on 2,2% ja reaktiivkomponent 5,0%. Trafo sekundaarpoole nimipinge on 400 V. Leida trafo pingemuutus voltides kahe juhtumi jaoks:

1. Trafol on aktiivkoormus ($\cos\varphi_2 = 1,0$).
2. Trafol on aktiiv-induktiivkoormus ($\cos\varphi_2 = 0,6$).

Lahendus

1. Suhteline pingemuutus aktiivkoormusel on

$$\Delta U_{\%} \approx u_{ka\%} \cos \varphi_2 + u_{kr\%} \sin \varphi_2 = 2,2 \cdot 1,0 + 5,0 \cdot 0 = 2,2\% .$$

2. Pingemuutus voltides aktiivkoormusel on

$$\Delta U = U_n \Delta U_{\%} \cdot 0,01 = 400 \cdot 2,2 \cdot 0,01 = 8,8 \text{ V} .$$

3. Suhteline pingemuutus aktiivinduktiivkoormusel (kui $\cos\varphi_2=0,6$, siis $\sin\varphi_2=0,8$) on

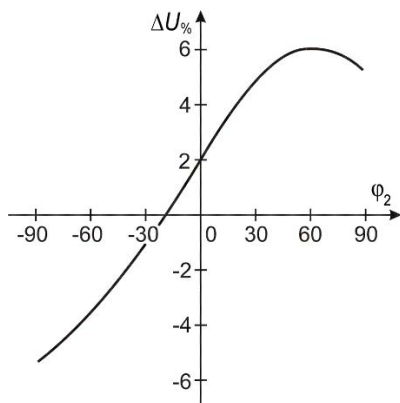
$$\Delta U_{\%} = 2,2 \cdot 0,6 + 5,0 \cdot 0,8 = 5,32\% .$$

4. Pingemuutus voltides aktiivinduktiivkoormusel on

$$\Delta U = 400 \cdot 5,32 \cdot 0,01 = 21,28 \text{ V} .$$

Täpsema arvutusvalemi (4.56) kasutamisel saaksime neljanda punkti tulemuseks 21,31 V.

Ülesandes antud trafo jaoks on joonisel 4.34 toodud pingemuutuse kõver sekundaarvoolu faasinihkenurga φ_2 funktsioonina. Positiivne φ_2 vastab aktiivinduktiivkoormusele ja negatiivne φ_2 aktiivmahtuvuslikule koormusele. Positiivne ΔU vastab trafo pinge vähenemisele alla tühijooksupinge ja negatiivne ΔU vastab trafo pinge tõusule üle tühijooksupinge (seda aktiivmahtuvusliku koormuse mõjul).



Joonis 4.34. Ülesandes 4.6 antud parameetritega trafo pingemuutuse sõltuvus koormuse iseloomust

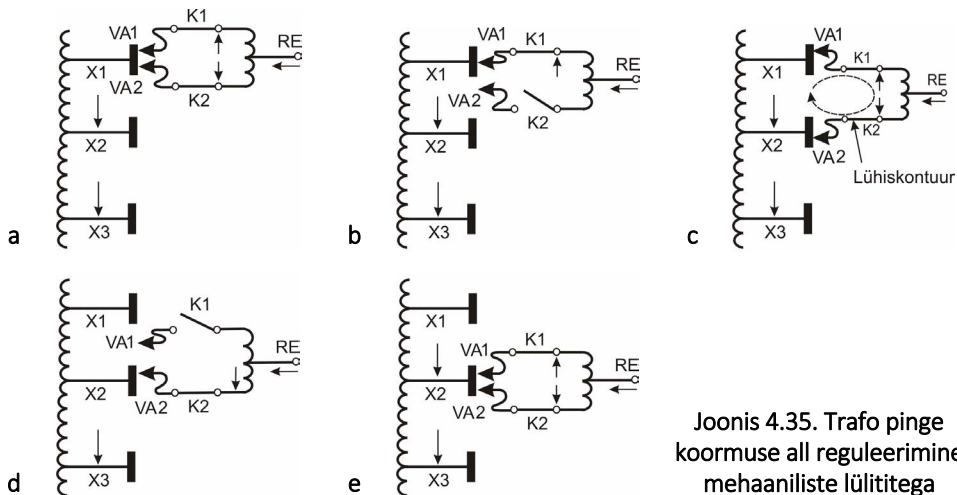
4.10 Trafo pinge reguleerimine

Trafo väljundpinget saab reguleerida, kui muuta trafo ülekandesuhet $k_{12} = w_1/w_2$. Väljundpinge vähendamiseks võib suurendada primaarmähise keerdude arvu w_1 või vähendada sekundaarmähise keerdude arvu w_2 . Väljundpinge tõstmine on võimalik ainult sekundaarmähise keerdude arvu suurendamisega, sest primaarmähise keerdude arvu vähendamine ei ole sellega kaasneva magneetimisvoolu kasvu tõttu üldiselt lubatav. Keerdude arvu muutmine toimub ümberlülititega. Võimsatel trafodel pannakse ümberlülitid harilikult sellele poolele, kus vool on väiksem ja lüliti on lihtsam teha.

Peaaegu kõik alajaamade trafod on pinge reguleerimiseks varustatud ümberlülititega. Koormusvoolu kasvades langeb elektrivõrgus tarbijate pinge. Selle põhjuseks on pingelangud liinidel ja trafodel. Et tarbijate pinge ei langeks allapoole lubatavaid piire, tõstetakse ümberlülitite abil trafo pinget. Koormuse vähenemisel aga pinge tõuseb ja siis tuleb pinget alandada. Ööpäevaste pingekõikumiste kompenseerimiseks kasutatakse pinge all reguleeritavaid trafosid, mis tavaliselt asuvad toitealajaamades 110 kV pingel.

Võrkude trafod, mis viivad keskpinge võrkude pingele 6...20 kV madalpinge nivoole 410 V, on samuti reguleeritavad, kuid nad ei ole pinge all reguleeritavad. Neid reguleeritakse paigaldamisel vastavalt paigalduskoha keskmisele pingeniivoole. Koormuse all nende trafode pinge ümberlülitamist ei tohi, sest ümberlülitamist lihtne mehaaniline konstruktsioon ei garanteeri ahela katkestamisel tekkiva kaare kustutamist. Sellistel trafodel on tavaliselt viis pingeasetet. Valikus on nimipinge ja lisaks $\pm 2 \times 2,5\%$ nimipingest.

Koormuse all reguleeritavad trafod on varustatud kahe mehaanilise kontaktisüsteemiga (joonis 4.35). Üks kontaktisüsteem ei ole koormuse all lülitatav ja seda nimetatakse valijaks (kontaktid VA1 ja VA2). Teine kontaktisüsteem koosneb kontaktidest K1 ja K2, mis on koormuse all lülitatavad. Lisaks sellele on vajalikud ühe lülitusastme lühisevoolu piiravad takistid või reaktoriks nimetatav induktiivpool RE. Lülitusprotsess on näidatud lülitite viie järjestikuse asendiga – a, b, c, d ja e. Asendis a siseneb vool reaktori keskväljavõttesse, jaguneb kaheks haruks ja läbib reaktori mähise pooli vastassuunaliselt. Seejärel läbivad haruvoolud rööbiti nii kontaktoreid K1 ja K2 kui ka valija kontakte VA1 ja VA2. Lõpuks jõuab vool trafomähise väljavõttele X1.

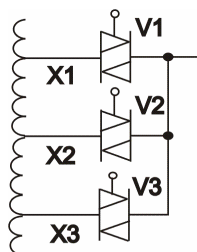


Joonis 4.35. Trafo pinge koormuse all reguleerimine mehaaniliste lülititega

Asendis b alustatakse ümberlülitamist sellega, et avatakse kontaktor K2. Sellega katkeb vool alumises harus. Vooluvabas olekus lahutatakse valija kontakt VA2 mähise väljavõttest X1 ja ühendatakse väljavõttega X2. Seejärel suletakse kontaktor K2 ja saadakse jälle kaks vooluharu (asend c). Kuid nüüd läheb üks haruvool väljavõttele X1 ja teine väljavõttele X2. Sellega tekib suletud kontuur, mille üks osa on trafo mähise väljavõtte X1 ja X2 vahel. See mähise osa on pingevaldkas ja reaktor RE on selles suletud kontuuris voolu piiravaks reaktiivtakistuseks. Reaktori RE mähise osad on selles kontuuris jadamisi ja reaktori vahelduvvoolutakistus on suhteliselt suur. Trafo välisahela voolu jaoks on reaktori RE takistus aga väga palju väiksem, sest siis on mähise võrdsete poolte voolud vastassuunalised ja koormusvoolust põhjustatud magnetahela magnetimisvool nullilähedane. Kasutusel on ka

selliseid ümberlülititeid, kus reaktori RE asemel on kaks aktiivtakistit. Nendest aktiivtakistitest läheb vool lühiajaliselt läbi ainult sel ajal, kui valija kontaktid VA1 ja VA2 on ühendatud trafo eri väljavõtetega. Muul ajal lühistatakse need takistid lisakontaktoritega (sellist skeemivarianti pole näidatud).

Asendis d katkestatakse kontaktori K1 abil lühiskontuur. Sellega läheb kogu trafo koormusvool üle väljavõttele X2. Valija kontakt VA1 viiakse vooluvabas olekus väljavõtelt X1 väljavõttele X2. Lõpuks suletakse kontaktor K1 ja saadakse asend e. See asend on sarnane asendiga a, kuid koormusvool siseneb väljavõtte X1 asemel nüüd väljavõttesse X2. Sellega on koormusahelasse lülitatud trafomähise üldine keerdude arv muutunud. Sellega on muutunud ka trafo ülekandesuhe ja väljundpinge. Reaktor RE ja valija (VA1, VA2) paigutatakse trafo üldisesse õlipaaki, kontaktorid K1 ja K2 aga väikesesse eraldi asuvasse õlipaaki, et kontaktorite töö ajal tekkiv elektrihaar ei rikuks kogu trafos oleva õli kvaliteeti.



Joonis 4.36. Türistorlülitite kasutamine trafo mähise väljavõtete ümberlülitamiseks

Väljavõtete koormuse all ümberlülitamine mehaaniliste lülititega on küllaltki keerukas. Keeruka seadme töökindlus ei ole aga eriti hea. Selle tõttu kasutatakse ka türistorlülititega trafo pingeregulaatoreid (joonis 4.36). Türistorlülitite eeliseks on suurem töökiirus ja kuluvate detailide puudumine. Kui meil on vaja väljavõtte X1 asemel ühendada vooluringi väljavõtte X2, siis lõpetame türistorlülitile V1 juhtimpulsside andmise (mis toimub näiteks võrgupinge positiivsel poolperioodil) ja võrgupinge järgmise poolperioodi alguses (mis meie näites on negatiivne

poolperiood) anname juhtimpulsi juba türistorlülitile V2. Sellega toimub ümberlülitus võrguvoolu nullist läbimineku hetkel, lühiskontuuri ei teki ja ka vooluvaba pausi ei teki. Mehaaniliste kontaktidega ümberlülitil oli lühiskontuuri tekitamine vajalik sellise ümberlülitite väikese toimekiiruse tõttu.

Koormuse all reguleeritavates trafodes on reguleerimisaste suhteliselt väike, 1...2% nimipingest, ja reguleerimisastmete arv 20 ringis. Uuemates 110 kV trafodes on reguleerimisvahemik $\pm 9 \times 1,78\%$ (üheksa astet üles ja alla, üks aste muudab pinget 1,78%).

4.11 Koormusvoolu muutumise mõju trafo tööle

Trafod projekteeritakse ja ehitatakse teatud kindlale pingele ja voolule, mida nimetatakse nimipingeks ja nimivooluks. Tegelik pinge ja vool trafo talitlemisel on peaaegu alati nimiväärtustest erinevad. Sealjuures pinge erineb nimipingest suhteliselt vähe (üldiselt $\pm 10\%$ piires), kuid koormusvool võib muutuda nullist nimivooluni. Trafo koormuse iseloomustamiseks kasutatakse koormustegurit β :

$$\beta = I_2/I_{2n} \approx I_1/I_{1n} \quad (4.58)$$

kus I_1 ja I_2 – vastavalt trafo tegelik primaar- ja sekundaarvool;

I_{1n} ja I_{2n} – vastavalt trafo primaarnimivool ja sekundaarnimivool.

Trafo kaal ja mõõtmed on määratud kolmanda olulise nimisuurusega, milleks on niminäivvõimsus S_n . Ühefaasilisel trafol

$$S_n = U_{1n}I_{1n} = U_{2n}I_{2n}. \quad (4.59)$$

Trafo mähistes eralduv soojus sõltub mähist läbiva voolu väärtusest ja võimsustegur $\cos\varphi$ ei ole oluline. Sellepärast ei ole trafo nimivõimsuseks valitud mitte aktiivvõimsus P , vaid näivvõimsus S . Trafo kasutegur η on määratud sekundaarpoole ja primaarpoole aktiivvõimsuste suhtega

$$\eta = P_2/P_1. \quad (4.60)$$

Trafos soojuskaona eralduv võimsus ΔP on avaldatav primaar- ja sekundaarvõimsuse vahena:

$$\Delta P = P_1 - P_2. \quad (4.61)$$

Trafo soojuskaovõimsus koosneb kahest osast. Trafo südamikus tekkivat soojuskadu nimetatakse rauaskaoks. Rauaskadu on ühesugune nii tühijooksul kui ka nimikoormusel, sest see ei sõltu koormusvoolust. Rauaskadu nimetatakse ka tühijooksukaoks P_0 . Trafo mähistes tekkivat soojuskadu nimetatakse vaseskaoks P_{Cu} ja see kadu on võrdeline koormusvoolu ruuduga. Vaseskadu on kõige suurem suurimal töövoolul, milleks on nimivool. Nimivoolul tekkivat vaseskadu määratakse tavaliselt trafo lühisekatsel. Sellepärast nimetatakse seda ka lühisekaovõimsuseks P_k . Nimivoolust väiksemal voolul tekkiva vaseskao saab leida avaldisest

$$P_{Cu} = \beta^2 P_k, \quad (4.62)$$

kus β on trafo koormustegur.

Kuna alati on huvi kadude vähendamise vastu, siis oleks mõistlik leida, kuidas muutub trafo kasutegur trafo koormamisel. Eespool toodut arvestades võime trafo kaovõimsuse avaldada kujul

$$\Delta P = P_0 + \beta^2 P_k. \quad (4.63)$$

Teisendame kasuteguri avaldist (4.60):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1} = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_k}{P_1}. \quad (4.64)$$

Aktiivvõimsus P_2 on avaldatav võimsusteguri $\cos\varphi_2$ ja trafo sekundaarpoole niminäivvõimsuse S_{2n} kaudu:

$$P_2 = \beta P_{2n} = \beta \cos\varphi_2 S_{2n}. \quad (4.65)$$

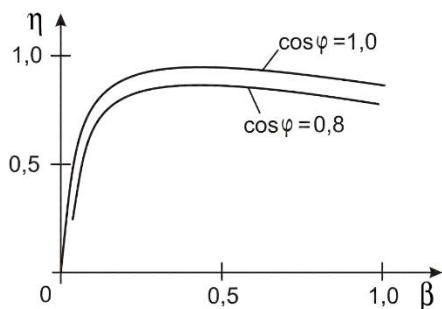
Avaldistest (4.64) ja (4.65) saame trafo kasuteguri koormusteguri kaudu:

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_k}{\beta \cos\varphi_2 S_{2n} + P_0 + \beta^2 P_k}. \quad (4.66)$$

Avaldises (4.66) on P_0 , P_k ja S_{2n} trafot iseloomustavad konstantsed suurused ning β ja $\cos\varphi_2$ muutujad. Kasutegur on null, kui kas β või $\cos\varphi_2$ võrdub nulliga. Kasutegur on suurim sellisel koormusel, mille puhul püsikadu P_0 ja muutuv kadu P_{Cu} on võrdsed, st siis, kui $P_0 = \beta^2 P_k$. Siit saame leida koormusteguri β , mille juures kasutegur on maksimaalne ($\eta = \eta_{\max}$):

$$\beta = \sqrt{P_0/P_k}. \quad (4.67)$$

Trafo projekteerimisel on tühijooksukao ja lühisekao suhet võimalik teatud piirides valida. Tavaliselt projekteeritakse trafod nii, et tühijooksukadu on lühisekaost mitu korda väiksem. Kui näiteks $P_0/P_k = 0,25$, siis $\eta = \eta_{\max}$ koormusteguri $\beta = \sqrt{0,25} = 0,5$ korral. See tähendab, et kasutegur on kõige suurem, kui trafo töötab poolel võimsusel. Sageli ongi just taoline valik otstarbekas, sest alajaama trafo töötab täiskoormusel lühiajaliselt. Enamiku ajast on alajaama trafo alakoormatud. Kasuteguri tüüpiline sõltuvus koormustegurist on näidatud joonisel 4.37.



Joonis 4.37. Trafo kasuteguri sõltuvus koormusteguri võimsusteguri kahe eri väärtuse korral

Suurte alajaamatrafode (üle 10 MVA) kaod nimitalitluses on 1% ja vähem, väikesel trafodel (10 kVA) aga 3...4%. Võrreldes teiste energiamuunduritega (elektrimasinad, pooljuhtmuundurid) on trafo kasutegur üldiselt kõige kõrgem.

4.12 Kolmefaasiliste trafode mähiste ühenduskeemid ja lülitusrühmad. Trafode rööptöö

4.12.1 Ühendusklemmide tähised ja ühenduskeemid

Kolmefaasilisel trafol on vähemalt 6 mähist, sest igas faasis on üks ülepingemähis ja üks alampingemähis. Kuue mähise ühendamiseks on 12 ühendusklemmi, sest igal mähisel on algus ja lõpp. Selleks, et trafot õigesti elektriskeemi või elektrivõrku ühendada, on vaja iga ühendusklemmi kohta teada, millisele mähisele see kuulub ja kas see on mähise algus või lõpp. Eksimise vältimiseks kasutatakse klemmide tähistamist. Tabelis 4.1 on toodud saksapärane tähistussüsteem.

Ülepingemähise klemmid tähistatakse suurte ja alampingemähise klemmid väikeste tähtedega. Mähiste algused tähistatakse tähestiku algustähtedega ja mähiste lõpud tähestiku lõputähtedega. Mähise elektromotoorjõud loetakse positiivseks, kui ta samba magnetvoo positiivsel poolperioodil mõjub mähise lõpust alguse poole ja selle elektromotoorjõu mõjul tekkiv vool väljub mähise alguse klemmist.

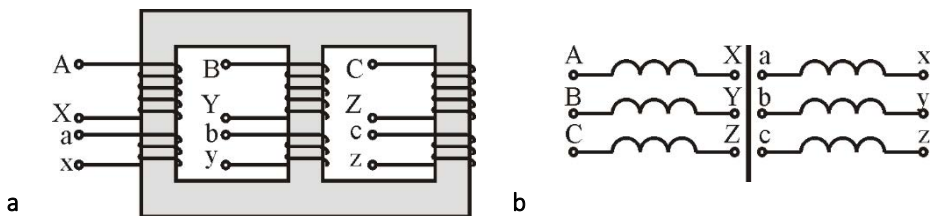
Tabel 4.1 Trafomähiste alguste ja lõppude tähised

| Mähis | 1. faas | 2. faas | 3. faas |
|-----------------|---------|---------|---------|
| Ülempingemähis: | | | |
| algus | A | B | C |
| lõpp | X | Y | Z |
| Alampingemähis: | | | |
| algus | a | b | c |
| lõpp | x | y | z |

Inglisekeelses kirjanduses on mähiste alguste tähistamiseks kasutusel ainult väike- tähtedest a, b ja c ning ülaindeksiga väiketähtedest a', b' ja c' süsteem. Mähiste lõppe ei tähistata.

Mähiseklemmide tähiseid kasutatakse nii reaalse trafo klemmidel kui ka vastavas elektriskeemis (joonis 4.38). Kolmefaasilise trafo skeemis joonestatakse mähised risti magnetahela tähisega, milleks on jämedam sirgjoon (joonis 4.38,b), ühefaasilise trafo skeemis on mähised magnetahela tähisega rööbiti.

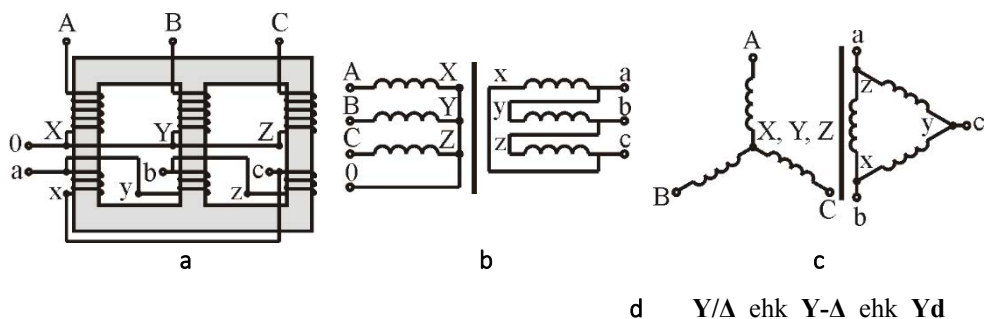
Skeemide joonestamisel jälgitakse samu reegleid kui kirjutamisel. Energia siseneb trafosse vasakult poolt (primaarmähisesse) ja liigub paremale.



Joonis 4.38. Kolmefaasilise trafo mähiste ruumiline paigutus magnetahelal (a) ja sama trafo kujutamine elektriskeemis, kui mähised ei ole ühendatud (b)

Kolmefaasilise trafo ühendamisel elektriskeemi hoitakse ühendusjuhtmeid sellega kokku, et osa klemme ühendatakse omavahel vahetult trafo juures. Kasutatakse kas tähtühendust (primaarmähis joonisel 4.39) või kolmnurkühendust (sekundaarmähis joonisel 4.39). Ühendusskeemi valikul lähtutakse praktilistest kaalutlustest. Näiteks on liinipingetel 35 kV ja enam sobiv ühendada mähised tähte ja mähiste ühenduspunkt maandada. Siis tekib olukord, kus liinijuhtmete pinge maa suhtes on $\sqrt{3}$ korda väiksem, kui liinijuhtmete omavaheline pinge. Sellega väheneb isolatsiooni, sealhulgas õhuliini isolaatorite, maksumus.

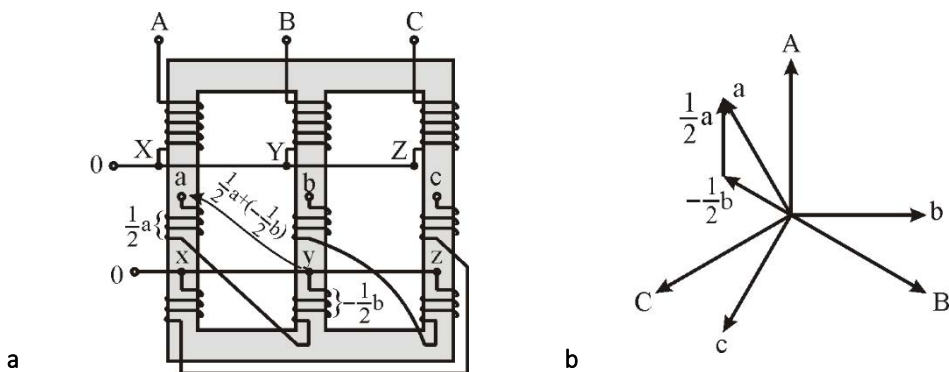
Tähtühenduses olevate mähiste ühist punkti nimetatakse neutraalpunktiks, tähiseks on n või 0. Ka madalpingevõrkudes kasutatakse tähtühendust, sest siis saab valgustuseks kasutatavad hõõglambid ühendada faasi ja neutraali vahele pingele 230 V, kuid võimsamad tarbijad (elektromootorid) pingele 400 V. Madalamal pingel on hõõglampidel parem valgusviljakus, ka on madalam pinge sobivam kõikvõimalike elektroonikaseadmete toiteks. Võrgule on aga soodsam 400-voldiline pinge, sest siis on voolud ja selle tõttu ka juhtmete ristlõiked väiksemad.



Joonis 4.39. Kolmefaasilise trafo mähiste ruumiline paigutus magnetahelal (a), sama trafo tavapärase kujutamise elektriskeemis (b), kergesti meelde jääv elektriskeem (c) ja selle elektriskeemi tingtähis (d), kui primaarmähised on ühendatud tähte ja sekundaarmähised kolmnurka

Elektrivõrgus voolu kõrgemate harmooniliste vähendamise seisukohast on aga parem kolmnurkühendus. Sellepärast on soovitatav, et üks mähistest – kas ülempinge- või alampingemähis, oleks ühendatud kolmnurka.

Elektrivõrgu suhtes ja võrgupinge kvaliteedi suhtes on kolmnurkühendusest veel parem siksakühendus. Siksakühenduse korral koosneb iga faasi mähis kahest võrdse keerdude arvuga osast, mis asuvad trafo eri sammastel ja on ühendatud jadamisi. Sealjuures ei ole jadaühendus tavaline (tavaliselt ühendatakse esimese osa lõpp teise osa algusega), vaid teise osa algus ja lõpp on ära vahetatud. Joonisel 4.40,a on näidatud trafo magnetahel tähte ühendatud primaarmähise ja siksakühenduses sekundaarmähisega.



Joonis 4.40. Mähiste paigutus magnetahelal täht-siksakühenduse korral (a) ja sellele vastav faasordiagramm (b)

Magnetvoo faas trafo sambas A (vasakult esimene sammastel) on määratud primaarpoole A-faasi pingega faasordiagrammi (joonis 4.40,b) järgi. Samas faasis on ka A-faasi sekundaarmähise selle osa pingega, mis asub sambal A (selle mähiseosa tähiseks on $\frac{1}{2}a$). A-faasi sekundaarmähise teine osa asub keskmisel sambal B (selle mähiseosa ja vastava pingefaasori tähiseks on $-\frac{1}{2}b$). Kuna sambal B oleva

mähiseosa $-\frac{1}{2}b$ algus ja lõpp on vahetatud, on faasori $-\frac{1}{2}b$ suund diagrammil vastupidine primaarpoole B-faasi pingefaasoriga. Sekundaarpoole A-faasi pingefaasori a on mähiseosade $\frac{1}{2}a$ ja $-\frac{1}{2}b$ pingefaasorite summa. Diagrammilt on näha, et trafo primaarpingesüsteem (faasorid A, B ja C) ja sekundaarpingesüsteem (faasorid a, b ja c) ei ole samas faasis. Siksakühendus annab sekundaar- ja primaarpingete faasinurkadele 30-kraadise erinevuse. Tavaliselt vaadatakse sekundaarpinge faasi (faasori a) nihet primaarpinge faasi (faasori A) suhtes, mis on 330° (faasorid pöörlevad vastu kellaosuti liikumissuunda).

Diagrammilt on veel näha, et mähiste $\frac{1}{2}a$ ja $-\frac{1}{2}b$ pingete summa on faasinihke tõttu väiksem, kui nende mähiste pingete aritmeetiline summa (aritmeetilise summa saame faasinihke puudumisel). Pinge väheneb $2/\sqrt{3} = 1,15$ korda. Pinge vähenemise kompenseerimiseks tuleb mähise keerdude arvu võrreldes Y/Y- või Y/ Δ -ühendusega 1,15 korda suurendada. See on siksakühenduse puuduseks.

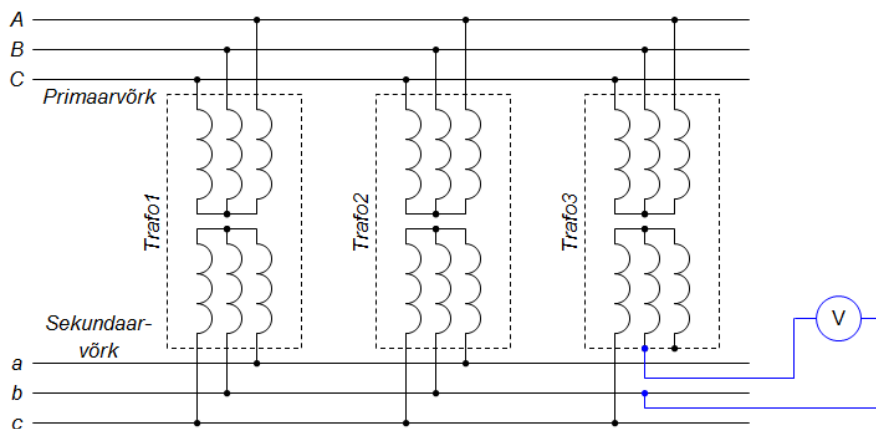
Üheks siksakühenduse eeliseks on aga see, et mittesümmeetrilisel koormusel ei teki sekundaarpoolel märkimisväärset faasipingete erinevust, kuna ühe faasi koormusvool tuleb trafo kahel eri sambal paiknevate mähiste kaudu. Teiseks eeliseks on, et kolmanda harmoonilise vool ja kolmega jaguvat järku kõrgemate harmooniliste voolud ei jõua sekundaarpoolelt primaarpoolele. Need voolud on küll kõigis kolmes faasijuhtmes A, B ja C ühes ja samas faasis, kuid trafo mis tahes ühel sambal asuvates sekundaarmähise osades on nende harmooniliste voolud vastasfaasis ja kompenseeruvad.

Trafo mähiste ühendusskeemide tähistamiseks kasutatakse järgmisi sümboleid: tähtühendus Y (alampingepoolel ka y); kolmnurkühendus Δ või D (alampingepoolel ka d); siksakühendus Z (alampingepoolel ka z). Tähtühenduse ja siksakühenduse korral võib kõigi kolme faasi ühine punkt (ehk neutraalpunkt ehk nullpunkt 0 joonisel 4.40) olla välja toodud, siis saame neljajuhtmeline liini. Kui ühine punkt on jäetud välja toomata, saame kolmejuhtmeline liini. Kui trafo on varustatud neutraalpunkti ühendusklemmiga, lisatakse ühendusskeemi tingtähise järele kas neutraali tähis n või alaindeks 0. Näiteks tähendab Dyn kolmnurk-tähtühendust, mille sekundaarpoolel on mähiste ühenduspunkt välja toodud. Endises NLiidus oli trafo mähiste samasuguse ühendusskeemi tähiseks Δ/Y_0 .

4.12.2 Trafode rööpühendus. Ühtlustusvoolude teke

Elektrivõrkudes kasutatakse laialdaselt trafode rööpühendust. Alajaamades pannakse rööbiti tööle kaks või kolm trafot (joonis 4.41). Harilikult saab mitme trafo olemasolul jätkata tarbijatele energia andmist ka ühe trafo avarii või remondi korral. Sellega tõuseb oluliselt energia varustuskindlus. Teiseks tekib väikese koormuse korral (tavaliselt suvel) võimalus üks trafo välja lülitada ja sellega vähendada trafode tühijooksuvoolust tingitud energiakadusid.

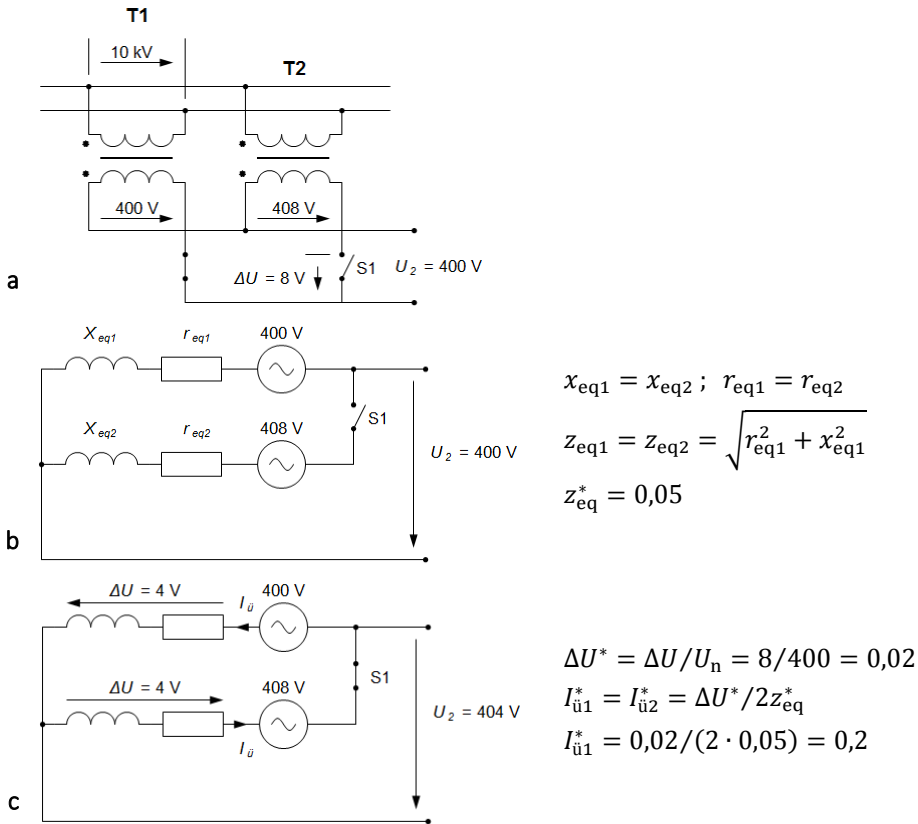
Eri trafode sekundaarmähised tohib kokku ühendada ainult siis, kui ühe trafo vastava faasi (näiteks A-faasi) pinge amplituud ja faasinurk on võrdsed teise trafo sama faasi pinge amplituudi ja faasinurgaga. Nii pinge amplituudi kui ka pinge faasi erinevus tekitab ühtlustusvoolusid, mis on üldiselt lubamatud. Pinge erinevuse esinemist või puudumist saab kontrollida voltmeetriga enne trafo sekundaarpoole vastavate lattide kokku ühendamist (joonis 4.41). Voltmeeter peab pingestatud trafode korral näitama nulli või tühiselt väikest pinget.



Joonis 4.41. Trafode lülitamine rööptaliluseks ja pinge erinevuse kontrollimine

Joonisel 4.42 on näidatud ühtlustusvoolu teke, kui kahe trafo sekundaarpingete faasid on võrdsed, kuid efektiivväärtused erinevad. Rööptalilusele lülitamine toimub siin lüliti S1 abil.

Kui lüliti S1 on avatud, on väljundahelasse ühendatud ainult trafo T1, mis annab sinna oma sekundaarpinge – antud juhul 400 V. Trafode aseskeemides on lühisetahtakistused antud juhul võrdsed ja nende väärtuseks suhtelistes suurustes on $z_{eq}^* = 0,05$ (joonis 4.42,b). Lüliti S1 sulgemisel (joonis 4.42,c) tekib trafode väljundpingete erinevusest (antud juhul $\Delta U = 408 - 400 = 8$ V) trafomähistes ühtlustusvool $I_{\bar{u}}$. See ühtlustusvool on eri trafode mähistes eri suundades. Kõrgema sekundaarpingega trafo T2 annab voolu välja ja see vool läheb madalama sekundaarpingega trafo T1 sekundaarmähisesse. Erineva suunaga voolud tekitavad trafo aseskeemi takistustel erineva suunaga pingelangud. Selle tõttu trafo T1 väljundpinge tõuseb, trafo T2 väljundpinge langeb ja trafode sekundaarpinged saavad võrdseks (antud juhul tekib pinge 404 V). Kuid trafod jäävad koormusvoolu alla ka siis, kui välisahel voolu ei tarbi. Antud juhul põhjustab 2% pingeerinevust ühtlustusvoolu, mis on 20% nimivoolust. See ühtlustusvool põhjustab mõlemas trafos asjatut energiakadu soojuse näol ja peale selle ei saa trafosid enam täielikult koormata, sest ühtlustusvoolu suuruse ulatuses on nad juba koormatud.



Joonis 4.42. Ühtlustusvoolu tekkimine, kui kahe rööptalitlusele lülitatud trafo ülekandesuhted ei ole päris võrdsed: a – trafode ühendusskeem, b – sekundaar-polele taandatud aseskeem, kui trafo T2 sekundaarpool on lahti ühendatud, c – sama aseskeem, kui trafod on lülitatud rööbiti

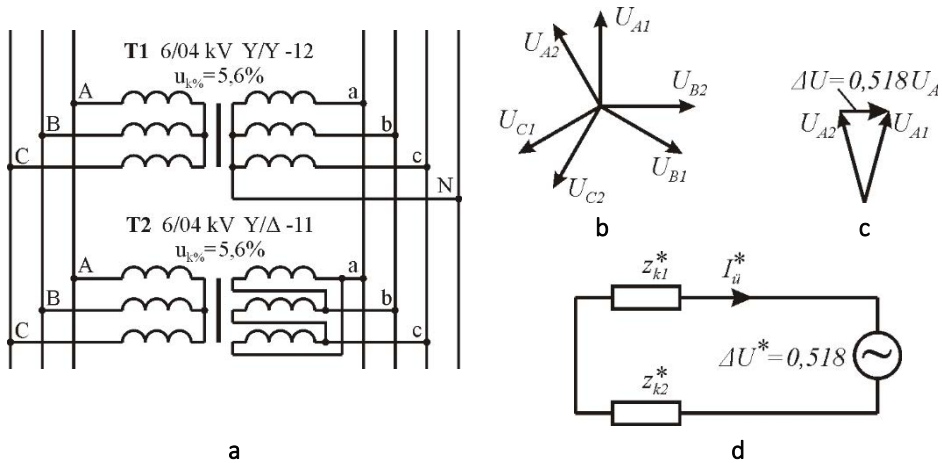
Ühtlustusvoolud tekivad ka siis, kui rööbiti ühendatavate trafode sekundaarpingete efektiivväärtused on küll võrdsed, kuid nende faasinurgad on erinevad. Selline olukord tekib siis, kui rööbiti ühendatavatel kolmefaasilistel trafodel on erinevad mähiste ühendusskeemid. Näiteks esimesel trafol on nii primaar- kui ka sekundaarmähis ühendatud tähte, kuid teisel trafol on primaarmähis täht- ja sekundaarmähis kolmnurkühenduses (joonis 4.43,a). Sel juhul on teise trafo A-faasi pinge nihutatud esimese trafo A-faasi pinge suhtes 30 kraadi võrra ettepoole (joonis 4.43,b).

Kui trafode T1 ja T2 sekundaarklemmid ei ole veel rööptalitluseks ühendatud, määrab A-faasi sekundaarpingete faasorite U_{A2} ja U_{A1} vahelise pingeerinevuse suuruse faasor ΔU (joonis 4.43,c), mille pikkus on

$$\Delta U = 2U_A \sin 15^\circ = 0,518 U_A ,$$

kus $U_A = U_{A1} = U_{A2}$ on sekundaarpingete faasorite pikkused (faasorite pikkused on võrdelised neile vastavate pingete efektiivväärtustega). Kui trafode T1 ja T2 klemmid a, b ja c on kokku ühendatud (nagu joonisel 4.43,a), tekivad igas faasis suletud

voolukontuurid. Nende voolukontuuride lihtsustatud aseskeem on joonisel 4.43,d. Näivtakistused z_{k1}^* ja z_{k2}^* on trafode T1 ja T2 lühise näivtakistused (joonisel 4.42,b on näidatud ka nende näivtakistuste koostisosad x_{eq} ja r_{eq}).



Joonis 4.43. Ühtlustusvoolu teke, kui rööptaliluses trafode sekundaarpoole pingete faasinihkenurgad ei ole võrdsed: a – ühendusskeem; b – sekundaarpingete faasordiagrammid, kui klemmid a, b ja c on alles kokku ühendamata; c – pingeerinevus ΔU faasis A; d – lihtsustatud aseskeem ühtlustusvoolu leidmiseks

Antud juhul $z_{k1}^* = z_{k2}^* = 0,056$, mis vastab joonisel 4.43,a toodud trafode lühise-pingetele. Vaadeldavas aseskeemis tekkev ühtlustusvool on lihtsalt leitav Ohmi seaduse järgi:

$$I_{\dot{u}}^* = \frac{\Delta U^*}{z_{k1}^* + z_{k2}^*} = \frac{0,518}{0,056 + 0,056} = 4,63.$$

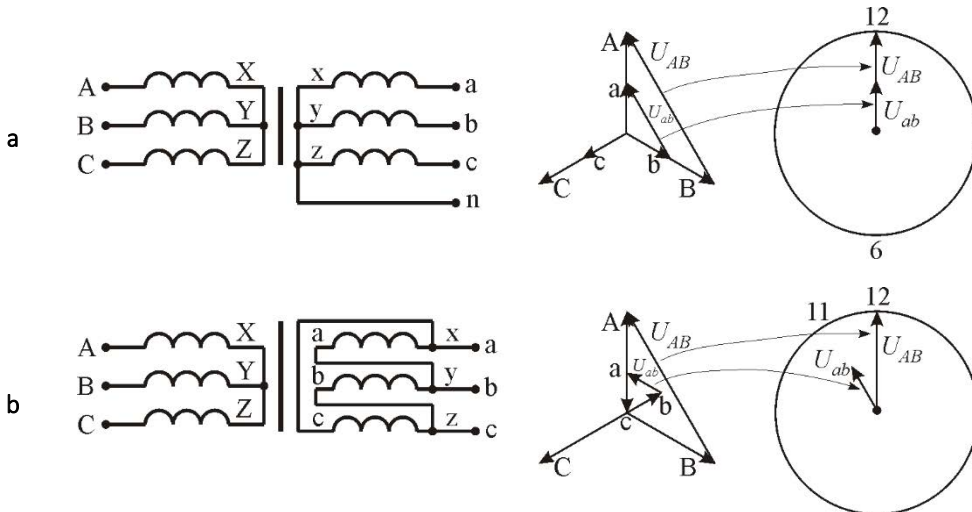
Kuna määratluse järgi on trafo nimivool suhtelistes ühikutes võrdne ühega ($I_n^* = 1$), siis näitab leitud tulemus 4,63-kordset nimivoolu. Nii suur ühtlustusvool on trafo-dele lubamatu ja alajaama trafode kaitselülitus lülitab sellise voolu esinemisel trafod kiiresti primaarpoolelt välja.

4.12.3 Lülitusrühma mõiste

Et vältida probleeme, mis võivad tekkida trafode sekundaarpingete faasinurkade erinevuse tõttu, on võetud kasutusele lülitusrühma ehk lülitusgrupi mõiste. Kui kahel trafol on üks ja sama lülitusrühm, on trafode sekundaarpingete faasinurgad võrdsed.

Lülitusrühma määramisel kasutatakse üldtuntud osutitega kella numbrilauda. Ülem-pingepoole liinipingefaasorit kasutatakse kella minutiosuti rollis ja see paigutatakse numbrilauale alati 12 kohale. Alampingepoole liinipingefaasorit kasutatakse kui kella tunniosutit (tunniosuti on minutiosutist lühem) ja see paigutatakse numbrilauale sellises asendis, et nurk osutite vahel võrdub faasorite vahelise nurgaga.

Kui on tegemist näiteks joonisel 4.44,a kujutatud trafoga, paigutatakse tema primaarpingefaasor U_{AB} numbrilaual 12 kohale. Sekundaarpingefaasor on primaarpingefaasoriga samasuunaline ja ta paigutatakse tunniosutina samuti 12 kohale. Kella näit on 12 ehk 0. Ühendusskeemi ja lülitusrühma tähiseks kujuneb Yyn0.



Joonis 4.44. Kolmefaasilise trafo lülitusrühmade määramine faasordiagrammi järgi:
a – ühendusskeem ja lülitusrühm Yyn0; b – ühendusskeem ja lülitusrühm Ynd11

Joonisel 4.44,b oleval trafol jääb aga sekundaarpingefaasor U_{ab} primaarpingefaasorist U_{AB} 330° võrra maha ja tunniosuti tuleb järelilikult paigutada 11 kohale. Selliselt kujundatud kell näitab üheteistkümnendat täistundi. See kella näit võetaksegi lülitusrühma tingtähiseks. Seega kujuneb ühendusskeemi ja lülitusrühma tähiseks Ynd11.

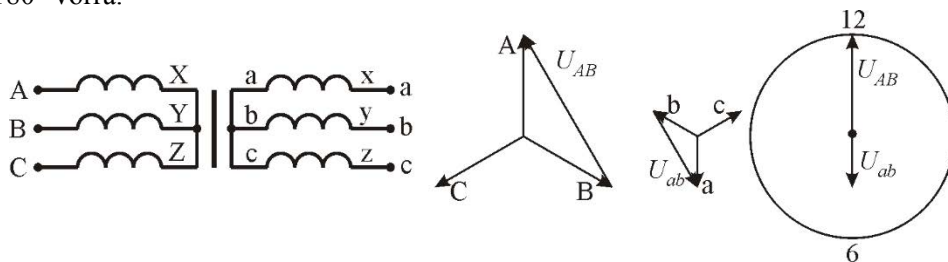
Lülitusrühma tingtähist kasutatakse trafo lühikirjelduse juures. Näiteks võib joonisel 4.43 kujutatud trafo T2 põhiaandmed kirjutada kujul 6/0,4 kV Yd11. Selles trafo kirjelduses sisaldub järgmine teave:

- ülempingepoole nimiliinipinge 6 kV;
- alampingepoole nimiliinipinge 0,4 kV;
- ülempingepoole mähiste ühendusskeem – täht;
- alampingepoole mähiste ühendusskeem – kolmnurk;
- lülitusrühm Yd11.

Eestis varem kasutusel olnud tähistusviisi järgi kirjutati sama trafo andmed kujul 6/0,4 kV Y/ Δ -11.

Võimalik on saada ka teistsuguseid lülitusrühmi. Mitmesuguseid võtteid kasutades saab tekitada trafo primaarpinge U_{AB} ja sekundaarpinge U_{ab} vahel faasinihkeid nullist kuni 330 kraadini iga 30 kraadi tagant. Joonisel 4.45 on näitena toodud lülitusrühma Yy6 saamine. Siin on primaarpoolel kokku ühendatud mähiste lõpud X, Y ja Z, sekundaarpoolel aga mähiste algused a, b ja c. Sel juhul on sekundaarmähiste lõpud x, y ja z ühendatud trafo sekundaarpoole väljundklemmidega a, b ja c.

Sekundaarpoole liinipinge faasor U_{ab} jääb primaarpoole liinipinge faasorist U_{AB} maha 180° võrra.



Joonis 4.45. Kolme faasiline trafo lülitusrühmaga Yy6

Kui ülempinge ja alampinge mähised on ühesuguse ühendusskeemiga (Yy, Dd või Zz), on võimalik saada paarisarvulised lülitusrühmad 0, 2, 4, 6, 8 ja 10. Kui ülempinge ja alampinge mähiste ühendusskeemid on erinevad (Yd, Dy, Yz jm), on võimalik saada paaritu arvulised lülitusrühmad 1, 3, 5, 7, 9 ja 11. Elektrivõrkudele suur lülitusrühmade arv ei sobi.

Euroopas kasutatakse põhiliselt lülitusrühmi 0 (ehk 12) ja 11, Ameerikas veel ka lülitusrühma 1. Eestis on keskpinge võrgust madalpinge võrku voolu andmisel praegu kasutusel ühendusskeemid lülitusrühmadega Yzn11 (kuni 100 kVA), Dyn11 (160 kuni 2500 kVA) ja ka Yyn0. Ühendusskeem Yyn talub mittesümmeetrilist koormust halvasti ja selle skeemiga trafode kasutamine madalpinge võrkudes väheneb. Mitmesuguste seadmete (näiteks muundurite) juures kasutatakse peale lülitusrühmade 11, 0 ja 1 ka teisi lülitusrühmi.

4.12.4 Trafode rööptööle lülitamise tingimused

Trafode rööptööle lülitamisel peab täitma järgmisi tingimusi.

- Rööbiti ühendatavatel mähistel peab olema sama faasijärjestus ja kokku ühendatakse sama nimega faasid** (näiteks ühendatakse esimese trafo A-faasi alguse klemm teise trafo A-faasi alguse klemmiga). Eri faaside pingetel on erinevad faasinihkenurgad ja eri faase ei tohi kokku ühendada, sest siis tekiks lubamatult suured ühtlustusvoolud.
- Trafodel peab olema sama ülekandesuhe.** Siis on võrdsete primaarpingete korral (mis antud juhul on tagatud primaarmähiste rööpühendusega) võrdsed ka sekundaarpinged. Võrdsete sekundaarpingete korral ei teki ebasoovitavaid ühtlustusvoolusid (ühtlustusvooludest oli juttu punktis 4.12.2). Tavaliselt siiski väikest ülekandesuhete erinevust lubatakse (näiteks $\pm 0,5\%$ nende keskmisest väärtusest).
- Trafodel peab olema sama lülitusrühm.** Sama lülitusrühma korral on kõik sekundaarpoole sama faasi (näiteks A) pinged ühesuguse faasinihkenurgaga ja järelikult ei teki faaside erinevusest tingitud ühtlustusvoolusid.
- Trafodel peavad olema võrdsed lühisepinged** ($u_{k1} = u_{k2} = u_{k3}$).

Kolme esimese tingimuse täitmine on vajalik selleks, et trafode vahel ei tekiks juba tühi jooksul ühtlustusvoolusid. Viimase, neljanda tingimuse eesmärk on aga teine.

Lühisepingete võrdsus on vajalik selleks, et üldine koormusvool jaguneks trafode vahel võrdeliselt nende nimivõimsustega. Selle tingimuse matemaatiliseks väljenduseks on koormustegurite võrdsus

$$\beta_{\text{koormus } 1} = \beta_{\text{koormus } 2} = \beta_{\text{koormus } n} = \dots, \quad (4.68)$$

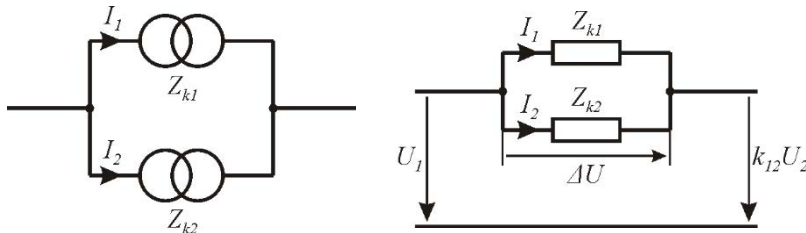
kus trafo koormustegur $\beta_{\text{koormus}} = I/I_n$. Koormustegurite võrdsuse korral tekib suurema võimsusega trafol suurem koormusvool, väiksema võimsusega trafol väiksem ja võrdse võimsusega trafodel ühesugune koormusvool. Selline koormuste jaotus ongi parim. Näitame, et lühisepingete võrdsus on koormustegurite võrdsuse tagamiseks vajalik ja piisav tingimus. Kui trafod on ühendatud rööbiti, siis on nende ekvivalenttakistustel Z_{k1} ja Z_{k2} tekkivad pingelangud võrdsed (joonis 4.46):

$$\Delta U = Z_{k1} I_1 = Z_{k2} I_2. \quad (4.69)$$

Lühise ekvivalenttakistuse Z_k võib avaldada kujul

$$Z_k = z_k^* Z_B = u_k^* \frac{U_n}{I_n}, \quad (4.70)$$

sest $z_k^* = u_k^*$ ja baastakistus $Z_B = Z_n = U_n/I_n$.



Joonis 4.46. Kaks rööpaltitluses trafot ja nende aseskeem

Koormusvoolu I võime avaldada koormusteguri β ja nimivoolu I_n kaudu

$$I = \beta \cdot I_n. \quad (4.71)$$

Asendades avaldises (4.69) Z_k ja I vastavalt avaldistele (4.70) ja (4.71), saame

$$U_n u_{k1}^* \beta_1 = U_n u_{k2}^* \beta_2. \quad (4.72)$$

Kuna rööpaltitlusele lülitatavate trafode nimipinged on võrdsed, siis

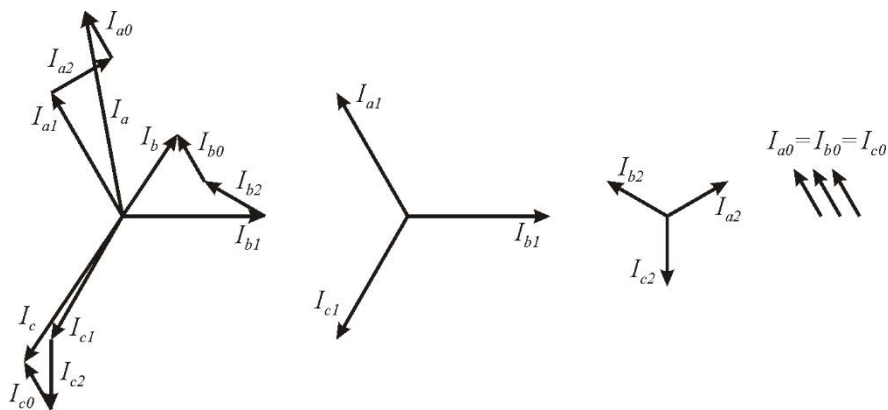
$$u_{k1}^* \beta_1 = u_{k2}^* \beta_2. \quad (4.73)$$

Kui eeldame, et avaldises (4.73) on lühisepinged võrdsed, st $u_{k1}^* = u_{k2}^*$, siis saame, et $\beta_1 = \beta_2$. Järelikult tagab trafode lühisepingete võrdsus koormusvoolude võrdelise jagunemise.

4.13 Mittesümmeetriline koormus kolmefaasilistes trafodes

Ühefaasilised tarbijad (näiteks valgustus) võivad kolmefaasilisele trafole põhjustada mittesümmeetrilise koormuse. Siinuselise mittesümmeetrilise koormuse mõju analüüsimiseks kasutatakse sümmeetriliste komponentide meetodit. Iga kolmefaasilise

mittesümmeetrilise voolusüsteemi (või pingesüsteemi) saab põhimõtteliselt asendada kolme sümmeetrilise süsteemiga, mis koos moodustavad esialgsega ekvivalentse mittesümmeetrilise süsteemi. Selline asendus on näidatud joonisel 4.47.

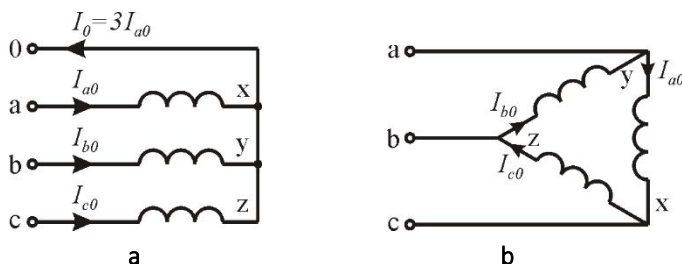


Joonis 4.47. Kolmefaasilise mittesümmeetrilise voolu esitamine sümmeetriliste komponentidena

Kolmefaasilise voolusüsteemi iga faasor I_a , I_b , ja I_c koosneb kolmest komponentfaasorist:

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} ; \\ I_b &= I_{b1} + I_{b2} + I_{b0} ; \\ I_c &= I_{c1} + I_{c2} + I_{c0} . \end{aligned} \tag{4.74}$$

Sealjuures on esimesed komponendid valitud nii, et nad moodustavad kolme-faasilise pärijärgnevussüsteemi I_{a1} , I_{b1} ja I_{c1} . Teised komponendid moodustavad vastujärgnevussüsteemi I_{a2} , I_{c2} ja I_{b2} , kus faasorite järjekord on muudetud. Kolmandad komponendid moodustavad nulljärgnevussüsteemi, mille faasorid on kõik ühes ja samas faasis. Päri- ja vastujärgnevuskomponendid läbivad kolme-faasilist trafot ilma olulise erinevuseta. Probleemid võivad tekkida nulljärgnevusvooludega, mis on trafo kõigis kolmes mähises ühes ja samas faasis. Joonisel 4.48 on näidatud nulljärgnevusvoolud neutraaliga tähtühenduse ja kolmnurkühenduse korral.



Joonis 4.48. Nulljärgnevusvoolud trafo mähistes nulljuhtmega tähtühenduse (a) ja kolmnurkühenduse (b) korral

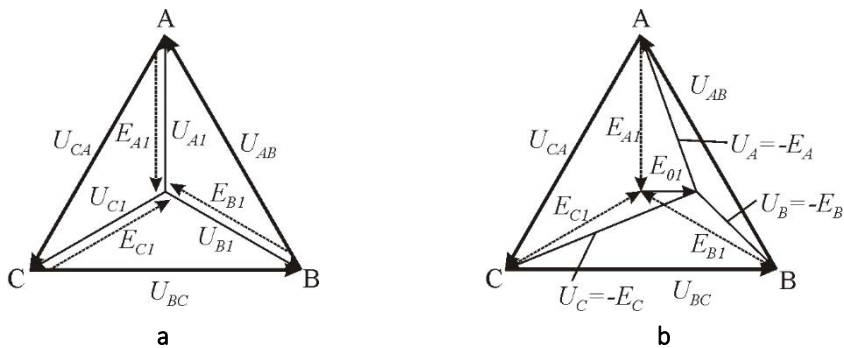
Tähtühenduse korral on neutraaljuhtme vool üksiku mähise voolust kolm korda suurem. Kolmnurkühenduse korral võivad nulljärgnevusvoolud voolata kolmest mähisest moodustatud **suletud kontuuris**, kui need sinna trafo teisest, tähtühenduses mähisest, indutseeritud on. Liinijuhtmetes ei saa kolmnurkühenduse korral nulljärgnevusvoolu olla, sest voolu üheaegne sisenemine klemmidest a, b ja c pole võimalik. Samal põhjusel ei saa nulljärgnevusvoolusid olla ilma neutraalita tähtühenduses.

Nulljärgnevusvoolud võivad olla kas sagedusega 50 Hz, kui nad on tingitud faasivoolude mittedümmeetriast, või sagedusega 150 Hz (kolmas harmooniline) ja 450 Hz (üheksas harmooniline), kui faasivoolud on küll sümmeetrilised, kuid voolukõvera kuju on moonutatud.

Kui üks trafo mähistest on lülitatud kolmnurka või siksakühendusse (näiteks Y/ Δ , Y/Z, Δ/Δ , Δ/Y), siis nulljärgnevuskomponent trafot ei läbi, vaid kompenseerub trafo sees. Sealjuures erilisi trafo pinget moonutusi ei ole.

Ühenduse Y₀/y₀ korral läbib nulljärgnevuskomponent trafo ja samuti pinget moonutusi ei teki. Ühenduse Y/y₀ korral nulljärgnevuskomponent trafot läbida ei saa ja ta ka ei kompenseeru trafo sees. Siinuselised nulljärgnevusvoolud hakkavad sel juhul magnetahelat magnetima, tekitades pinget mittedümmeetriat (joonis 4.49).

Kui trafo on kolmesambaline, sulgub nulljärgnevusvoolude magnetvoog läbi õhkvaahemiku ja trafo paagi. Kuna selle teekonna magnetiline takistus on suur, siis tekkiv pinget mittedümmeetriat eriti suur ei ole. Külgiketega trafosid ei saa aga ühenduses Y/y₀ muidu kasutada, kui paigutatakse trafote kolmas, kolmnurka ühendatud mähis (Y/y₀/d). Siis saavad nulljärgnevusvoolud kompenseeruda ja pinget mittedümmeetriat ei teki.



Joonis 4.49. Ühendusskeemi Y/y₀ faasipingete süsteemi muutumine nulljärgnevusvoolude tõttu

Kui nulljärgnevusvooludeks on kõrgemad harmoonilised, siis tekib ühenduse Y/y₀ korral ka märgatav pingekõvera moonutus. Kuna ühendusskeemil Y/y₀ on puudusi, kasutatakse selle asemel ka siksakskeemi Y/z₀, mis teeb aga trafo veidi kallimaks.

Trafo mähiste ühendusskeemi valikul peab veel arvestama, et sellest sõltub kolme-faasilise trafo primaar- ja sekundaarpingete suhe. Ühenduste D/d või Y/y korral on

primaar- ja sekundaarpoole liinipingete suhe tühijooksul võrdne trafomähiste keerdude arvu suhtega

$$\frac{U_{1l}}{U_{2l}} = \frac{w_1}{w_2}, \quad (4.75)$$

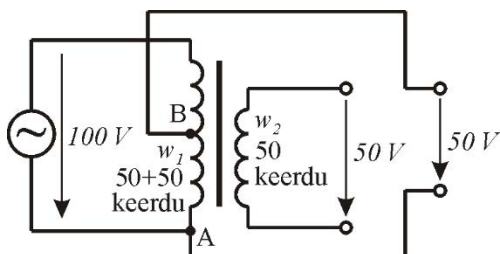
kuid ühendusel D/y

$$\frac{U_{1l}}{U_{2l}} = \frac{w_1}{\sqrt{3}w_2}. \quad (4.76)$$

4.14 Autotrafod

Harilikes trafodes on primaar- ja sekundaarmähis elektriliselt isoleeritud. Selle kohta öeldakse ka, et mähised on galvaaniliselt eraldatud. Energiaülekanne toimub harilikes trafodes ainult magnetvälja kaudu. Kui elumaja toidetakse 10 kV võrgust 10/0,4 kV trafo kaudu, siis galvaanilise eraldatuse tõttu ei satu maa suhtes kõrgepingeline potentsiaal elumajja. Mõnel juhul on siiski otstarbekam kasutada harilike trafode asemel trafosid, mille primaar- ja sekundaarmähis on ka elektriliselt ühendatud. Niisuguseid trafosid nimetatakse autotrafodeks.

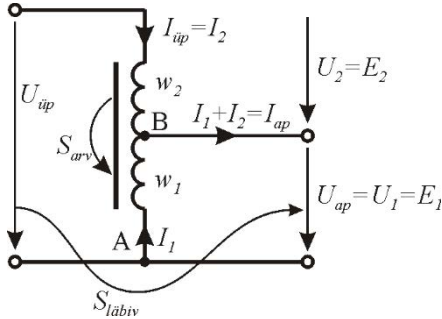
Joonisel 4.50 on näidatud trafo, milles 100 V primaarpinge U_1 muudetakse 50 V sekundaarpingeks kahel erineval moel. Sekundaarpinge saadakse nii galvaaniliselt eraldatud mähisest w_2 kui ka primaarmähise w_1 väljavõttest (punktide A ja B vahelt). Trafosüdamikku läbiv muutlik magnetvoog indutseerib igas mähisekeerus ühesuguse elektromotoorjõu. Antud näites tekib igal keerul emj 1 V. Selle tõttu saadakse pinge 50 V nii 50 keerdu omavast sekundaarmähisest w_2 kui ka primaarmähise w_1 ühest osast, millel on samuti 50 keerdu. Viimasel juhul kuulub punkt A aga otseselt nii trafo primaar- kui ka sekundaarpoolele. Järelikult galvaaniline eraldatus puudub.



Joonis 4.50. Kaks erinevat viisi vahelduvpinge alandamiseks trafo abil: eraldi sekundaarmähise w_2 abil ja primaarmähise väljavõtte abil

Kui trafo primaar- ja sekundaarpool on omavahel elektriliselt ühendatud, siis saab energiaülekanne primaar- ja sekundaarpoole vahel tekkida lisaks magnetilisele sidestusele ka elektrilise sidestuse kaudu. Seda on näidatud joonisel 4.51. Trafol on kaks mähist w_1 ja w_2 . Neid mähiseid võib vaadelda kahel moel – kas ühe väljavõttega mähisena või kahe jadamisi kokku ühendatud mähisena.

Primaarpinge, mis antud juhul on ülempinge $U_{\text{üp}}$, antakse mähiste w_1 ja w_2 keerdude summale. Sekundaarpinge, mis on alampinge U_{ap} , on määratud mähise w_1 keerdude arvuga. Kui vaatleme trafot ideaaltrafona, siis $U_{\text{ap}} = U_1 = E_1$.



Joonis 4.51. Autotrafol on arvutuslik energiavoog magnetvälja kaudu mähiste w_1 ja w_2 vahel (S_{arv}) väiksem kui ülempinge poolelt alampinge poolele ülekantav ehk läbiv energiavoog ($S_{\text{läbiv}}$)

Autotrafo juures saab vaadelda kahte võimsuse voogu. Ülempinge poolelt alampinge poolele minev näivvõimsus on trafot läbiv võimsus. Selle saab avaldada ülempinge poole parameetrite kaudu

$$S_{\text{läbiv}} = U_{\text{üp}} \cdot I_{\text{üp}} = U_{\text{üp}} \cdot I_2 \quad (4.77)$$

ja ka alampinge poole parameetrite kaudu

$$S_{\text{läbiv}} = U_{\text{ap}} \cdot I_{\text{ap}} = U_{\text{ap}} (I_1 + I_2). \quad (4.78)$$

Trafo magnetvälja kaudu ülekantav võimsus on trafo arvutuslik näivvõimsus

$$S_{\text{arv}} = U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2. \quad (4.79)$$

Tavalisel trafol $S_{\text{arv}} = S_{\text{läbiv}}$, kuid autotrafol on need võimsused erinevad. Joonise 4.51 järgi ning avaldiste (4.77) ja (4.79) põhjal

$$\frac{S_{\text{arv}}}{S_{\text{läbiv}}} = \frac{U_2 I_2}{U_{\text{üp}} I_{\text{üp}}} = \frac{(U_{\text{üp}} - U_{\text{ap}}) I_{\text{üp}}}{U_{\text{üp}} I_{\text{üp}}} = 1 - \frac{1}{k_{\text{tr}}} = \frac{k_{\text{tr}} - 1}{k_{\text{tr}}}. \quad (4.80)$$

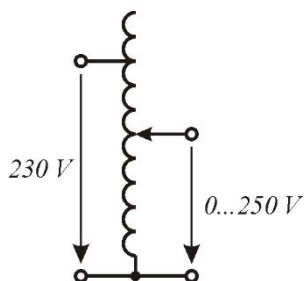
Siin autotrafo ülekandetegur $k_{\text{tr}} = U_{\text{üp}}/U_{\text{ap}} = (w_1 + w_2)/w_1$. Avaldis (4.80) näitab, et autotrafo arvutuslik võimsus (ja seega ka kaal ja mõõtmed) on ühel ja samal ülekantaval võimsusel seda väiksemad, mida väiksem on autotrafo ülekandetegur k_{tr} . Mõned suhte $S_{\text{arv}}/S_{\text{läbiv}}$ väärtused on toodud tabelis 4.2.

Autotrafode kasutamine on tulusam, kui tavaliste trafode kasutamine, sest $S_{\text{arv}} < S_{\text{läbiv}}$. Sama kaalu ja hinnaga autotrafo suudab läbi lasta rohkem võimsust kui tavaline trafo. Sellepärast nimetatakse autotrafosid ka säästutrafodeks. Siiski ei ole sääst suur, kui trafo ülekandetegur on suur. Autotrafosid kasutatakse harilikult ainult siis, kui $k_{\text{tr}} \leq 2,5$.

Tabel 4.2 Autotrafo arvutusliku võimsuse ja läbilaskevõimsuse suhe mitmesugustel autotrafo ülekandeteguritel k_{tr}

| k_{tr} | $S_{arv}/S_{läbiv}$ |
|----------|---------------------|
| 1,0 | 0 |
| 1,5 | 0,33 |
| 2,0 | 0,5 |
| 2,5 | 0,6 |
| 10 | 0,9 |

Energiasüsteemis kasutatavad autotrafod on kolmefaasilised. Neid kasutatakse näiteks 220 kV ja 330 kV võrgu kokkuühendamisel.



Joonis 4.52. Labori autotrafo

Autotrafo skeemi järgi ehitatakse ka pinge sujuva reguleerimisega trafosid. Sellisel trafol on tavaliselt ühekihiline mähis, mille välispinnalt on ühes kohas mähistraatide isolatsioon eemaldatud ja mööda seda ilma isolatsioonita pinda libiseb kontakthari (vt joonis 4.52). Harja liigutamisel muutub mähise väljavõtte asukoht ja koos sellega mähise keerdude arv ja pinge.

Selliseid autotrafosid kasutatakse laborites.

Ülesanne 4.7

Autotrafo primaarpinge on 230 V ja sekundaarpinge 200 V. Selle autotrafo primaarpoolelt sekundaarpoolele ülekantav näivvõimsus nimitalitluses on 2000 VA. Leida mähiste w_1 ja w_2 voolud nimitalitluses (joonis 4.51) ja autotrafo arvutuslik võimsus. Trafo lugeda ideaalseks.

Lahendus

1. Mähise w_2 vool on

$$I_{\text{üp}} = S_{\text{läbiv}}/U_{\text{üp}} = 2000/230 = 8,7 \text{ A}.$$

2. Autotrafo arvutuslik võimsus on

$$S_{\text{arv}} = U_2 \cdot I_2 = (U_{\text{üp}} - U_{\text{ap}}) \cdot I_{\text{üp}} = (230 - 200) \cdot 8,7 = 261 \text{ VA}.$$

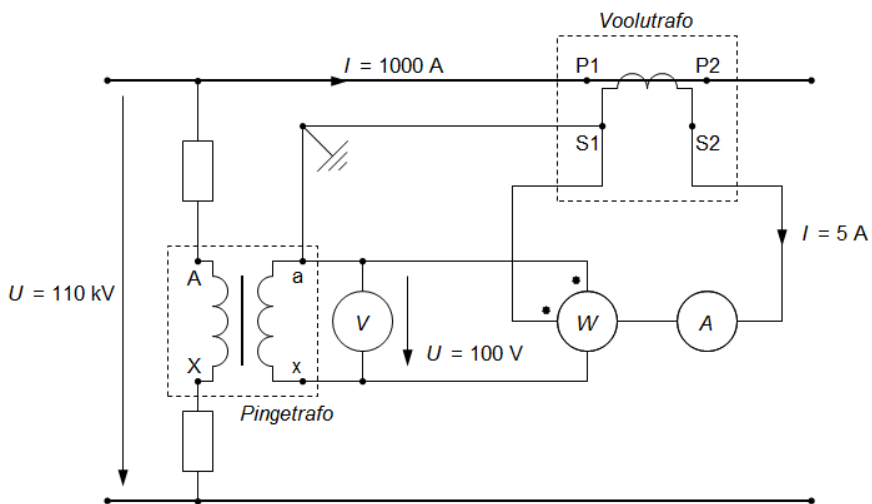
3. Mähise w_1 vool on

$$I_1 = S_{\text{arv}}/U_{\text{ap}} = 261/200 = 1,3 \text{ A}.$$

4.15 Pinge ja voolu mõõtmise trafod

Pingetrafosid ja voolutrafosid kasutatakse kõrge pinge ja suure voolu mõõtmisel. Siis nimetatakse neid mõõtetrafodeks. Elektrimõõteriista ei ole mõistlik ehitada kõrgele pingele (näiteks 110 kV) või suurele voolule (näiteks 1000 A). Selline mõõteriist oleks väga suur ja kallis, kõrgepinge puhul ka mõõtjale ohtlik.

Probleemi lahenduseks pingemõõtmisel kasutatakse trafo seda omadust, et koormusvabas olekus muutub sekundaarpinge võrdeliselt primaarpingega. Voolutrafo puhul kasutatakse seda omadust, et trafo sekundaarvool muutub võrdeliselt primaarvooluga, kui magnetimisvool on tühiselt väike. Mõõteriista võib panna mitte otse mõõteahelasse, vaid trafo sekundaarahelasse. Trafo sekundaarpinge nimiväärtuse (või sekundaarvoolu nimiväärtuse) saab valida nii, et mõõteriist oleks lihtne ja odav. Pingemõõtmisel valitakse tavaliselt 100-voldine nimipinge ja voolu mõõtmisel 5-amprine nimivool. Mõõteriistad ühendatakse mõõdetava elektriahelaga trafode kaudu, nagu on näidatud joonisel 4.53.



Joonis 4.53. Mõõteriistade lülitamine ühefaasilisse ahelasse mõõtetrafode vahendusel

Kui toodud näites on mõõdetava ahela pinge 110 000 V ja see on nimipinge, siis pinge pingetrafo sekundaarmähisel on 100 V, mis on voltmeetri nimipinge, kuid voltmeeter näitab siis 110 kV. Voltmeetri skaala on kilovoltides ja ta on mõeldud kasutamiseks ainult koos vastava pingetrafoga. Antud näites on pingetrafo primaar- ja sekundaarmähise keerdude arvu suhe $110\,000/100 = 1100$. Analoogiliselt on mõõdetava ahela 1000-amprise voolu juures vool läbi trafo sekundaarmähise ja ampermeetri 5 amprit (see on ühtlasi nimivool) ning osuti on siis ampermeetri skaala lõpus ja näitab 1000 A voolu.

Pingetrafo sekundaarpoolele ühendatakse kas voltmeeter, sagedusmõõtur, vattmeetri pingemähis või arvesti pingemähis. Pingetrafo sekundaarmähisele võib ühendada rööbiti ka mitu mõõteriista. Nende mõõteriistade elektritakistus on suur ja nad võtavad pingetrafst väga vähe voolu. Pingetrafo töötab tühijooksu talitluse lähedal. Selle tõttu on pingelangud trafo mähistel väga väikesed ja trafo töö on lähedane ideaaltrafo tööle. See on vajalik mõõtmise täpsuse huvides. Ideaaltrafol $U_2 = (w_2/w_1) \cdot U_1$. Pingetrafo koormamisel vooluga mõõdetäpsus halveneb. Lühise korral tekib pingetrafo mähistes suur vool, nad kuumenevad üle ja riknevad.

Voolutrafode sekundaarpoolele ühendatakse kas ampermeeter, vattmeetri voolumähis või arvesti voolumähis. Võib ühendada ka kaks või kolm mõõteriista korraga, kuid siis ainult jadamiis (joonis 4.53). Iga mõõteriista peab läbima voolutrafo kogu sekundaarmähise vool. Voolutrafo sekundaarahelasse lülitatavate mõõteriistade takistus valitakse hästi väike. Voolutrafo töötab siis lühisetalitluse lähedal. Selle tõttu on pinged mähistel väikesed. Väike pinge on vajalik magnetvoo vähendamiseks magnetahelas. Väikese magnetvoo korral on ka magneetimisvool väike (trafo ase skeemis on see magneetimisharu vool). Kui magneetimisharu vool on tühiselt väike, siis $I_2 = (w_1/w_2) \cdot I_1$. Mõõtmise täpsuse huvides ongi just seda vaja.

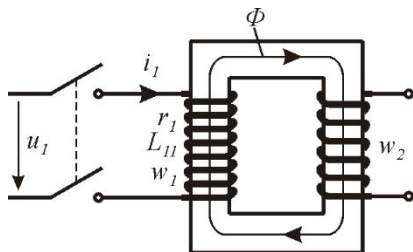
Ohutuse tagamiseks maandatakse nii voolu- kui ka pingetrafol üks sekundaarmähise klemmidest (joonis 4.53). Kui voolutrafo töö ajal katkestatakse sekundaarahel (näiteks ampermeeter ühendatakse lahti), muutub sekundaarahela vool nulliks. Selle tõttu muutub kogu primaarmähise vool magneetimisvooluks. Magnetvoog kasvab mitmekordseks ja trafo südamik hakkab üle kuumenema. Koos magnetvooga kasvab ka pinge sekundaarmähisel ja pinge võib saavutada ohtliku väärtuse. Sellepärast ei lubata katkestada voolutrafo sekundaarahelat ajal, kui primaarmähist läbib vool.

4.16 Siirdeprotsessid trafodes

4.16.1 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 (joonis 4.54) lülitamist võrku, mille pinge muutub siinuseliselt $u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \psi)$.



Joonis 4.54. Tühijooksul töötava trafo võrku lülitamise skeem

Küllastumata trafo

Oletame esmalt, et trafosüdamik pole üldse küllastunud ja seetõttu mähise induktiivsus $L_{11} = const$. Siis väljendub sisselülitamisel tekkiv siirdeprotsess võrrandiga:

$$U_{1m} \sin(\omega t + \psi) = r_1 i_1 + L_{11} \frac{di_1}{dt}. \quad (4.81)$$

Elektrotehnika teoreetiliste aluste kursusest on teada, et siirdeprotsessi voolu i_1 võib esitada kahe komponendi summana:

$$i_1 = i'_1 + i''_1, \quad (4.82)$$

millest esimene komponent

$$i'_1 = I_{1m} \sin(\omega t + \psi - \varphi_0), \quad (4.83)$$

kus

$$\left. \begin{aligned} I_{1m} &= \frac{U_{1m}}{\sqrt{r_1^2 + \omega^2 L_{11}^2}} \\ \varphi_0 &= \arctan \frac{\omega L_{11}}{r_1} \end{aligned} \right\} \quad (4.84)$$

kujutab endast siinuselist püsi- ehk sundvoolu, mis tekitatakse primaarklemmidele rakendatud pinge u_1 toimel, aga teine komponent

$$i''_1 = -I_{1m} \sin(\psi - \varphi_0) e^{-\frac{t}{T_1}} \quad (4.85)$$

on aperioidilise iseloomuga nn vabavool, mis ei säili välise elektromotoorjõu allika toimel, ning sumbub seetõttu nullini ajakonstandiga $T_1 = L_{11}/r_1$.

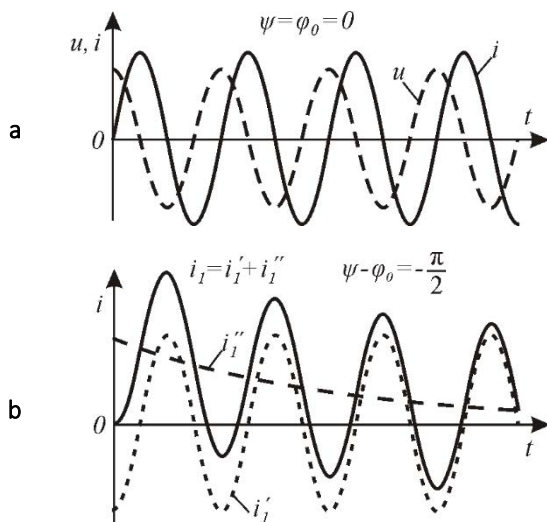
Toodud lahenduse õigsuses võib veenduda, asetades i_1 ja tema komponentide väärtused avaldistest (4.82)...(4.85) avaldise (4.81). Seejuures rahuldab i'_1 võrrandit (4.81), aga i''_1 võrrandit

$$0 = r_1 i_1 + L_{11} \frac{di_1}{dt}.$$

Jooniselt 4.55,b on näha, et $t=0$ korral on ka $i_1 = i'_1 + i''_1 = 0$. Seega on vabavoolu algväärtus alati suuruselt võrdne püsivoolu algväärtusega, aga vastupidise märgiga. Kui lülitamise hetkel on pinge algaas ψ selline, et $\psi - \varphi_0 = 0$, siis $i''_1 = 0$ ning ahelas tekib kohe püsirežiim (joonis 4.55,a). Kui aga $\psi - \varphi_0 = \pm\pi/2$, siis saavutab i''_1 maksimaalse võimaliku väärtuse, mis $t=0$ korral võrdub vahelduvvoolu amplituudiga I_{1m} (joonis 4.55,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 mõningast lõplikku väärtust i'_{10} . Seejuures on vabavoolu algväärtus $i''_{10} = -i'_{10}$ niisugune, et $t=0$ korral võrdub voolu koguväärtus vastavalt lülitamise algtingimustele nulliga.

Vaadeldud vahelduvvoolu induktiivahela siirdeprotsess on iseloomulik ka keerukamatele juhtudele. Ahela töörežiimi igasugusel rikkumisel esinevas siirdeprotsessis tekib vaba aperioidiline vool, mis energia aktiivtakistustes hajumise tagajärjel sumbub. Aperioidilise voolu algväärtus on seejuures võrdne algrežiimi (eelneva režiimi) ning uue režiimi (järgneva režiimi) püsivoolude hetkväärtuste vahega algrežiimi muutva tõukeimpulsi (näiteks pingepulsi) rakendamise momendil. Vabavool on seega induktiivsust omava inertse ahela vastumõju impulsile, mis püüab ahela režiimi muuta. See vabavool silub üleminekut uuele režiimile, lubamata voolu hetkelisi suuruselt lõplikke muutumisi, mis inertses ahelas ei ole võimalikud.



Joonis 4.55. Küllastumata trafo lülitusvool

Küllastunud trafo

Reaalse trafo korral on vaja tingimata arvestada südamiku märgatavat küllastatust. Seepärast $L_{11} \neq \text{const}$ ning võrrandi (4.81) viimase liikme asemel tuleb kirjutada $d(L_{11}i_1)/dt$, kusjuures

$$L_{11}i_1 = \Psi = w_1 \Phi \quad (4.86)$$

kujutab endast mähise aheldusvoogu.

Antud juhtumil on otstarbekohane võtta muutuva voolu i_1 asemel kasutusele muutuv voog Φ . Vastavalt avaldisele (4.86)

$$i_1 = \frac{w_1 \Phi}{L_{11}}, \quad \frac{d(L_{11}i_1)}{dt} = w_1 \frac{d\Phi}{dt}$$

ning seepärast saame (4.81) asemel

$$\frac{U_{1m}}{w_1} \sin(\omega t + \psi) = \frac{r_1}{L_{11}} \Phi + \frac{d\Phi}{dt}. \quad (4.87)$$

Selle võrrandi integreerimine on küllalt raske seetõttu, et siin $L_{11} \neq \text{const}$. Viimane on määratav keeruka mittelineaarse seosega $i = f(\Phi)$, mis kujutab endast trafo magnetilist karakteristikut. Kuid et võrrandi (4.87) parema poole esimene liige on r_1 väiksuse tõttu teise liikmega võrreldes tähtsusetu, samuti nagu pingelang $r_1 i_1$ on väike võrreldes elektromotoorjõuga $-d(L_{11}i_1)/dt$, võib (4.87) integreerimisel lugeda L_{11} ligikaudselt konstantseks. Sellistel tingimustel võib võrrandi (4.87) lahendi esitada kahe liidetava summana

$$\Phi = \Phi' + \Phi'', \quad (4.88)$$

kus Φ' on püsivoo hetkväärtus ja Φ'' – vabavoo hetkväärtus.

Magnetvoogude Φ' ja Φ'' summa hetkväärtus avaldub kujul

$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t + \psi) + (\Phi_m \cos \psi \pm \Phi_0) e^{-\frac{r_1 t}{L_{11}}}. \quad (4.89)$$

Kõige soodsam lülitamishetk on siis, kui $\psi = \pi/2$ (pinge läbib lülitamishetkel maksimumi) ja $\Phi_0 = 0$. Siis

$$\Phi = -\Phi_m \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = \Phi_m \sin \omega t, \quad (4.90)$$

mis tähendab, et normaalrežiim siinuseliselt muutuva vooga saavutatakse hetkeliselt ning siirdeprotsess puudub. Kõige ebasoodsam on juhtum, kui $\psi = 0$ (pinge läbib lülitamishetkel nulli) ning avaldises (4.89) tuleb kasutada plussmärki, st kui voog Φ_0 on hetkel $t = 0$ suunatud vastu voole Φ' . Sel juhul, vastavalt avaldisele (4.89)

$$\Phi = -\Phi_m \cos \omega t + (\Phi_m + \Phi_0) e^{-\frac{r_1 t}{L_{11}}}. \quad (4.91)$$

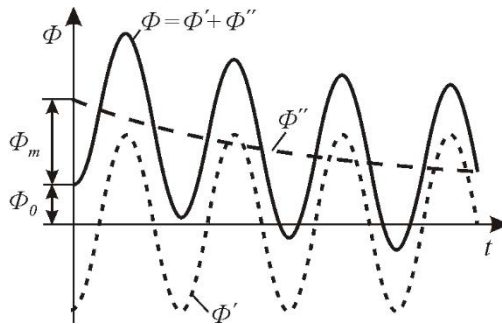
Kõvera $\Phi = f(t)$ kuju antud juhu jaoks on esitatud joonisel 4.56. Voog Φ saavutab maksimaalväärtuse umbes pool perioodi pärast sisselülitamist, st kui $\omega t \approx \pi$. Seejuures

$$e^{-\frac{r_1 t}{L_{11}}} = e^{-\frac{r_1 \pi}{\omega L_{11}}} \approx 1, \quad (4.92)$$

sest harilikult $r_1 \ll \omega L_{11}$. Seepärast (4.91) alusel

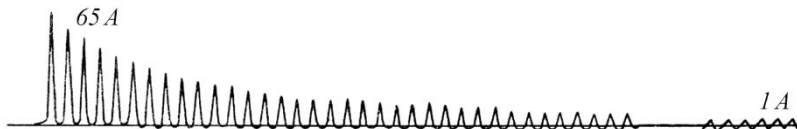
$$\Phi_{\max} \approx 2\Phi_m + \Phi_0. \quad (4.93)$$

Seega ületab Φ_{\max} üle kahe korra töövoo normaalväärtust ja järelikult südamiküllastub erakordselt tugevasti, mis omakorda põhjustab küllalt suuri magnetimisvoolusid.



Joonis 4.56. Magnetvoo Φ muutumine, kui trafo lülitatakse võrku mittesooitaval hetkel

Joonisel 4.57 on mõõduka küllastusega keskmise võimsusega trafo lülitusvoolu ostsilogramm.



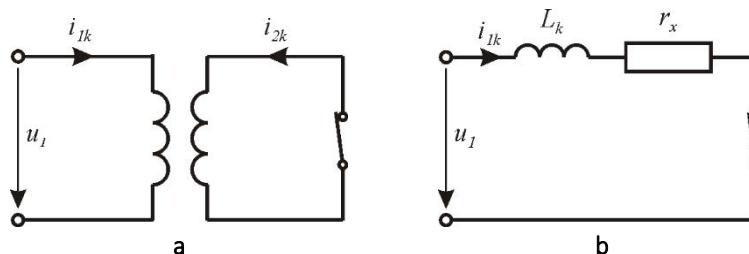
Joonis 4.57. Küllastunud trafo lülitusvoolu ostsilogramm

Paljudel juhtumitel võivad lülitusvoolu maksimaaltõuked ületada tühijooksu püsivoolu amplituudi 100...150 korda ja sellele vastavalt ulatuda mitmekordse nimivoolu amplituudväärtuseni. Niisugused lülitusvoolu tõuked valmistavad raskusi trafosid kaitsvate voolureleede konstrueerimisel ja seadistamisel, kuna võivad trafo võrku lülitamisel esile kutsuda kaitsereleede vale rakendumise. Samas aga küllastuse puudumisel, nagu nägime eespool, võib lülitusvoolu maksimaalne tõuge ületada tühijooksu püsivoolu amplituudi ainult kaks korda.

4.16.2 Trafo järsk lühis

Lühisevoolud

Punktis 4.7 vaatlesime lühise püsirežiimi trafo sekundaarklemmidel. Talitlusolukorras tekib lühis harilikult järsku mitmesuguste rikete tõttu elektrivõrkudes (elektriläbilööök või isolatsiooni mehaaniline vigastus, personali ekslik tegevus jne). Seejuures tekib trafos järsk siirdeprotsess, millega kaasnevad suured voolud. Need toovad kaasa trafo vigastamise ohu. Vaatleme järsu lühise protsessi ühefaasilise trafo sekundaarklemmidel (joonis 4.58,a). Eeldame seejuures, et primaarpinge efektiivväärtus U_1 jääb muutumatuks. Selle protsessi iseärasused on iseloomulikud ka lühisele kolmeefaasilise trafo sekundaarklemmidel.



Joonis 4.58. Trafo lühise skeem

Püsilühisel on magnetimisvool mähise koguvooluga võrreldes küllalt väike. Nii on see ka järsul lühisel. Peale selle on lühisevoolu suure väärtuse tõttu pingelang primaarmähise aktiivtakistusel r_1 ning puisteinduktiivtakistusel x_1 ka küllalt suur. Tõepoolest, harilikult $z_1 \approx z'_2$ ning vastavalt trafo lihtsustatud askeemile on lühisel $I_1 z_1 \approx 0,5 E_1$. Seepärast on elektromotoorjõud E_1 ja südamik voog Φ peaaegu kaks korda väiksemad oma nimiväärtusest ning südamik ei ole küllastunud. Samadel põhjustel (väike pinge ja magnetvoog) võib järsul lühisel jätta arvestamata ka magnetimisvoolu ja võtta seega arvutuse aluseks trafo lihtsustatud askeemi (joonis 4.58,b). Selle skeemi parameetrid

$$r_k = r_1 + r'_2 \quad \text{ja} \quad L_k = \frac{x_k}{\omega} = \frac{x_1 + x'_2}{\omega}$$

võib lugeda konstantseks.

Vastavalt skeemile joonisel 4.58,b kirjeldatakse järsu lühise protsessi trafo sekundaarklemmidel diferentsiaalvõrrandiga

$$U_{1m} \sin(\omega t + \psi) = r_k i_{1k} + L_k \frac{di_{1k}}{dt}. \quad (4.94)$$

See võrrand on täiesti analoogiline võrrandiga (4.81), mis on ka loomulik, sest need mõlemad võrrandid vastavad oma olemuselt konstantsete parameetritega reaktiivpooli lülitamisele siinuspingele. Vaadeldaval juhtumil koosneb lühisevool i_{1k} samuti kahest komponendist – püsivoolust i'_{1k} ja vabavoolust i''_{1k} :

$$i_{1k} = i'_{1k} + i''_{1k}. \quad (4.95)$$

Püsivoolu ja vabavoolu hetkväärtuste ja nende kaudu voolu i_{1k} hetkväärtuste leidmiseks saab tuletada alljärgneva valemi:

$$i_{1k} = I_{1k m} \sin(\omega t + \psi - \varphi_k) - I_{1k m} \sin(\psi - \varphi_k) e^{-\frac{r_k t}{L_k}}. \quad (4.96)$$

Lühisevool on induktiivse iseloomuga ning $0 < \psi_k < 90^\circ$. Trafo koormus on harilikult induktiivse iseloomuga ning seetõttu $0 < \varphi_{\text{koormus}} < 90^\circ$. Neil tingimustel põhjustab eelnev koormus aperioidilise vabavoolu vähenemise ning sellega ka lühisevoolu tippväärtuse vähenemise. Ja vastupidi – mahtvusliku iseloomuga eelneval koormusel aperioidiline vabavool suureneb. Praktikas trafodel mahtvuslikku koormust peaaegu ei esine ning seetõttu osutub võrdusega (4.96) väljendatav lühis tühijooksul kõige ebasoodsamaks. Seda juhtumit me peamegi edaspidi silmas.

Sõltuvalt nurga $\psi - \varphi_k$ suuruselt on kõveral $i_{1k} = f(t)$ erinev kuju. Iseloomulikud juhtumid on analoogilised joonisel 4.55 esitatuga.

Suuruse $\psi - \varphi_k = \pm \pi/2$ korral omavad aperioidiline vabavool ning voolu tipud suurimaid väärtusi (vt joonis 4.55,b). Eeldades, et $\psi - \varphi_k = -\pi/2$, saame vastavalt avaldisele (4.96)

$$i_{1k} = -I_{1k m} \cos \omega t + I_{1k m} e^{-\frac{r_k t}{L_k}}. \quad (4.97)$$

Voolu maksimaal- ehk löökväärtus i_{1kl} saavutatakse ligikaudu $\omega t = \pi$ korral ehk ajavahemiku $t = \pi/\omega$ järel pärast lühise teket. Vastavalt avaldisele (4.97)

$$i_{1kl} = I_{1k m} \left(1 + e^{-\frac{\pi r_k}{x_k}} \right). \quad (4.98)$$

Selle avaldise sulgudes olevat kordajat nimetatakse löögiteguriks

$$k_l = 1 + e^{-\frac{\pi r_k}{x_k}}. \quad (4.99)$$

Löögitegur näitab, mitu korda on lühise löökvool suurem kui lühise püsivoolu amplituudväärtus. Sõltuvalt suuruselt r_k/x_k võib tegur k_l muutuda piirides 1...2. Võimsatel trafodel $k_l = 1,7 \dots 1,8$, väikestel aga $k_l = 1,2 \dots 1,3$. Näiteks trafol võimsusega 1000 kVA on lühisepinge ja selle komponentide suurused järgmised:

$$u_{k\%} = 6,5\%, \quad u_{ka\%} = 1,5\% \quad \text{ja} \quad u_{kr\%} = 6,32\%.$$

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

$$\frac{100}{u_{k\%}} k_1 = \frac{100}{6,5} \cdot 1,475 = 22,7$$

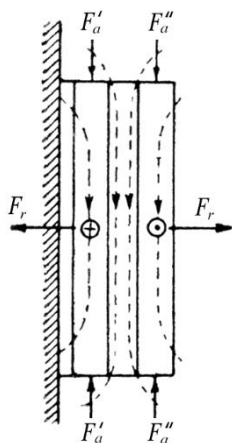
korda suurem nimivoolu amplituudväärtusest.

Trafosiseste lühiste korral, kui isolatsiooni vigastumise tagajärjel lühistub osa trafomähise keerdudest, on voolu kordsused mähise vigastatud osas veelgi suuremad, kuna mähise selle osa pinge või elektromotoorjõud väheneb võrdeliselt keerdude arvu esimese astmega, induktiivtakistus väheneb aga võrdeliselt keerdude arvu ruuduga.

Lühisevoolude toime väljendub trafomähiste suuremas soojenemises ning mähisetele mõjuvate suurte elektromagnetiliste jõudude tekkes.

Elektrisüsteemides ja -võrkudes kasutatakse kiiretoimelist releekaitset või sulavkaitsmeid ning võrgu vigastatud osa ja vigastatud seadmestik lülitatakse sekundi murdosa vältel pärast lühise algust võrgust välja. Seetõttu välislühistel ei jõua trafomähised soojeneda ohtliku temperatuurini. Kuid siselühistel sulavad lühistatud keerdude traadid harilikult ära ja trafo rikneb.

Joonisel 4.59 on näidatud kontsentriliste silindermähistega trafo puistemagnetvälja pilt. Sellelt pildilt järeldub, et mähisetele mõjuvad kahesugused elektromagnetilised jõud: esiteks radiaaljõud F_r , mis püüavad sisemist mähist radiaalsuunas kokku suruda ning välimist mähist laiali tõmmata ja teiseks aksiaaljõud F_a , mis püüavad mähiseid pikisuunas kokku suruda.



Joonis 4.59. Puistemagnetvälja iseloom ja elektromagnetilised jõud trafos lühise korral

Mähisele mõjuvad elektromagnetilised jõud on võrdelised voolu ruuduga ning lühistel on nad üsna suured. Seoses sellega osutub trafo projekteerimisel üheks tähtsamaks ülesandeks mähiste küllaldase kinnituse (toestuse) tagamine.

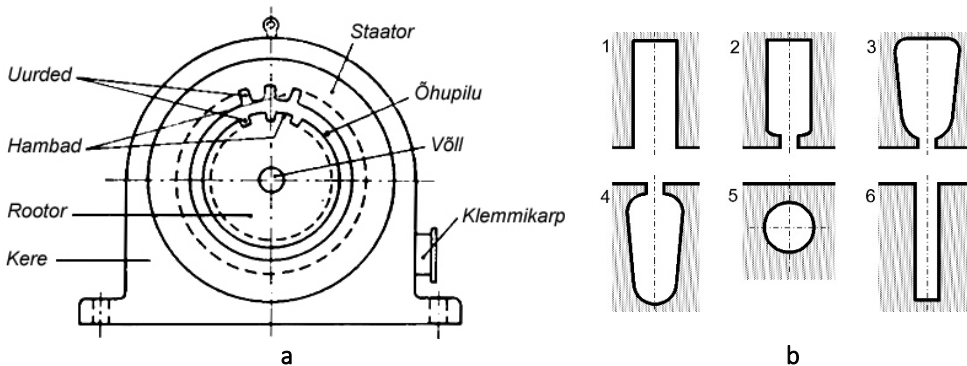
5 ASÜNKROONMASINAD

Asünkroonmasinad on samuti vahelduvvoolumasina nagu sünkroonmasinad. Neil masinatel on ühesugune staator, mis tekitab õhupilus pöörleva magnetvälja. Asünkroonmasinat kasutatakse eelkõige mootorina, kuid teatud tingimustel võib ta töötada ka generaatorina. Kolmefaasilised asünkroonmootorid on kõige levinumad elektrimootorid. Teiste mootoritega võrreldes on nad kõige lihtsama ehitusega, suhteliselt odavad ja töökindlad.

5.1 Asünkroonmasina ehitus ja tööpõhimõte

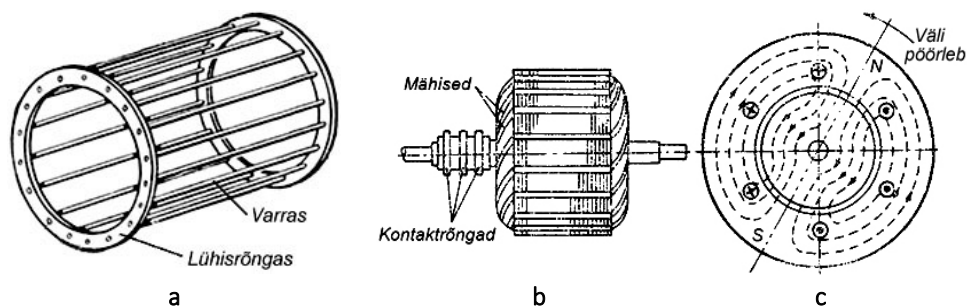
Asünkroonmootori vaated on toodud esimeses peatükis joonistel 1.5 ja 1.6. Joonisel 1.6,b on rootor staatori seest välja võetud ja on näha, et see rootor kujutab endast võllile asetatud silindrit. See silinder on koostatud teraslehtedest.

Joonisel 5.1 on toodud ühe teise asünkroonmootori ristlõige. Näha on nii rootor kui ka staator, neil mõlemal on mähise jaoks uured. Staatori uured võivad olla väga erineva kujuga (näiteks uured 1, 2 ja 3 joonisel 5.1,b). Staator on kinnitatud (tavaliselt pressitud) mootori kereesse.



Joonis 5.1. Asünkroonmootori skemaatiline lõige (a) ja uurete kujud (b)

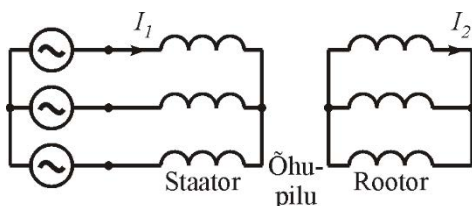
Rootori välispinnal on samuti uured, milles asub mähis. Nende uurete võimalikud kujud 4, 5 ja 6 on samuti näidatud joonisel 5.1,b. Rootori teraslehtedest konstruktsioon on – nagu staatorilgi – mõeldud pöörivoolukao vähendamiseks. Rootorimähis võib olla valmistatud kas **lühismähisena** (joonis 5.2,a) või staatorimähisega sarnase kolmefaasilise mähisena, mis koosneb rootorist isoleeritud mähisepoolidest (joonis 5.2,b). Esimesel juhul on tegemist **lühisrootoriga asünkroonmootoriga**, teisel juhul **faasirootoriga asünkroonmootoriga**. Enim levinud on lühisrootoriga asünkroonmootorid. Nende lühismähis koosneb varrastest ja neid ühendavatest lühisrõngastest. Selline mähis valmistatakse alumiiniumist survevalu meetodil. Valamisel täituvad üheaegselt kõik isoleerimata uured ja moodustuvad ka lühisrõngad koos ventilatsiooniks vajalike tiivikulabadega nende küljes. Seda mähist nimetatakse ka oravikmähiseks.



Joonis 5.2. Asünkroonmootori lühismähis (a), faasimähisega rootor (b) ja kahepooluselise magnetvoo väljapilt (c)

Faasirootori korral on kolme faasi mähised tavaliselt ühendatud tähte ja iga mähise algus on ühendatud ühega kolmest võllil asuvast üksteisest isoleeritud kontaktõngast. Kontaktõngastega kontaktis olevate harjade kaudu on rootorimähis ühendatud välisahelaga, kus asub kiiruse reguleerimise skeem. Viimasel ajal kasutatakse faasirootoriga asünkroonmootori asemel sageli lühisrootoriga mootorit koos sagedusmuunduriga, mis samuti võimaldab kiirust reguleerida.

Asünkroonmootori tööpõhimõttes selgusele jõudmiseks on kasulik alustada kahest äärmuslikust talitlusest, milleks on **paigalseis** ja **ideaalne tühijooks**. Kui asünkroonmootori rootor on pidurdatud ja pöörlema ei saa, töötab asünkroonmootor trafona. Staatorimähise võrku lülitamisel tekib vool. Staatorimähise vahelduvväli läbib õhupilu ja indutseerib rootorimähises pinget. Kui rootoril on lühismähis, on olukord analoogiline kolmefaasilise trafo lühisetalitlusele (joonis 5.3). Rotorimähises tekivad toitepinge sagedusega pinget ja vool.

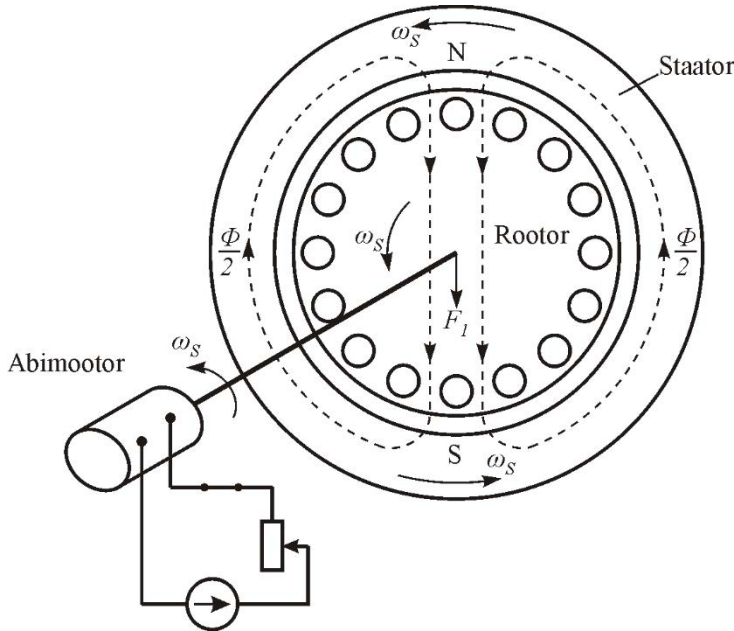


Joonis 5.3. Pidurdatud lühisrootoriga asünkroonmootor töötab nagu lühistatud trafo

Kui aga võlli mitte takistada ja panna asünkroonmootori rootor välise jõuallika abil pöörlema täpselt sama kiirusega ja samas suunas, kui pöörleb staatorimähise magnetväli, siis rootorimähises pinget ei indutseerita. Põhjus on selles, et siis seisab staatorimähise väli rootori suhtes paigal ja paigalseisev väli juhtmetes pinget ei indutseeri. Pinget puudumisel ei teki rootorimähises ka voolu (joonis 5.4).

Eelkirjeldatud rootori pöörlemiskiirust nimetatakse **sünkroonkiiruseks** (analoogia põhjal sünkroonmasinaga). Sünkroonkiirusel on asünkroonmasin absoluutse tühijooksu talitluses, sest rootorimähise voolu puudumise tõttu puudub ka elektromagnetiline moment. Staatorimähises on samal ajal aga vool, mis vastab trafo tühijooksuvoolule. **Seega vastab pidurdatud rootoriga asünkroonmootor lühistatud trafotele ja ideaalsel tühijooksul olev asünkroonmootor tühijooksutalitluses**

trafole. Asünkroonmootori tühijooksuvool on trafo tühijooksuvoolust siiski mitu korda suurem, sest asünkroonmootoril on õhupilu, mida trafol ei ole. Tühijooksuvoolu vähendamiseks püütakse asünkroonmootori õhupilu teha hästi väike (umbes 0,5 mm).

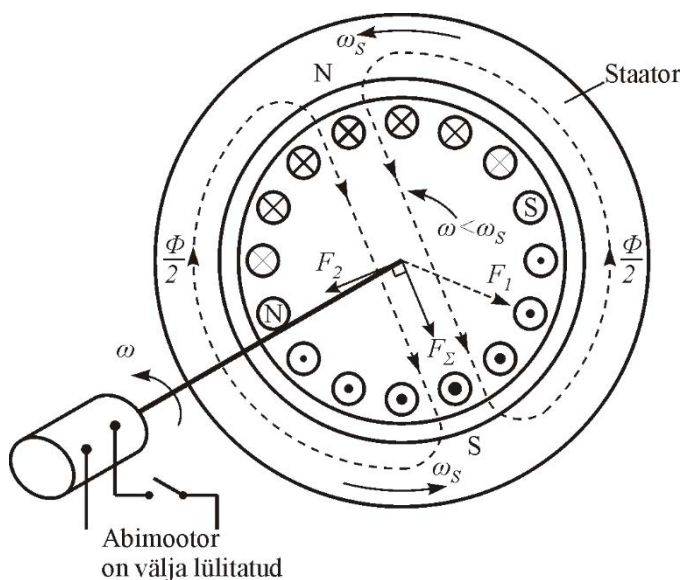


Joonis 5.4. Asünkroonmasin, mida välise jõuallika abil hoitakse sünkroonkiirusel ehk ideaalsel tühijooksul

Kui joonisel 5.4 näidatud väline jõuallikas välja lülitatakse, tekib uus olukord, mis on näidatud joonisel 5.5. Rootori kiirus hakkab hõõrdumise ja õhutakistuse tõttu tasapisi vähenema. Sellega hakkavad rootorimähise juhtmed sünkroonkiirusel pöörleva staatorivälja suhtes tagurpidi libisema ja neis indutseeritakse väike pinge. Lühismähise takistus on väike ja juba väike pinge põhjustab märkimisväärse voolu. Vastavalt parema käe reeglile on voolu suund joonisel põhjapooluse vastas olevates juhtmetes suunatud joonise tasapinna sisse ja lõunapooluse vastas olevates juhtmetes joonise tasapinnast välja. Rootorivoolu mõjul tekivad

- rootorijuhtmetel indutseeritud jõud ja jõumoment ning
- rootorimähise magnetväli (poolused N ja S rootoril joonisel 5.5).

Indutseeritud jõu suund on selline, et tekkiv jõumoment on staatorivälja pöörlemise suunas (jõu suuna saab määrata vasaku käe reeglga, joonisel ei ole jõudu näidatud). See jõumoment panebki asünkroonmasina pöörlema. Seega **staatorimähise väli indutseerib asünkroonmootori rootorijuhtmetele nii elektromotoorjõu kui ka mehaanilise jõu** (kui rootorimähiste voolukontuur on suletud).



Joonis 5.5. Kergelt koormatud asünkroonmootor

Kui asünkroonmootor on ainult kergelt koormatud, erineb **rootori nurkkiirus** ω sünkroonkiirusest ω_s väga vähe (näiteks $\omega = 0,999 \omega_s$). Rootorimähises indutseeritakse elektromotoorjõud, millel on väga väike nurksagedus ω_2 . See nurksagedus on kahepooluselisel mootoril võrdne rootori **suhtelise kiirusega** pöörleva staatorivälja suhtes. Kui staatorivälja pöörleb sünkroonse nurkkiirusega ω_s ja rootori nurkkiirus paigalseisva staatori suhtes on ω , on rootori nurkkiirus ω_2 staatorivälja suhtes

$$\omega_2 = \omega_s - \omega \quad (5.1)$$

ehk

$$n_2 = n_s - n, \quad (5.2)$$

kui pöörlemiskiirust mõõdetakse pöörates minuti kohta. Rootori suhtelist kiirust staatorivälja suhtes ω_2 või n_2 nimetatakse ka **libistuskiiruseks**. Suhtelist libistuskiirust staatorivälja kiiruse suhtes nimetatakse **libistuseks** s :

$$s = \frac{n_2}{n_s} = \frac{\omega_2}{\omega_s} = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}. \quad (5.3)$$

Kui 50-hertsisel toitel on kaks poolust, on sünkroonkiirus $n_s = 3000$ p/min. Kui mootori kiirus on $n = 0,999 n_s$, on libistuskiirus $n_2 = n_s - 0,999 n_s = 0,001 n_s = 0,001 \cdot 3000 = 3$ p/min. Seega libiseb rootor pöörleva välja suhtes aeglaselt tagasi nii, et minuti kohta tuleb ainult kolm täispöörret. Rootori kiirus paigalseisva staatori suhtes on samaaegselt aga $n = n_s - n_2 = 3000 - 3 = 2997$ p/min. Antud juhul on libistus $s = n_2/n_s = 3/3000 = 0,001$ ehk 0,1%. Libistuse avaldise (5.3) võib kirjutada ka kujul

$$n_2 = s n_s \text{ ehk } \omega_2 = s \omega_s. \quad (5.4)$$

Sünkroonkiirus ω_s , mis väljendab staatorivälja pöörlemiskiirust radiaanides sekundis, sõltub pooluspaaride arvust p ja toitepinge nurksagedusest $\omega_1 = 2\pi f_1$, kus f_1 on võrgupinge sagedus.

$$\omega_s = \frac{\omega_1}{p} = \frac{2\pi f_1}{p}. \quad (5.5)$$

Analoogiliselt

$$n_s = \frac{n_1}{p} = \frac{60f_1}{p}. \quad (5.6)$$

Alljärgnevas tabelis on toodud rida asünkroonmootorite sünkroonkiirusi n_s ja nimikiirusi n_n sõltuvalt pooluspaaride arvust p juhule, kui nimilibistus on 4% ja $f_1 = 50$ Hz. Võrgusagedusel 60 Hz on pöörlemiskiirused suuremad, näiteks $p = 1$ korral on sünkroonkiirus $n_s = 3600$ p/min.

| Kiirus, p/min | p | | | | |
|------------------|------|------|------|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 6 |
| n_s | 3000 | 1500 | 1000 | 750 | 500 |
| n_n | 2880 | 1440 | 960 | 720 | 480 |

Pooluspaaride arvu muutmine ei muuda staatorivoolu sageduse f_1 ja rootorivoolu sageduse f_2 vahekorda. Sõltumatult pooluspaaride arvust

$$f_2 = s f_1. \quad (5.7)$$

Nõrgalt koormatud asünkroonmootori korral, näiteks kui $s = 0,1\%$, on rootorivoolu sagedus väga väike: $f_2 = 0,001 \cdot 50 = 0,05$ Hz. Sellisel sagedusel on ka rootorimähise induktiivtakistus $x_2 = 2\pi f_2 L_2$ väga väike. Selle tõttu on rootori vool ja pinge praktiliselt faasis. Rootori voolu tekitatud magnetvälja suund (seda näitab magnetomotoorjõu vektor F_2) erineb siis staatori ja rootori resulteeruva magnetvälja suunast (vektor Φ , mis tekitab elektromotoorjõu ja ka voolulaine) umbes 90° (joonis 5.5).

Asünkroonmootorilt võetava koormusmomendi suurendamisel toimuvad järgmised protsessid.

1. Rootori kiirus langeb – selle tõttu suurenevad libistus ja rootorivoolu sagedus.
2. Sageduse suurenedes suureneb indutseeritud elektromotoorjõud ja järelikult kasvab ka rootorivool.
3. Rootorivoolu kasvades suureneb masina elektromagnetiline moment, mis tasakaalustab koormusmomendi kasvu.

Sageduse kasvades hakkab aga kasvama ka rootorimähise induktiivtakistus x_2 , mille tõttu rootorivoolu kasv aeglustub. Alates libistuse teatud suurusest (orienteerivalt 25%) mootori moment enam ei kasva. Seega sõltub asünkroonmootori kiirus koormusest. Nimikoormuse piirkonnas on kiiruse muutus siiski tavaliselt ainult mõne protsendi piires ja kiirus on suhteliselt lähedane staatorivälja pöörlemiskiirusele.

Pöörlev asünkroonmootor kujutab endast trafot, mille primaarmähis ja sekundaarmähis liiguvad üksteise suhtes. Selle tõttu on primaarsagedus ja sekundaarsagedus erinevad. Sealjuures on see trafo ehitatud nii, et sekundaarvool koos primaarvoolu magnetväljaga tekitab vajaliku pöördemomendi.

Ülesanne 5.1

Kolmefaasilise asünkroonmootori nimiaandmed on järgmised:

$$P_n = 7,5 \text{ kW}; U_n = 3 \cdot 400 \text{ V}; \text{ kasutegur } \eta_n = 0,85; \text{ võimsustegur } \cos \varphi = 0,89; \\ \text{nimipöörlemiskiirus } n_n = 1440 \text{ p/min}; \text{ sagedus } f = 50 \text{ Hz}.$$

Leida mootori nimilibistus s_n , rootorivoolu sagedus nimitalitluses f_{2n} , mootori nimipöördemoment T_n ja võrgust võetav vool nimitalitluses I_{1n} .

Lahendus

1. Magnetvälja pöörlemiskiirus asünkroonmootoris on

$$n_s = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{p} = \frac{3000}{p}.$$

Kui $p = 1$, siis $n_s = 3000$; kui $p = 2$, siis $n_s = 1500$ jne.

2. Kuna nimitalitluses erineb asünkroonmootori pöörlemiskiirus n_n magnetvälja pöörlemiskiirusest ainult mõne protsendi võrra, siis peab n_s olema 1500 p/min.

3. Nimitalitluses on libistus

$$s_n = \frac{n_s - n_n}{n_s} = \frac{1500 - 1440}{1500} = 0,04.$$

4. Rootorivoolu sagedus nimitalitluses on

$$f_{2n} = f \cdot s_n = 50 \cdot 0,04 = 2 \text{ Hz}.$$

5. Mootori nimipöördemoment

$$P_n = T_n \cdot \omega_n; \quad T_n = \frac{P_n}{\omega_n}; \quad \omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30};$$

$$T_n = \frac{30P_n}{\pi \cdot n_n} = \frac{30 \cdot 7500}{\pi \cdot 1440} = 49,74 \text{ Nm}.$$

6. Võrgust võetav vool

$$P_n = \sqrt{3}U \cdot I_{1n} \cos \varphi_n \cdot \eta_n;$$

$$I_{1n} = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U \cos \varphi_n \cdot \eta_n} = \frac{7500}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,89 \cdot 0,85} = 14,31 \text{ A}.$$

5.2 Asünkroonmasina staatori elektrilise tasakaalu võrrand

Staatori kolmefaasilise voolu tekitatud pöördmagnetväli indutseerib staatorimähise igas keerus vastuelektromotoorjõu

$$e' = -\frac{d\psi}{dt}. \quad (5.8)$$

kus siinuselise jaotusega pöörleva välja aheldusvoog

$$\psi = \Phi_p \sin \omega t .$$

Elektromotoorjõu (5.8) efektiivväärtus transformatoorse emj võrrandi põhjal

$$E' = 4,44f_1 \Phi_p , \quad (5.9)$$

kus Φ_p ei ole mitte voo amplituud, vaid on pöörleva magnetvoo konstantne suurus.

Staatorimähisel on aktiivtakistus ja puisteinduktiivtakistus. Staatorivool tekitab neil takistustel pingelangu. Selle pingelangu ja transformatoorse emj peab tasakaalustama võrgupinge. Staatori elektrilise tasakaalu võrrand kujuneb järgmiseks:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1(r_1 + jx_1) . \quad (5.10)$$

See ei erine põhimõtteliselt trafo primaarmähise elektrilise tasakaalu võrrandist. Toimub ju ka asünkroonmootoris energia muundamine magnetvälja vahendusel. Erinevus on vaid selles, et sisemine pingelang on suurem, sest siin on puistevoog õhupilu tõttu märksa suurem kui trafol.

5.3 Asünkroonmasina rootori elektromotoorjõud ja vool

Pöörlev magnetvoog on aheldatud rootorimähisega ja indutseerib selles elektromotoorjõu E_2 , mis on rootorivoolu I_2 põhjustajaks. Kui rootor ei pöörle ($n_2 = 0$), siis on transformatoorse elektromotoorjõu võrrandi põhjal rootorimähise ühes faasis indutseeritud elektromotoorjõud

$$E_{2n} = 4,44f_2w_2k_{w2}\Phi_p = 4,44f_1w_2k_{w2}\Phi_p ,$$

kus w_2 on ühe faasi keerdude arv ja k_{w2} mähisetegur. Seisva rootori puhul on rootorimähises indutseeritud emj sagedus $f_2 = f_1$ nagu trafoski. Lühisrootori puhul loetakse faaside arv võrdseks varraste (uurete) arvuga: $m_2 = Z_2$. Siis $w_2 = 1/2$ ning $k_{w2} = 1$, sest lühismähise jaotamine ja sammu lühendamine ei ole mõeldav.

Kui asünkroonmootori rootor pöörleb, siis sagedus $f_2 < f_1$ ja valemi (5.7) alusel

$$f_2 = \frac{pn}{60}. \quad (5.11)$$

kus pöörleva magnetvoo ja rootori suhteline kiirus on $n = n_1 - n_2$. Asetades selle seosesse (5.11), saame:

$$f_2 = \frac{p(n_1 - n_2)}{60} \cdot \frac{n_1}{n_1} = \frac{pn_1}{60} \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_1} = f_1 s$$

ja pöörleva rootori ühes faasis indutseeritud emj

$$E_2 = 4,44f_1 s w_2 k_{w2} \Phi_p = E_{2n} s. \quad (5.12)$$

Rootorimähise faasi näivtakistus

$$z_2 = \sqrt{r_2^2 + (2\pi f_2 L_2)^2},$$

kus r_2 on ühe faasi aktiivtakistus ja L_2 puisteinduktiivsus. Et $2\pi f_2 = 2\pi f_1 s = \omega s$, siis rootori faasivool

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{r_2^2 + (s\omega L_2)^2}} \quad (5.13)$$

või, asendades E_2 seosest (5.12),

$$I_2 = \frac{E_{2n} s}{\sqrt{r_2^2 + (s\omega L_2)^2}} = \frac{E_{2n}}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + (\omega L_2)^2}}.$$

Siit selgub, et rootorivool sõltub libistusest ja suureneb pöörlemiskiiruse vähenedes.

Rootori mitmefaasiline vool tekitab samuti pöördmagnetvälja, mille kiirus rootori suhtes on

$$n_{Sr} = \frac{60f_2}{p},$$

kusjuures rootor pöörleb samas suunas kiirusega n_2 . Rootori magnetvälja kiirus staatori suhtes on leitav n_S ja n_2 summana, mille alusel saame pärast teisendamist, et

$$n_{Sr} + n_2 = \frac{60f_1}{p} + n_2 = n_1 \frac{n_1 - n_2}{n_1} + n_2 = n_1. \quad (5.14)$$

Seega pöörleb asünkroonmootori rootori magnetväli sünkroonselt staatori magnetväljaga, kusjuures rootor pöörleb kiirusega $n_2 < n_1$. Staatori ja rootori magnetvälja sünkroonne pöörlemine mis tahes libistusel on iseloomulikuks tingimuseks võimsuse ülekandmisel asünkroonmootoris pöördmagnetvälja vahendusel.

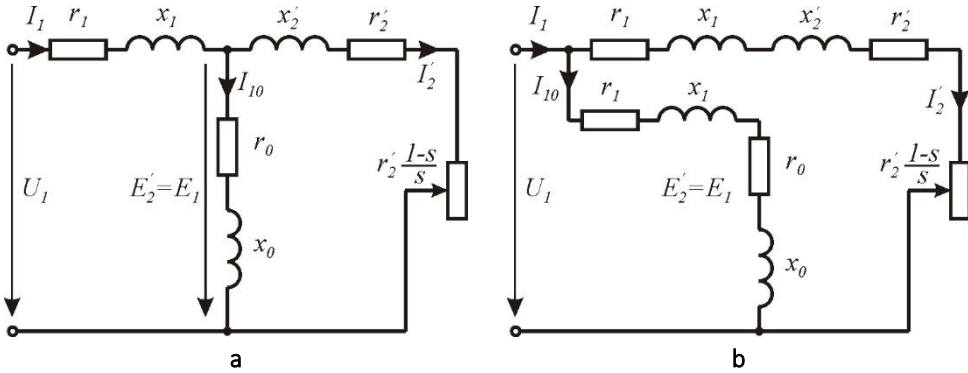
5.4 Asünkroonmootori aseskeem ja faasordiagramm

Et staatori ja rootori suuruste faasoreid saaks kujutada ühisel diagrammil, mis põhineb asünkroonmootori aseskeemil, tuleb staatorimähisele taandada ka rootorimähise parameetrid ja elektromotoorjõud. Analoogiliselt trafodele peab taandamine toimuma nii, et ei muutuks võimsused ja faasinihkenurgad.

Asünkroonmootorit elektrilisest küljest kirjeldav võrrandisüsteem kujuneb järgmiseks:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 (r_1 + jx_1) \\ 0 &= \underline{E}_2 - \underline{I}_2 \frac{r_2}{s} - \underline{I}_2 jx_2 \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}'_2 + \underline{I}_{10} \end{aligned} \right\}.$$

Sellele võrrandisüsteemile vastab joonisel 5.6 toodud aseskeem.



Joonis 5.6. Asünkroonmootori T-kujuline (a) ja Γ -kujuline (b) aseskeem

Faasordiagrammi joonestamiseks asendame rootori suurused nende taandatud väärtustega, lahutades seejuures suuruse r_2'/s kaheks osaks kujul

$$\frac{r_2'}{s} = \frac{r_2'}{s} - \frac{r_2's}{s} + r_2' = r_2' + r_2' \frac{1-s}{s}. \quad (5.15)$$

Nii saame faasordiagrammile (joonis 5.7) vastava võrrandisüsteemi:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= -\underline{E}_1 + \underline{I}_1(r_1 + jx_1) \\ -\underline{E}_2 &= \underline{I}_2'(r_2' + jx_2') + \underline{I}_2' r_2' \frac{1-s}{s} \\ \underline{I}_1 &= \underline{I}_{10} + \underline{I}_2' \end{aligned} \right\}, \quad (5.16)$$

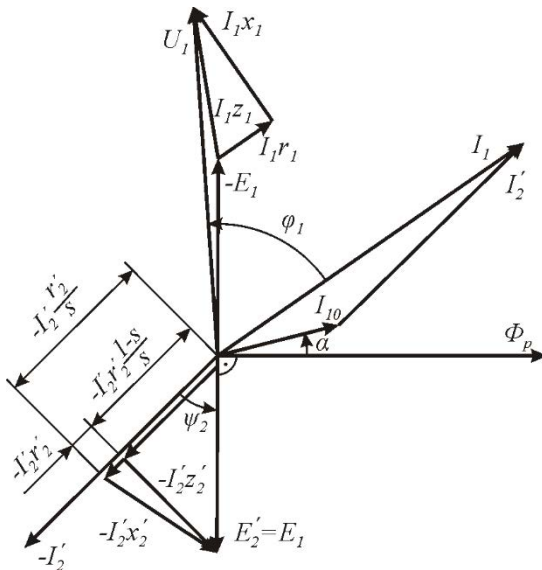
kusjuures nihkenurk emj E_2 ja rootorivoolu I_2 vahel on parameetrite kaudu leitav seosest

$$\psi_2 = \arctan \frac{x_2's}{r_2'^1}.$$

Nurk φ_1 tekib pingefaasori U_1 ja staatorivoolu I_1 vahele ning on arvutatav võimsusteguri alusel:

$$\varphi_1 = \arccos \frac{P_1}{S_1},$$

kus P_1 on asünkroonmootori poolt tarvitav aktiivvõimsus ja S_1 kogu näivvõimsus. Faasordiagrammi koostamine toimub analoogiliselt koormatud trafo faasordiagrammile. Erinevus on siin vaid selles, et rootorimähis on lühistatud ja seetõttu puudub pinge U_2 . Peale selle on aktiivne pingelang joonisel 5.7 jaotatud kahte ossa valemi (5.15) alusel, kusjuures $I_2'r_2'$ on seotud rootori vaseskaoga (soojuskadu rootorimähises), $I_2'r_2' \frac{1-s}{s}$ aga energia muundumisega mehaaniliseks energiaks.



Joonis 5.7. Asünkroonmootori faasordiagramm

T-kujulise aseskeemi saamiseks asendame esiteks süsteemi (5.16) esimeses võrrandis staatori vastuelektromotoorjõu ideaalsele tühijooksule vastava aseskeemi parameetritel tekkiva pingelanguga:

$$-E_1 = I_{10}(r_0 + jx_0),$$

kus r_0 on aseskeemi takistus, milles tühijooksuvool I_{10} tekitab teraseskaoga võrdse võimsuskao, ja induktiivtakistus x_0 on seotud pöörleva magnetvoo Φ_p reaktiivenergiaga. Teiseks, teades, et $E_2' = E_1$, asetame E_2' väärtuse esimesse võrrandisse. Nii saame joonisel 5.6 toodud aseskeemile vastava võrrandisüsteemi:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_1 &= I_1(r_1 + jx_1) + I_{10}(r_0 + jx_0) \\ \underline{U}_1 &= I_1(r_1 + jx_1) + I_2'(r_2' + jx_2') + I_2'r_2'\frac{1-s}{s} \\ I_1 &= I_{10} + I_2' \end{aligned} \right\}.$$

Muudetavat takistust $r_2'\frac{1-s}{s}$ võib vaadelda aktiivkoormusena, mis sõltub rootori pöörlemiskiirusest (libistusest). Kui näiteks rootor on paigal, st $n_2 = 0$ ($s = 1$), siis

$$r_2'\frac{1-s}{s} = 0,$$

mis vastab asünkroonmootori lühisele. Kui aga $s = 0$, siis

$$r_2'\frac{1-s}{s} = \infty,$$

mis vastab mootori tühijooksule – rootoriahel aseskeemis on katkestatud ehk $I_2' = 0$.

5.5 Asünkroonmootori võimsuste bilanss

Koormusel tarbib asünkroonmootor toitevõrgust võimsust (väljendatuna faasisuurruste kaudu)

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi, \quad (5.17)$$

millest osa kulub staatorimähises vaseskaona

$$P_{Cu1} = m_1 I_1^2 r_1. \quad (5.18)$$

Ülejäänud võimsus muundub pöördmagnetvälja võimsuseks, millest osa kulub staatori rauaskaona P_{Fe1} pöörivoolu- ja hüstereesikaoks.

Läbi õhupilu antakse pöördmagnetvälja abil rootorisse elektromagnetiline ehk õhupiluvõimsus

$$P_{em} = P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe1}, \quad (5.19)$$

mis on asünkroonmootori parameetrite kaudu avaldatav kujul

$$P_{em} = m_2 I_2^2 \frac{r_2}{s} = m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{s} = \frac{U_1^2}{\sqrt{\left(r_1 + \frac{r_2'}{s}\right)^2 + (x_1 + x_2')^2}} \cdot \frac{m_1 r_2'}{s}. \quad (5.20)$$

Osa elektromagnetilisest võimsusest kulub rootorimähises vaseskaona

$$P_{Cu2} = m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_2'^2 r_2', \quad (5.21)$$

sellest ülejäänud osa muundub aga mootori mehaaniliseks võimsuseks

$$P_{meh} = P_{em} - P_{Cu2}, \quad (5.22)$$

mis kooskõlas teisendusega (5.15) ja eeltoodud seoseid kasutades on avaldatav kujul

$$P_{meh} = m_1 I_2'^2 \frac{r_2'}{s} - m_1 I_2'^2 r_2' = m_1 I_2'^2 r_2' \frac{1-s}{s}. \quad (5.23)$$

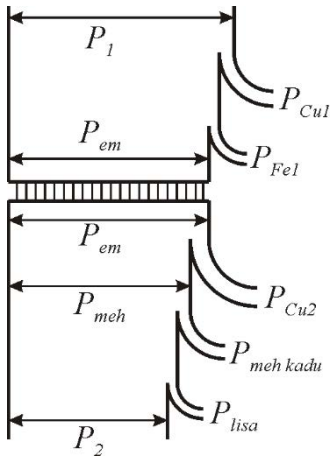
Siinjuures ei ole väiksuse tõttu arvestatud rauaskadu rootoris, sest koormusolukorras on rootorivoolu sagedus suhteliselt väike, nimelt $f_2 \approx 0,5 \dots 3$ Hz. Staatorivoolu sagedus on samal ajal 50 Hz.

Kui arvesse võtta ka mehaanilised kaod $P_{meh\ kadu}$, mille põhiliselt moodustavad kaod masina laagrites ja ventilatsioonile, ning mitmesugused lisakaod P_{lisa} , mis samuti kaetakse mehaanilisest võimsusest, saame kasuliku mehaanilise võimsuse asünkroonmootori võllil:

$$P_2 = P_{meh} - P_{meh\ kadu} - P_{lisa}. \quad (5.24)$$

Lisakaod moodustavad umbes 1% tarbitavast võimsusest P_1 .

Seosed (5.17)...(5.24) on hästi illustreeritavad joonisel 5.8 toodud võimsuste diagrammiga, mis vastab võrrandisüsteemile



$$\left. \begin{aligned} P_{em} &= P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe1} \\ P_{em} &= P_2 + P_{meh\ kadu} + P_{Cu2} + P_{lisa} \end{aligned} \right\}$$

Asünkroonmootori kasutegur on

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}$$

ehk summaarsete kadude

$$\sum P_{kadu} = P_{Cu1} + P_{Fe1} + P_{Cu2} + P_{meh\ kadu} + P_{lisa}$$

kaudu, teades, et $\sum P_{kadu} = P_1 - P_2$,

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \sum P_{kadu}}.$$

Joonis 5.8. Asünkroonmootori võimsuste diagramm

Asünkroonmootori kasutegur nimikoormusel on 70% kuni 95%, kusjuures võimsamatel mootoritel on suurem kasutegur. Asünkroonmootori nimivõimsuseks P_{2n} , mis on märgitud ka masina sildile, loetakse kasulikku võimsust võllil nimipöörlemiskiirusel n_{2n} . Kui staatorimähis on lülitatud nimipingele U_{1n} , siis tekib staatorimähises ka nimivool I_{1n} . Lisaks neile suurustele on asünkroonmootori sildile märgitud veel nimivõimsustegur $\cos\varphi_n$, nimikasutegur η_n ja staatorimähise ühendamisviis.

5.6 Asünkroonmootori pöördemoment

Rotorivoolu ja pöördmagnetvälja vastastikusel toimel tekib elektromagnetiline moment, mis on võrdeline elektromagnetilise võimsusega ja pöördvõrdeline pöörleva välja nurkkiirusega:

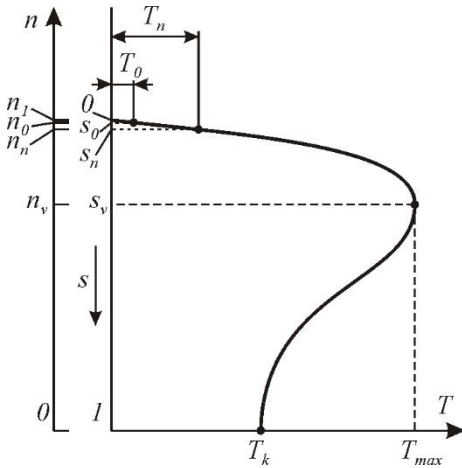
$$T = \frac{P_{em}}{\omega_1}, \quad (5.25)$$

kusjuures momendi ühikuks on Nm, kui võimsus on vattides ja nurkkiirus radiaani sekundis.

Aseskeemi parameetreid arvestades saame elektromagnetilise momendi kujul

$$T = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{R'_2}{s}}{2\pi f_1 \left[\left(r_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (x_1 + x'_2)^2 \right]} = f(s). \quad (5.26)$$

Siit selgub, et mootori elektromagnetiline moment on võrdeline pinge ruuduga. Momendi sõltuvust libistusest (5.26) või rootori pöörlemiskiirusest n_2 nimetatakse asünkroonmootori mehaaniliseks karakteristikuks. Joonisel 5.9 on see sõltuvus toodud kujul $s = f(T)$ ja $n_2 = f(T)$, kusjuures karakteristikul on rida iseloomulikke punkte.



Joonis 5.9. Asünkroonmootori mehaaniline karakteristik

ga. Selgub, et vääratustaseme libistus sõltub vaid mootori parameetritest:

$$s_v = \frac{R'_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}}. \quad (5.27)$$

Asetades selle avaldise seosesse (5.26) saame maksimaalse elektromagnetilise momendi

$$T_{\max} = \frac{m_1 p U_1}{4\pi f_1 \left[r_1 + \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2} \right]}. \quad (5.28)$$

Maksimaalse momendi ehk vääratustaseme momentide väärtus ei sõltu rootoriahela takistusest.

Pöörlemiskiiruse edasisel suurenemisel, mil libistus väheneb veelgi, moment väheneb. Nii jõuame karakteristikul (joonis 5.9) nimimomendi punkti T_n , mis vastab mootori nimivõimsusele P_n , siis on rootoril nimipöörlemiskiirus n_n ja nimilibistus s_n . Mootori koormuse vähenemisel nullini suureneb pöörlemiskiirus tühijooksu pöörlemiskiiruseni n_0 , millele vastab libistus s_0 . Siis arendab mootor vaid tühijooksumomenti T_0 , mis on seotud tühijooksumomendiga.

Selleks et mootori poolt arendatav moment oleks null (siis on null ka libistus ja rootori pöörlemiskiirus n_2 võrdub staatori magnetvälja pöörlemiskiirusega n_1), tuleb tühijooksumomendi ületamiseks rakendada abimootorit, mille energia arvel kaetakse tühijooksumomendi kaotused.

Mootori normaalse töö piirkond mehaanilisel karakteristikul on vahemikus $T_0 < T \leq T_n$. Kui $T > T_n$, siis on mootor ülekoormatud. Takistusmomendi suurenedes üle maksimaalse momendi muutub rootori pöörlemiskiirus kiiresti nulliks.

Mootori käivitamise hetkel rootor ei pöörle, $n_2=0$ ja valem (5.3) põhjal $s=1$. Seejuures arendatav käivitusmoment T_k on leitav seosest (5.26):

$$T_k = \frac{m_1 p U_1^2 R'_2}{2\pi f_1 [(r_1 + R'_2)^2 + (x_1 + x'_2)^2]}.$$

Selle momendi mõjul hakkab rootor pöörlema, kusjuures pöörlemiskiirus suureneb ja libistus väheneb. Libistusel s_v , mida nimetatakse **vääratustaseme libistuseks**, saavutab moment maksimaalse väärtuse T_{\max} . Vääratustaseme libistusele vastab pöörlemiskiirus n_v . Vääratustaseme libistus on leitav funktsiooni (5.26) esimesest tuletisest libistuse järgi selle võrdustamisel nulliga.

Maksimaalse momendi ja nimimomendi suhet nimetatakse mootori **ülekoormatavuseks**

$$\lambda_T = \frac{T_{\max}}{T_n}, \quad (5.29)$$

mis enim kasutatavatel mootoritel on nimipinge korral piirides 1,7...3,0.

5.7 Asünkroonmootorite käivitamine

Elektrimootorite käivitust iseloomustavateks suurusteks on käivitusvool, käivitusmoment, käivitusaeg ja käivituse ökonoomsus.

Lühisrootoriga asünkroonmootorite käivitusvool I_{1k} on käivitamise alghetkel ($s = 1$) nimivoolust I_{1n} suurem 4,0...7,0 korda. See suhe sõltub mootori nimivõimsusest ja nimipöörlemiskiirusest. Suhet $\lambda_I = I_{1k}/I_{1n}$ nimetatakse **käivitusvoolu kordsuseks**.

Algkäivitusmomendi T_k ($s = 1$) ja nimimomendi T_n suhet nimetatakse **käivitusmomendi kordsuseks** $\lambda_k = T_k/T_n$, mis lühisrootoriga asünkroonmootoritel ei tohi standardite kohaselt olla väiksem kui 0,7...1,8.

Käivitusmeetodi valikul tuleb lähtuda järgmistest nõuetest:

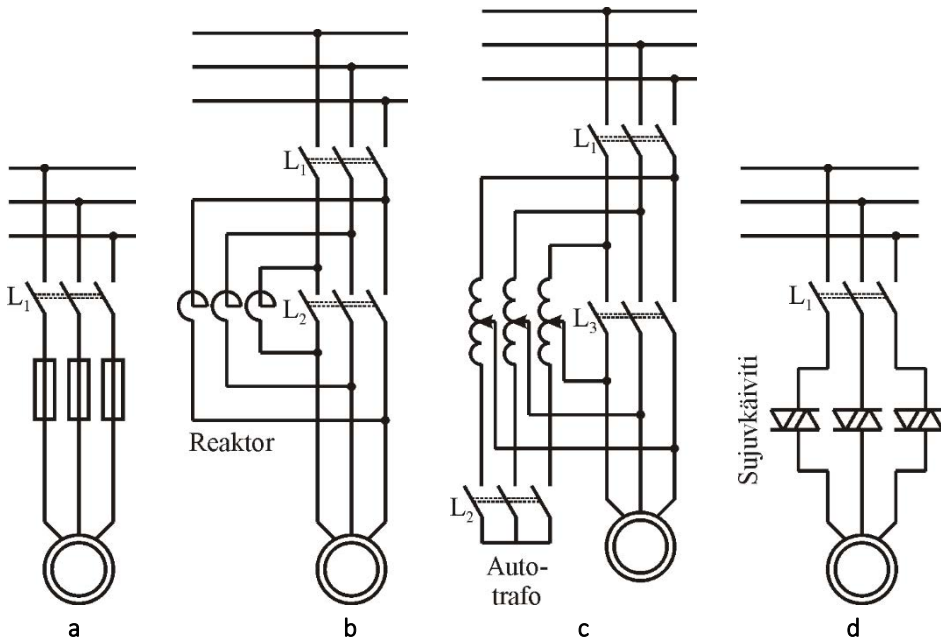
1. mootor peab käivitusel arendama töömasina takistusmomendist küllaldaselt suuremat momenti, et rootor saaks hakata pöörlema ja pöörlemiskiirus saaks suureneda nimipöörlemiskiiruseni;
2. käivitusvool peab olema piiratud suuruseni, mis ei ohusta mootorit ega häiri toitevõrgu normaalset tööd;
3. käivitusseem peab olema võimalikult lihtne – maksimaalse töökindluse ja minimaalse maksumusega.

Lühisrootoriga asünkroonmootori käivitamiseks kasutatakse mitmeid viise. Need on lülitamine otse võrku, käivitamine alandatud pingel ja käivitamine läbi sagedusmuunduri. Pinge alandamiseks kasutatakse kas mootori ette lülitatavat induktiivtakistust, autotrafot või türistoridega skeemi, mida nimetatakse sujuvkäivitiks. Käivitamisel läbi sagedusmuunduri on käivituse ajal mootorile antava pinge sagedus väiksem võrgupinge sagedusest ja ka pinge väärtus on väiksem võrgupingest. Pärast käivitust on seesama sagedusmuundur kasutatav ka pöörlemiskiiruse reguleerimiseks. Kui aga kasutatakse pinge alandamise skeeme, siis need lülitatakse pärast käivituse lõppu vooluahelast välja ja pöörlev mootor lülitatakse seejärel otse võrku.

Faasirootoriga asünkroonmootori käivitamise ajaks lülitatakse harilikult selle mootori rootoriahelasse aktiivtakistid, mis vähendavad käivitusvoolu ja suurendavad ka käivitusmomenti.

Kui mootori käivitusmoment on küllaldane ja käivitusvool ei ole mootorile ohtlik ega häiri võrgu tööd, siis kasutatakse **otse võrku lülitamisega käivitust**. Sel juhul väheneb pärast sisselülitamist tekkiv suur vool suhteliselt kiiresti. Mootor läheb töömasina koormusmomendiga määratud talitlusse, kus mootori vool on nimi-

vooluga võrdne või sellest väiksem. Otse võrku lülitamisega käivitus on selle lihtsuse tõttu levinuim meetod. Lülitusskeemis on sel juhul üksnes kolmepooluseline lüliti ja kaitsmed (joonis 5.10,a).



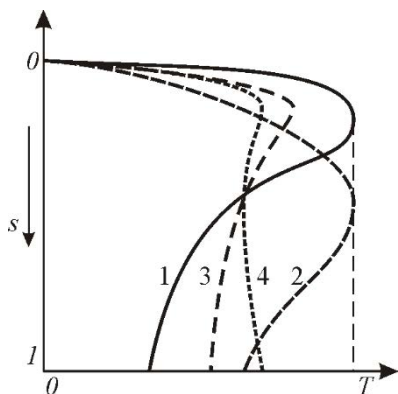
Joonis 5.10. Lühisrootoriga asünkroonmootori käivituskeeme

Käivitusaeg sõltub põhiliselt pöörlema pandavatest hoomassidest. Et käivitusvool I_{lk} on 4...7 korda nimivoolust suurem ja vaseskadu suureneb võrdeliselt voolu ruuduga, siis on maksimaalne käivitusaeg piiratud mähise isolatsioonile lubatud temperatuuriga. Ilmselt ei ole otse võrku lülitamine kasutatav väga suurte hoomassidega töömasinate korral. Teisest küljest toob käivitusel tekkiv voolutõuge kaasa pingelangu toitevõrgus. See lühiajaline pinge muutumine häirib teiste tarbijate tööd, eriti valgustust, kui valgustusseadmeid toidetakse samast võrgust. Pinge lubatud kõikumine on 10...15% nimipingest, see on teiseks piiravaks tingimuseks lühisrootoriga asünkroonmootorite käivitamisel lülitamisega otse võrku.

Tööstusettevõtetes on alajaamade ja jaotusvõrkude võimsus harilikult küllalt suur ja peaaegu alati on võimalik lühisrootoriga asünkroonmootorite käivitus lülitamisega otse võrku. Väga võimsate jaotusseadmete korral on sel moel võimalik käivitada isegi 1000...2000-kilovatise nimivõimsusega asünkroonmootoreid.

Alati aga alajaam piisavalt võimas ei ole ja mootorite käivitus võib häirida teiste tarbijate tööd. Sel juhul on üheks võimaluseks **kasutada parendatud käivitusomadustega lühisrootoriga asünkroonmootoreid**. Neil mootoritel on väiksem käivitusvoolu kordsus ($\lambda_l = 3,0 \dots 5,0$) ja suurem käivitusmomenti kordsus ($\lambda_k = 1,0 \dots 3,0$). Suurem käivitusmoment ja sellega kaasnev käivitusvoolu vähenemine on saavutatavad rootori lühismähise takistuse suurendamisega. Selle tagajärjel suureneb ka mootori nimilibistuse – mehaaniline karakteristik on pehmem.

Mähise takistuse suurendamiseks kasutatakse kas kõrgema eritakistusega vardaid või tehakse rootorile kas sügavuured või kaksikuured.



Joonis 5.11. Parendatud käivitusomadustega lühisrootoriga asünkroonmootorite mehaanilised karakteristikud

uurete erilise konstruktsiooni tõttu rootorimähise takistus kõrgem ainult käivituse ajal, kui libistus on suur. Töö ajal on rootorimähise takistus väiksem ja kasutegur parem. Rootorimähise takistus väheneb sellepärast, et töö ajal on rootorivoolu sagedus väiksem, väiksema sagedusega vool läheb ka sügavamatesse uurde osadesse ja sügavamal olevatesse jämedamatesse varrastesse.

Teine võimalus asünkroonmootorite käivitamiseks nõrgas toitevõrgus on **käivitamine madalamal pingel**. Madalamal pingel on võrgust võetav vool väiksem ja ka võrgus tekkiv pingelang on väiksem. Et aga mootori moment on võrdeline staatorimähise pinge ruuduga, siis väheneb madalamal pingel ka käivitusmoment. See asjaolu on nimetatud käivitusmooduse puuduseks. Käivitus madalal pingel on rakendatav vaid mootori tühijooksul või vähendatud koormusmomendi puhul.

Pinge alandamist võimaldavad skeemid on toodud joonisel 5.10,b,c,d. Joonisel 5.10,b toimub käivitus läbi induktiivpoolide, mida nimetatakse reaktoriteks. Reaktorite takistus vähendab pinget ja voolu. Joonisel 5.10,c toimub käivitus läbi autotrafo, mis vähendab käivituse ajal mootorile antud pinget. Samal ajal vähendab autotrafo ka võrgust võetavat voolu. Joonisel 5.10,d on näidatud käivitus läbi türistorregulaatori, mis lülitatakse mootori ette. Seda regulaatorit nimetatakse ka **sujukäivitiks**. Türistoride abil lühendatakse mootorile antavate võrgupinge perioodide kestust, mis vähendab pinget keskväärtust ja efektiivväärtust.

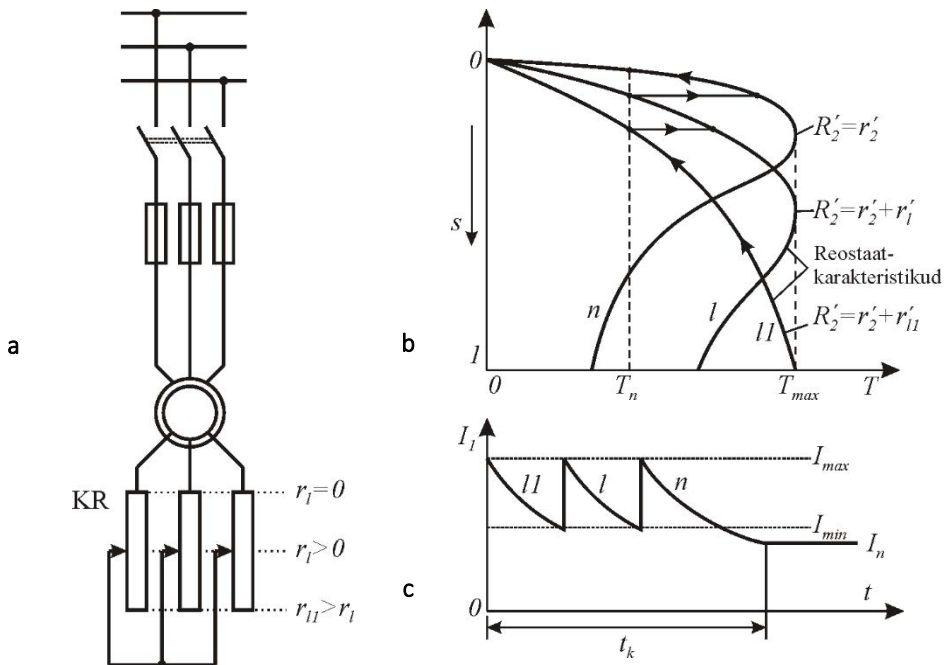
Faasrootoriga asünkroonmootoreid kasutati enne türistoride ja jõutransistoride kasutuselevõttu ja vähesel määral ka nüüd neil juhtudel, kui

- töomasina takistusmoment käivitusel on mootori käivitusmomendist suurem ja mootor ei käivitu. Kui mootor juba pöörleb, siis takistusmoment väheneb ja on mootori nimimomendist väiksem;

- tuleb piirata käivitusvoolu toitevõrgus ja lühisrootoriga asünkroonmootori kasutamine käivitamisega madaldatud pingel ei ole käivitusmomendi vähenemise tõttu rakendatav;
- mootori poolt pöörlema pandavad töömasina hoomassid ja seega ka käivitus-aeg on nii suured, et vaseskadudest tingitud temperatuuri tõus võib ohustada mähiste isolatsiooni.

Tänapäeval kasutatakse neil juhtudel faasirootoriga mootorite asemel enamasti lühisrootoriga mootorit koos sagedusmuunduriga. Vanemates seadmetes on faasirootoriga mootorid veel kasutuses.

Faasirootoriga asünkroonmootorite käivitus toimub käivitusreostaadiga joonisel 5.12,a toodud skeemi järgi. Käivitusreostaat KR on rootoriahelasse lülitatud kolme-faasiline takisti, mis on arvatud vaid lühiajaliseks tööks. Käivituse alghetkeks ($n_2 = 0$) võime käivitusreostaadi takistuse r_l valida nii, et rootoriahela ühe faasi taandatud takistus $R'_2 = r'_2 + r'_{l1}$ viib väärtuslibistuse kooskõlas valemiga (5.27) väärtuseni $s_v = 1$ (joonis 5.12,b), mis vastab momendile $T_k = T_{max}$. Samaaegselt väheneb ka vool rootoriahelas (joonis 5.12,c) ja ka toitevõrgus. Rootori pöörlemiskiiruse suurenedes vähendatakse astmeliselt käivitusreostaadi takistust – toimub üleminek reostaatkarakteristikult *ll* uuele reostaatkarakteristikule *l* ja edasi kuni väärtuseni $r_l = 0$, mil rootoriahel on lühistatud. Siis $R'_2 = r'_2$ ja seega oleme üle läinud loomulikule mehaanilisele karakteristikule *n*. Vool on samuti käivitusaja t_k lõpuks saavutanud nimiväärtuse I_n (joonis 5.12,c).



Joonis 5.12. Faasirootoriga asünkroonmootori käivitus skeem (a), käivituskarakteristikud (b) ja staatorivoolu muutumine käivitusel (c)

Käivitusreostaadi astmete arv ja nende takistuse suurus valitakse momendi või voolu tingimuse järgi. Kui piiravaks tingimuseks on näiteks vool toitevõrgus, siis antakse ette maksimaalne lubatav vool I_{\max} (joonis 5.12,c) ja optimaalse käivitusaja järgi $I_{\min} > I_n$, mille alusel arvutatakse vajalikud takistused r_l .

5.8 Asünkroonmootorite pöörlemiskiiruse muutmine

Asünkroonmootori rootori pöörlemiskiirust on võimalik muuta lähtudes valemist

$$n = \frac{60f_1}{p} (1 - s).$$

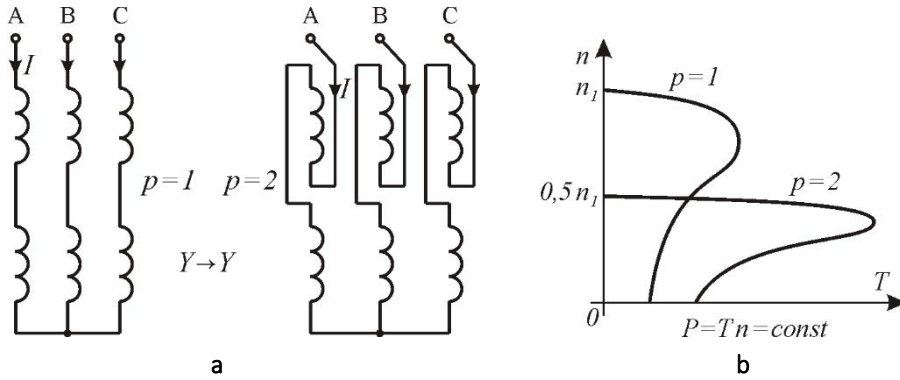
See valem näitab, et pöörlemiskiirus muutub toitevoolu sageduse f_1 , pooluspaaride arvu p või libistuse s muutumise korral.

Libistust saab muuta lisatakistuse lülitamiseega rootoriahelasse. See on võimalik ainult faasirootoriga asünkroonmootorite korral. Sealjuures pöörlemiskiirus väheneb lisatakistuse suurendamisel üksnes koormatud mootori korral. Tühijooksul lisatakistus pöörlemiskiirust ei muuda. Mehaanilised karakteristikud lisatakistuse kasutamise korral on sarnased joonisel 5.12,b toodud käivituse reostaatkarakteristikutega. Kiiruse muutmisel peavad lisatakistused olema aga arvutatud pidevaks tööks – käivitusreostaati selleks otstarbeks kasutada ei saa. Libistuse suurenemisel suureneb rootorivool, sellega aga ka rootori vaseskadu. Lisaks sellele tekivad energiakaod lisatakistites, mille tulemusena mootori kasutegur väheneb. Energeetilisest seisukohast lähtudes on pöörlemiskiiruse selline muutmine ebamajanduslik. Arvestades eeltoodud asjaolusid muudeti faasirootoriga asünkroonmootori kiirust ainult nimikiirusest allapoole piirides $n_n \dots 0,7n_n$. Tänapäeval libistuse muutmiseega reguleerimist üldiselt enam ei kasutata.

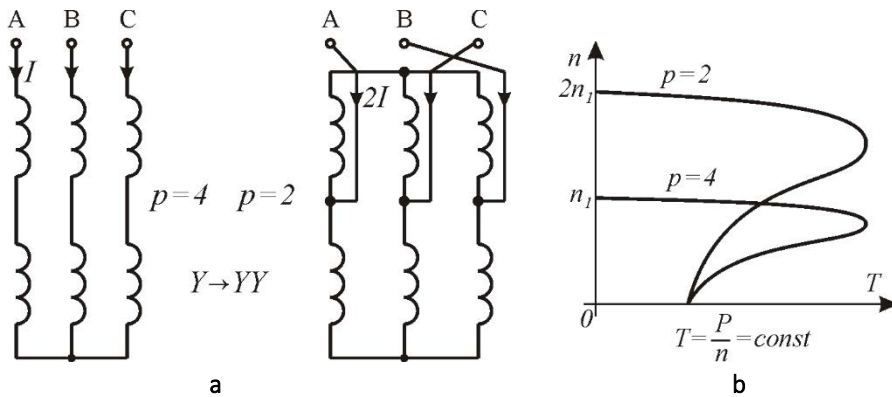
On võimalik ka lühisrootoriga asünkroonmootorite pöörlemiskiiruse astmeline muutmine pooluspaaride arvu p muutmise teel. Pooluspaaride arvu saab muuta staatorimähise sektsioonide vastava ümberlülitamisega. Mitmekiiruselistest mootoritest on enim levinud kahekiiruselised mootorid, kusjuures üleminek teisele sünkroonkiirusele võib toimuda konstantsel võimsusel või konstantsel momendil.

Pooligruppide ümberlülitamisega tähtühendusest tähtühendusse vastavalt joonisel 5.13,a toodud skeemile saab pooluspaaride arvu suurendada kaks korda, mille tulemusena pöörlemiskiirus väheneb kaks korda. Et vool sellise ümberlülitamise tulemusena ei muutu, jääb ka võimsus samaks ja järelikult suureneb moment kaks korda. Pooluspaaride arvule vastavad mehaanilised karakteristikud on esitatud joonisel 5.13,b.

Pooligruppide ümberlülitamisel tähtühendusest kahekordsesse tähtühendusse (joonis 5.14,a) väheneb pooluspaaride arv kaks korda, mille tulemusena pöörlemiskiirus suureneb kaks korda. Toitevool, seega ka võimsus, suurenevad samuti kaks korda. Järelikult mootori moment ei muutu. Pooluspaaride arvule vastavad mehaanilised karakteristikud on joonisel 5.14,b.



Joonis 5.13. Asünkroonmootori kiiruse muutmise konstantsel võimsusel

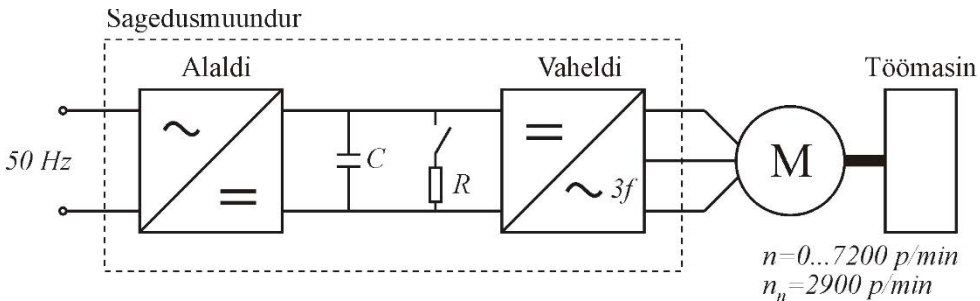


Joonis 5.14. Asünkroonmootori kiiruse muutmise konstantsel momendil

Pöörlemiskiiruse reguleerimine staatoripinge sageduse muutmisega

Staatoripinge sageduse f_1 muutmise võimaldab lühisrootoriga asünkroonmootori pöörlemiskiirust sujuvalt muuta suhteliselt suurtes piirides. Sageduse sujuv muutmise on võimalik **sagedusmuunduri** abil. Tänapäeval on sagedusmuundurite kasutamine põhiline asünkroonmootori pöörlemiskiiruse reguleerimise viis.

Tavaliselt toidetakse sagedusmuundurit kas ühefaasilisest või kolmefaasilisest vahelduvpinge võrgust. Sagedusmuunduri esimene aste on **alaldi**, kus 50 Hz või 60 Hz vahelduvpinge alaldatakse (joonis 5.15).



Joonis 5.15. Sagedusmuunduri lihtsustatud skeem

Sagedusmuunduri teine aste on **vaheldi**, mis muudab alalispinge muudetava sagedusega kolmefaasiliseks vahelduvpingeks. Vaheldi väljundisse lülitatakse tavaliselt kolmefaasiline asünkroonmootor, mille nimisagedus on võrdne võrgusagedusega ja nimipinge on võrdne võrgu nimipingega. Asünkroonmootori võlliga on ühendatud mingi töömasin, mille tööd sagedusmuunduri abil juhitakse. Mootor võib üldjuhul töötada nii mootoritalitluses kui ka generaatoritalitluses.

Sagedusmuunduri alaldi ja vaheldi vahelist ühendust nimetatakse **alalisvoolu vahelüliks**. Alalisvoolu vahelüli sisaldab tavaliselt ka suure mahtuvusega kondensaatorit (kondensaator C joonisel 5.15), mis pulseeriva alaldatud pinge ära silub. See toimub mootoritalitluses. Kui aga mootor töötab generaatoritalitluses (näiteks töömasina pidurdamisel), siis liigub energia töömasinalt mootori kaudu vaheldisse, mis hakkab tööle alaldina. Alaldina töötavast vaheldist läheb siis vool alalisvoolu vahelülisse ja hakkab seal tõstma silumiskondensaatori pinget. Energia äraviimiseks silumiskondensaatorist peab siis esimeses astmes olev alaldi hakkama tööle vaheldina ja viima töömasinalt tuleva energia võrku. See tähendab aga, et sagedusmuunduri esimene aste peaks olema kahesuunalise energiavooga alalisvoolu-vahelduvvoolu muundur. Selline muundur on kallis ja seda kasutatakse suhteliselt harva. Sageli kasutatakse esimeses astmes siiski odavat dioodalaldit, mille kaudu energia võrku tagasi minna ei saa.

Et dioodalaldit kasutades ei saaks alalisvoolu vahelüli kondensaatori pinge liiga kõrgeks minna, kasutatakse aktiivtakistit (takisti R joonisel 5.15), mis pinge liigsel kõrgenemisel kondensaatoriga rööbiti ühendatakse (tavaliselt relee kontakti abil). Töömasina pidurdamisel tekkiv energia muundub selles takistis soojuseks. Selline lahendus on otstarbekas juhtudel, kus töömasinalt palju energiat tagasi ei tule.

Sagedusmuundur reguleerib sagedust nii võrgusagedusest allapoole (50 hertsist mõne hertsini) kui ka ülespoole. Ülemine piir on tavaliselt 2,5-kordne nimisagedus, mis on 125 Hz. Sageduse ülemisel piiril saavutavad mootorid umbes 2,5-kordse nimiikiiruse. Mootorid on nii ehitatud, et nad seda kiirust veel välja kannatavad.

Nimisagedusel antakse mootorile nimipinge ja masina õhupilus tekib pöörlev magnetvoog Φ_p , mille väärtuse saab leida asünkroonmasina elektromotoorjõu avaldisest

$$\Phi_p = \frac{U_1}{f_1} \cdot 4,44w_1k_{w1}, \quad (5.30)$$

kus U_1 – staatoripinge;

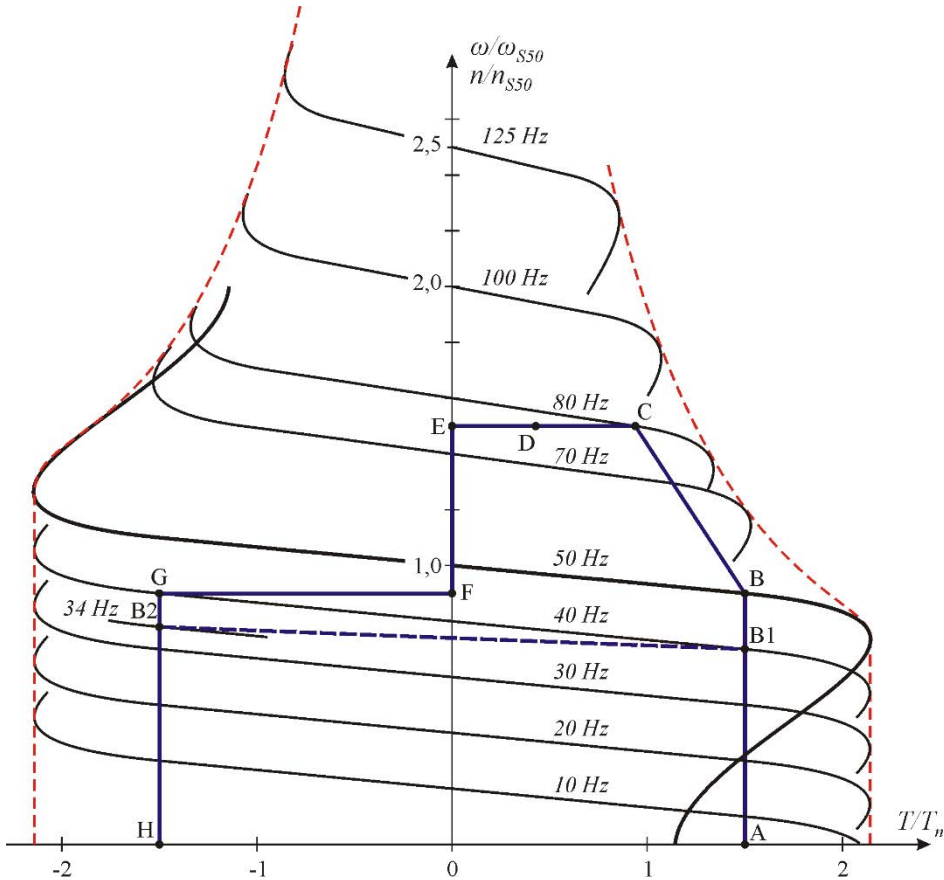
f_1 – staatoripinge sagedus;

w_1 – staatorimähise faasi keerdude arv;

k_{w1} – staatorimähise mähisetegur.

Magnetvoo Φ_p suuruse kasv kiiruse reguleerimisel ei ole soovitatav, sest see põhjustaks magnetahela küllastuse ja tühijooksuvoolu olulise suurenemise. Selleks et sageduse f_1 vähenemisel alla nimisageduse magnetvoog Φ_p ei suureneks, tuleb suhe U_1/f_1 hoida konstantne. See on võimalik, kui me sageduse langetamisel lange-tame sama palju ka pinget.

Eeltoodud põhjusel hoitakse nimisagedusest allpool magnetvoog konstantne ja selle tõttu on mootori maksimaalne pöördemoment siis samuti konstantne. Seda on näidatud joonisel 5.16 toodud erineva sagedusega mehaanilistel karakteristikutel.



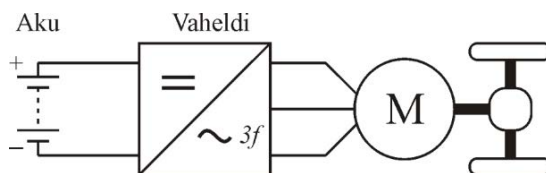
Joonis 5.16. Asünkroonmasina mehaanilised karakteristikud sagedusreguleerimisel

Moment ja kiirused on joonisel näidatud suhteliste suurustena nimimomendi ja nimisünkroonkiiruse suhtes. Positiivne moment vastab mootoritalitlusele ja negatiivne generaatoritalitlusele. Kui me reguleerimisel hoiame momendi konstantse ja kiirust vähendame, siis väheneb võimsus koos kiirusega.

Kiiruse reguleerimisel üle nimikiiruse tõstetakse sagedust üle nimisageduse (üle 50 Hz). Valemist (5.30) on näha, et sageduse f_1 suurenemisel magnetvoog Φ_p väheneb ja magnetahela küllastumise ohtu ei ole. Seepärast sageduse tõstmisel üle nimisageduse tavaliselt pinget ei tõsteta. Φ_p vähenemise tõttu hakkab aga siis vähenema masina maksimaalne pöördemoment. Sellega tavaliselt lepitakse ja suurematel kiirustel kujunevad mehaanilised karakteristikud sellisteks, nagu need on näidatud joonisel 5.16. Kiirustel üle nimikiiruse võimsus ei vähene, sest samavõrra kui moment väheneb, kasvab kiirus ja nende korrutis ei muutu.

Kasutatakse ka sagedusmuundureid, kus sageduse tõstmisel üle nimisageduse tõstetakse ka pinget üle nimipinge, nii et moment ei vähene. Sel juhul tõuseb koos sagedusega ka võimsus ja nimikiirusest suurematel kiirustel võime hoida mootori võimsuse pidevalt nimivõimsusest suuremana. Pinge tõstmine üle nimipinge on aga sagedusmuunduri ehitamise seisukohalt väga tülikas ja teeb selle muunduri kalliks.

Kui energiaallikana kasutada alalisvoolu allikat (näiteks elektriauto akut), siis ei ole sagedusmuunduri esimeses astmes alaldit vaja (joonis 5.17).



Joonis 5.17. Elektriauto asünkroonmootoriga ajam

Alaldi asendamisel akuga asünkroonmootori sagedusreguleerimine põhimõtteliselt ei muutu. Vaatame sagedusmuunduri tööd erinevates talitlustes elektriauto liikumise näitel. Kui on vaja jõuda ühest punktist teise ja teel pole ootamatuid takistusi, siis võib elektriauto veoajami töös üldjuhul eristada viit erinevat etappi, mis on kujutatud joonisel 5.18.

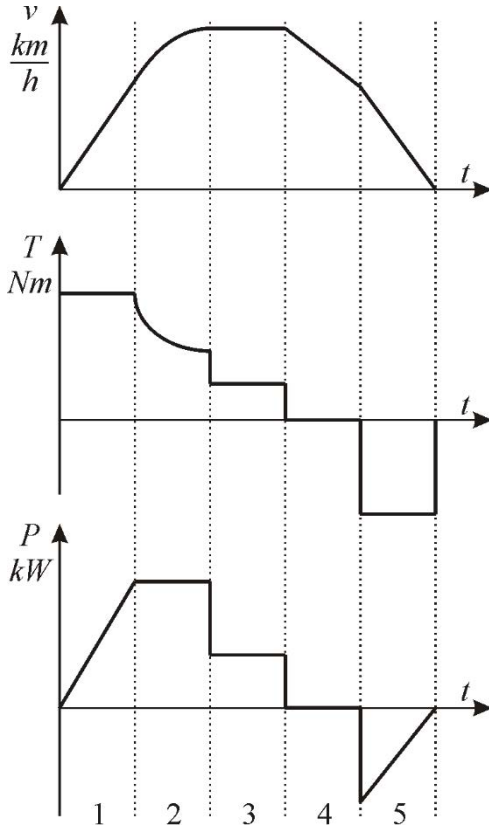
Auto kiirust, mis on võrdeline mootori pöörlemiskiirusega, mootori momenti ja võimsust on näidatud aegsõltuvustena. Joonisel on kujutatud viis etappi: käivitus ja kiirendus konstantsel momendil, kiirendus konstantsel võimsusel, sõit püsikiirusel, liikumine väljalülitatud mootoriga ja pidurdamine nullkiiruseni. Vaatleme neid etappe koos joonisel 5.16 toodud asünkroonmootori mehaaniliste karakteristikutega.

1. etapp. Liikumine algab paigalseisust. Veomootorile rakendatakse muunduri kaudu konstantne moment. Konstantne moment tekitab konstantse veojõu. Veojõud kutsub esile liiklusvahendi kiirenduse. Kiirenduse suurus on võrdeline rakendatud jõuga ja pöördvõrdeline liiklusvahendi massiga. Kiirenduse käigus kasvab liiklusvahendi kiirus ja veoajami mootori pöörlemiskiirus. Koos asünkroonmootori pöörlemiskiiruse tõusuga suurenevad muunduri poolt mootorile antava voolu sagedus ja pinge. Esimesel etapil tõuseb sagedus kuni nimisageduseni. Joonisel 5.16 vastab esimesele etapile lõik AB, kus moment on 1,5-kordne nimimoment ja muunduri sagedus tõuseb 50 hertsini.

2. etapp. Teisel etapil tõuseb sagedusmuunduri sagedus üle nimisageduse ja samaaegselt hakkab moment langema, sest pinget enam ei tõsteta. Mootori võimsus püsib konstantsena. Joonisel 5.16 vastab sellele etapile lõik BC. Sagedus tõuseb 80 hertsini.

3. etapp. Kolmandal etapil auto kiirus enam ei muutu. See on võimalik, kui mootori moment tasakaalustab liikumistakistuse poolt tekitatud vastumomendi. Liikumistakistuse moment ei muutu ühtlasel horisontaalsel teel. Mootori poolt arendatav moment langeb üleminekul teiselt etapilt kolmandale hüppeliselt (üleminek punktist

C punkti D joonisel 5.16), sest autot enam ei kiirendata. Kolmandale etapile vastab joonisel 5.16 punkt D, kus moment, kiirus ja võimsus on konstantsed.



Joonis 5.18. Elektriauto kiiruse, mootori momendi ja võimsuse tüüpiline muutus teekonnal ühest punktist teise horisontaalsel ühtlasel teel

Pidurdamisel hoitakse moment konstantne ja sagedusmuunduri sagedust langetatakse. Sellele vastab lõik GH joonisel 5.16.

Tegelikul sõidul võib ette tulla ootamatuid takistusi ja on vaja pidurdada. Näiteks on kiiruse ülevõtmisel (etapp 1) jõutud mehaanilisel karakteristikul punkti B1 ja seejärel on vaja kiirendav moment vahetada pidurdusmomendi vastu. Selleks alandatakse sagedust 40 hertsilt 34 hertsile ja jõutakse punkti B2.

Autojuhid siiski otseselt sageduse reguleerimisega ei tegele. Neil on kasutada kiiruse ja piduri pedaalid. Sageduse valib sagedusmuunduri juhtskeemis olev programm vastavalt mootori pöörlemiskiirusele, muunduri sagedusele ja pedaalide asendile. Enamik sagedusmuundureid valmistatakse programmeeritava juhtskeemiga ja nad sobivad erineva nimipöörlemiskiirusega ja võimsusega (teatud piirides) mootoritele, mis võivad täita erinevaid ülesandeid.

4. etapp. Veojam lülitatakse välja. Mootori moment muutub nulliks (lõik DE joonisel 5.16). Liiklusvahend liigub edasi inertsil ja kiirus langeb (lõik EF).

Sageduse valib sagedusmuunduri juhtskeemis olev programm vastavalt mootori pöörlemiskiirusele, muunduri sagedusele ja pedaalide asendile. Enamik sagedusmuundureid valmistatakse programmeeritava juhtskeemiga ja nad sobivad erineva nimipöörlemiskiirusega ja erineva võimsusega (teatud piirides) mootoritele, mis võivad täita erinevaid ülesandeid.

5. etapp on pidurdus. Pidurdust kasutatakse ettenähtud sihtkohas peatumiseks. Momendi suund pidurdamisel on vastupidine käivitusmomendi suunale. Pidurdusmomendi tekkele vastab lõik FG joonisel 5.16, kus moment punktis G on negatiivne. Vajalik pidurdusmoment tekib, kui sagedusmuundur viib sageduse 40 hertsile. Pidurdamisel töötab veomootor generaatoritalitluses. Generaatorist tulev energia läheb läbi sagedusmuunduri akusse (joonis 5.17).

6 SÜNKROONMASINAD

Esimeses peatükis me tutvusime sünkroonmootorite konstruktsiooni ja tööpõhimõttega, staatori poolt tekitatava pöörleva magnetväljaga ja rootoril olevate poolustega. Ja ka sellega, et rootor pöörleb staatori väljaga sünkroonselt. Nüüd vaatleme sünkroonmasinaid laiemalt. Sealhulgas sünkroonmasinate kasutamist nii generaatorina kui ka mootorina, sünkroonmasina võimsusteguri reguleerimist ja sünkroonmasina momenti.

6.1 Sünkroonmasina otstarve

Elektrienergia tootmisel soojus- ja hüdroelektrijaamades kasutatakse põhiliselt sünkroongeneraatoreid. Energiasüsteem hõlmab paljusid elektrijaamu, mistõttu kõik selle süsteemi generaatorid peavad omama konstantse sagedusega (50 Hz) pinget. Iga generaatori sagedus sõltub tema pöörlemiskiirusest n (p/min) ja pooluspaaride arvust p :

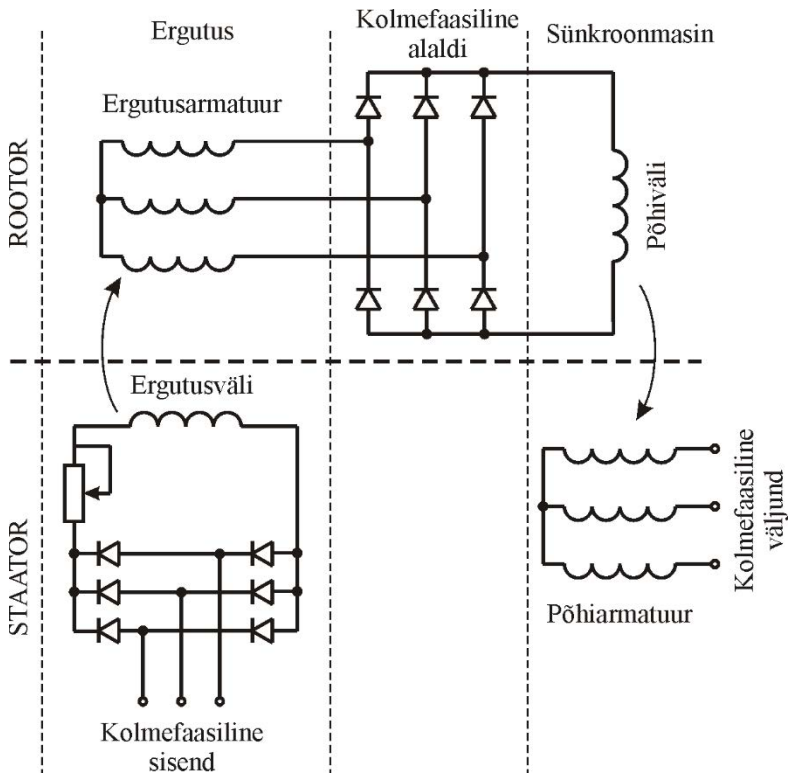
$$f = \frac{pn}{60}. \quad (6.1)$$

Sünkroongeneraatori rootori paneb pöörlema **primaarne jõuallikas**, tavaliselt auru- või hüdroturbiin. Standardse sageduse 50 Hz saamiseks peab valemi (6.1) alusel olema täidetud tingimus $pn = 3000$. Seega peab ühe pooluspaariga generaatori rootori pöörlemiskiirus olema 3000 p/min, kahe pooluspaari puhul 1500 p/min jne. Kõik ühte energiasüsteemi ühendatud generaatorid peavad pinget välja andma samas faasis. Nad peavad pöörlema sünkroonselt.

Erinevatel turbiinidel on erinev optimaalne pöörlemiskiirus, mistõttu ehitatakse erineva pooluspaaride arvuga ja seega ka erineva konstruktsiooniga sünkroongeneraatoreid. Sõltuvalt jõuallikast liigitatakse sünkroongeneraatoreid **turbo-** ja **hüdrogeneraatoriteks**. Mõlema konstruktsiooni puhul on staatori- ehk ankrumähis (seda nimetatakse ka armatuuriks) sarnane asünkroonmootori staatorimähisega – see on kolmeefaasiline jaotatud mähis. Sünkroonmasina rootor ehk induktor kujutab endast elektromagnetit, mille ergutusmähist toidetakse alalisvooluga, tavaliselt alalisvoolugeneraatorist ehk **ergutist**, mis asub generaatoriga samal võllil. Erguti võimsus on 1...2% sünkroongeneraatori nimivõimsusest.

Tänapäeval tekitatakse sünkroongeneraatori ergutuseks vajalik alalisvool alaldiga, mis asub masina rootoril ja vähese töökindlusega harju pole vaja. Harjadeta ergutuse skeem on joonisel 6.1. Alaldi saab voolu väikesest kolmeefaasilisest generaatorist (ergutusgeneraatorist), mis on pöördkonstruktsiooniga sünkroonmasin. Ergutusgeneraatori kolmeefaasiline mähis on põhigeneraatoriga samal võllil ja see on sarnane faasirootoriga asünkroonmasina rootorimähisega. Selle mähise klemmid ühendatakse alaldiga, mis on samuti sellel võllil. Alaldatud ergutusgeneraatori vool antakse põhigeneraatori pooluste mähistele. Ergutusgeneraatori enda poolused on paigal ja saavad voolu väikesest paigalseisvast alaldist, millele tuleb pinge välisest toiteallikast.

Ergutusgeneraatori ergutusvoolu suurust saab reguleerida reostaadiga. See reguleerimine muudab ergutusgeneraatori pinget ja sellega ka suure generaatori ergutusvoolu ja elektromotoorjõudu.



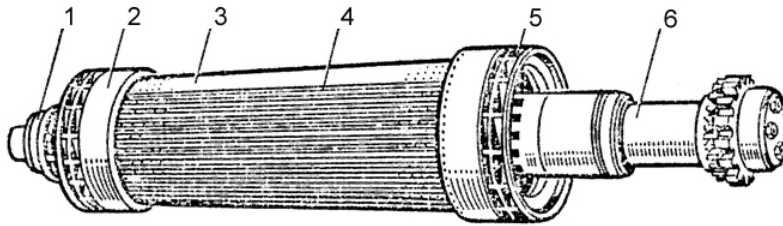
Joonis 6.1. Harjadeta ergutuse skeem, kus erguti, alaldi ja generaator on ühel võllil

Hüdroturbiinide pöörete arv on 50...750 p/min, mis nõuab vastavalt 60...4 pooluspaari olemasolu sünkroongeneraatoril. Suhteliselt suure pooluste arvu puhul on otstarbekohane valmistada rootor väljepoolustega, nagu on skemaatiliselt näidatud joonisel 1.12,a, kus pooluspaaride arv $p = 2$. Väljepoolustega sünkroongeneraatoreid nimetatakse ka hüdrogeneraatoriteks.

Auruturbiinide pöörlemiskiirus on tavaliselt 3000 p/min, seega peab sünkroongeneraatoril olema üks pooluspaar. Arvestades rootorite keskmist läbimõõtu, ulatub rootori pinna punkti joonkiirus sellise pöörlemiskiiruse juures kuni 170 m/s. Mehaanilise tugevuse seisukohast lähtudes ei ole sel juhul võimalik kasutada väljepooluseid.

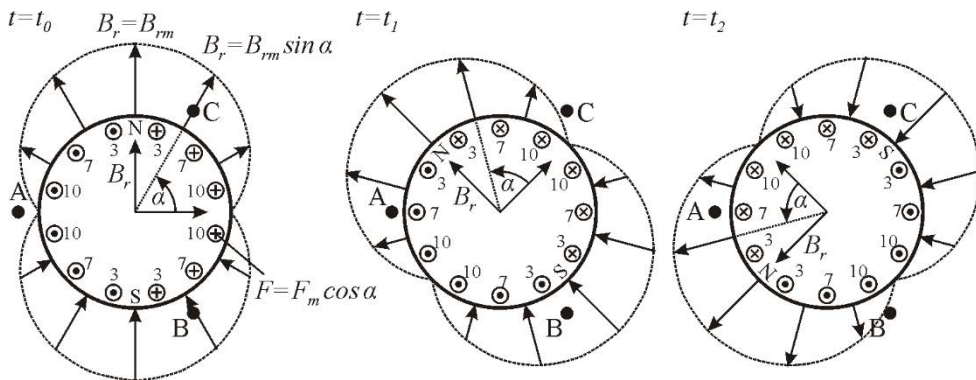
Rootoriks on siin terassilinder (joonis 6.2), millel on peitpoolused (rootori ristlõige on näha joonisel 1.12,b). Ergutusmähis asub rootori uures. Peitpoolustega sünkroongeneraatoreid nimetatakse ka turbogeneraatoriteks.

Kui primaarseks jõuallikaks on diiselmootor pöörlemiskiirusega 500...1500 p/min, siis kõneldakse ka diisलगeneraatorist, mis ehitatakse väljepoolustega ($p = 6...2$).



Joonis 6.2. Peitpoolustega rootor: 1 – kontaktrõngad; 2 – bandaaž; 3 – rootori massiivne magnetahel; 4 – rootori uuret kattev mittemagnetiline kiil; 5 – tsentrifugaalventilaator; 6 – turbiiniga sidestatud võlli ots

Sünkroongeneraatori töötamisõhimõtte lähtub elektromagnetilise induksiooni nähtusest. Rotori poolustes ergutusvoolu poolt tekitatud magnetvoog, mis on aheldatud kolmeafaasilise staatorimähisega, indutseerib rootori pöörlemisel staatorimähises kolmeafaasilise elektromotoorjõu. Selleks, et indutseeritaks siinuspinge, peab rootori magnetvoo tihedus B_r muutuma piki rootori übermõõtu siinusseaduse järgi (joonis 6.3).

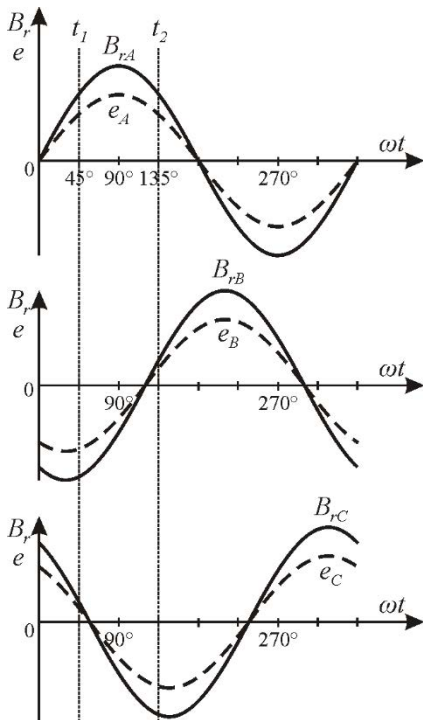


Joonis 6.3. Vajalik vootiheduse jaotus piki rootori pinda on siinuseline, selleks peab magnetimisergutus jaotuma koosinusseaduse järgi. Koos rootoriga ruumis pöörleva magnetvälja siinuslaine iseloomustamiseks kasutatakse vootiheduse ruumivektorit B_r , mille suund ühtib põhjapooluselt väljuva magnetvälja siinuslaine amplituudi suunaga

Antud juhul on vootihedus ligikaudu võrdeline magnetimisergutusega. Vootiheduse siinuselise jaotuse saamiseks peab magnetimisergutus F (magnetimisergutus on võrdne keerdude arvu ja voolutugevuse korrutisega) jaotuma piki übermõõtu koosinusseaduse järgi. Seda saab teha näiteks uuretesse paigutatud poolide keerdude arvu muutmisega (kolmest keerust kuni kümne keeruni joonisel 6.3). Teine võimalus on muuta uurdesammu, nagu on näha joonisel 1.12,b. Väljepoolustega rootori puhul saavutatakse siinuseline jaotus sel teel, et õhupilu on konstruktiivse pooluse otsa (seda nimetatakse **poolusekingaks**) keskosas väiksem ja äärtel suurem (joonis 1.12,a). Suuremal õhupilul on magnetiline takistus suurem ja seda läbib vähem jõujooni. Tegelik vootiheduse jaotus vähesel määral siiski erineb siinusest, mis põhjustab ka generaatori pingekõvera väikese moonutuse.

Siinuslainekujulise jaotusega magnetväli lõikub pöörlemisel staatorimähise juhtmetega. Selle tõttu indutseeritakse staatori kõikides uuretes olevates mähisetraatides **siinuseline elektromotoorjõud**. Eri uuretes asuvate mähisetraatide elektromotoorjõud ei ole ühes ja samas faasis. Joonisel 6.3 on näidatud kolme eri uurede mähiste asukohad (punktid A, B ja C). Need punktid on omavahel nihutatud $1/3$ täispöörde ehk 120° võrra. Joonisel 6.4 on näidatud nii nendes punktides tekkiv vootiheduse muutumine ajas kui ka indutseeritud elektromotoorjõud e_A , e_B ja e_C . Paneme tähele, et

- pöörleva siinusvälja puhul on vootihedus ja elektromotoorjõud ühes ja samas faasis;
- kahe pooluse korral langeb eri uurete juhtmete elektromotoorjõudude ajaline faasinihe **elektrilistes kraadides** kokku vastavate uurete ruumis paiknemise nihkega **pöördenurga kraadides**.



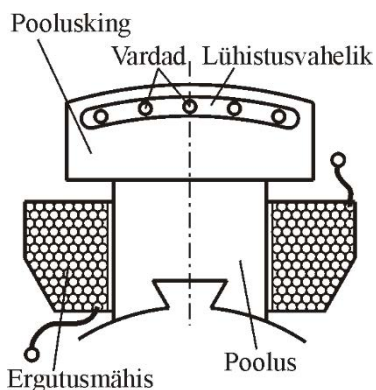
Joonis 6.4. Siinuselise vootiheduse jaotusega rootori pöörlemisel staatori punktides A, B ja C tekkivad vootiheduse muutumised ja nendes punktides paiknevates staatorimähiste osades indutseeritud elektromotoorjõudude muutumine ajas

Vootihedus ja elektromotoorjõud joonisel 6.4 on faasis sellepärast, et ruumis liikuva välja poolt indutseeritud elektromotoorjõud on leitav avaldisest $E = Blv$ (vt punkt 1.10.1). Rõhutame, et siin on olukord, kus muutumatu suurusega väli liigub ruumis. Seda ei tohiks segi ajada olukorraga, kus magnetvoog muutub ajas. Rootori magnetvoog ei muutu ajas. Ajas muutuv magnetvoog ja tema poolt indutseeritud pinge on faasis 90° nihutatud (Faraday seadus $e = d\Phi/dt$), aga siin ei ole tegemist selle juhtumiga. Kui me vaatleme mingit masina staatoril olevat punkti (näiteks punkti A joonisel 6.3), siis selles punktis on magnetvoo tihedus eri ajamomentidel küll erinev, kuid Faraday seadust siin siiski rakendada ei saa, sest

magnetvoo tihedus ei sõltu ajast, vaid rootori asendist selle punkti suhtes. Magnetvoog saab ajas muutuda ainult siis, kui ruumi viiakse või ruumist võetakse magnetvälja energiat. Ergutusvoolu aga ei muudeta ja rootori magnetvälja energia on konstantne.

Pöörleva magnetvoo siinuslaine iseloomustamiseks kasutatakse **vootiheduse ruumivektorit** B_r , mille suund ühtib põhjapooluselt väljuva magnetvälja siinuslaine amplituudi suunaga ja mille moodul on võrdne selle amplituudiga.

Kui staatorimähise klemmidele on ühendatud kolmefaasiline tarbija, siis põhjustab indutseeritud emj selles voolu. Nii muundatakse primaarjõuallika (turbiini) mehaaniline energia elektromagnetilise induktsiooni teel elektrienergiaks.



Joonis 6.5. Sünkroonmootori käivitismähis

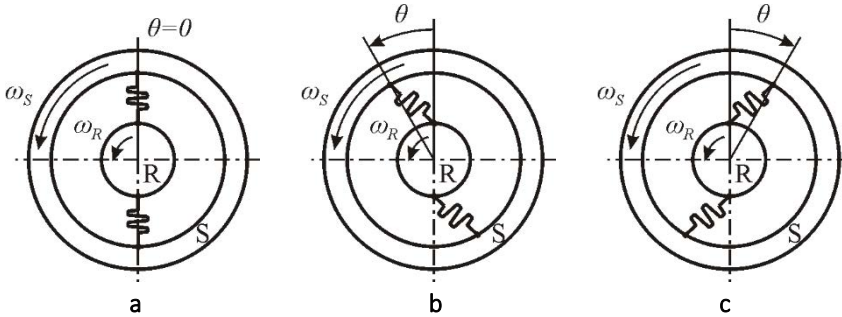
Sünkroonmasinad on kasutatavad ka mootorina. Sünkroonmootoritel on väljepoolustega rootor. Nende nimivõimsus on 40...750 kW ning pöörlemiskiirus 125...1000 p/min. Generaatoriga võrreldes on nende iseärasuseks käivitusmähise olemasolu. Käivitusmähis (joonis 6.5) on pooluskinga uurdeis asetsev lühismähis, mis koosneb varrastest ja neid lühistavatest ühendustest. Käivitamisel indutseeritakse lühismähises vool, mis tekitab pöördemomendi nii nagu asünkroonmasinas. Sünkroonkiirusele lähedase kiiruse saavutamisel lülitatakse sisse vool ergutuspoolidesse ja masin hakkab tööle sünkroonmootorina.

Sünkroonmootoreid kasutatakse seal, kus on vajalik konstantne pöörlemiskiirus ja suhteliselt väike käivitusagedus. Sünkroonmootori käivitus on põhimõtteliselt keerukam kui asünkroonmootoril. Kui konstantne pöörlemiskiirus ei ole seadme töös oluliseks tingimuseks ja lülitussagedus on väike, siis on otstarbekohane eelistada sünkroonmootorit ka sellepärast, et üleergutatud (suure ergutusvooluga) sünkroonmootor tarbib toitevõrgust lisaks aktiivenergiale mahtvuslikku reaktiivenergiat, olles seega ühtlasi induktiivse reaktiivenergia kompenseerijaks toitevõrgus. Seepärast kasutataksegi suurte ventilaatorite, tsentrifugaalpumpade, kompressorite jne mootoritena just sünkroonmootoreid.

Energiasüsteemis kasutatakse võimsusteguri parendamiseks **sünkroonkompensaatoreid**, mis on tühijooksul töötavad üleergutatud sünkroonmootorid ja mis tarbivad praktiliselt vaid mahtvuslikku reaktiivenergiat. Mahtvusliku reaktiivenergia tarbimist võib vaadelda induktiivse reaktiivenergia tootmisena. Viimast aga vajavad induktiivsed tarbijad, sealhulgas asünkroonmootorid. Et sünkroonkompensaatori võllil puudub koormus, võib masina mehaaniline konstruktsioon olla nõrgem kui analoogilisel sünkroonmootoril.

Sünkroonmasina käitumist koormamisel selgitab joonisel 6.6 toodud mehaaniline mudel, kus rõngas S ja silinder R pöörlevad konstantse nurkkiirusega $\omega_S = \omega_R$ samas

suunas ja on omavahel seotud vedruga (elastne side). Rõngas S vastab staatori ja silinder R rootori magnetväljale. Nende väljade vastastikust toimet selgitatakse vedru abil.



Joonis 6.6. Sünkroonmasina koormusnurga tekke selgitamiseks

Asendis a, kui $\theta = 0$, ei toimu energia ülekandmist vedru kaudu rõngalt silindrile ega vastupidi. Olukord sarnaneb sünkroonmasina tühijooksule. Asendis b on rõngas S mingi nurga θ võrra silindrist R ees, kusjuures $\omega_S = \omega_R$. Siis toimub energia ülekandmine vedru kaudu rõngalt silindrile. Olukord on samasugune kui sünkroonmootori korral, kus energia kantakse üle staatorilt rootorile pöördmagnetvälja kaudu. Asendis c on silinder R nurga θ võrra rõngast S ees. Ka siin $\omega_S = \omega_R$ ja energia ülekandmine toimub silindril rõngale. Olukord vastab sünkroongeneraatorile, kus magnetvälja vahendusel (elastne side) muundatakse rootori mehaaniline energia staatorimähises elektrienergiaks.

6.2 Sünkroongeneraatori pingete tasakaal

Staatorimähise iga keerd on aheldatud rootori magnetvooga, mis tühijooksul muutub vahemikus $\pm\Phi$. Vahelduvvoolu poolperioodi vältel on ühes keerus indutseeritud elektromotoorjõu keskväärts

$$E'_k = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} e \, dt, \quad (6.2)$$

millest, asendades $e \, dt = -d\Phi$, saame

$$E'_k = \frac{2}{T} \int_{+\Phi}^{-\Phi} d\Phi = \frac{4}{T} \Phi = 4f\Phi. \quad (6.3)$$

Siinuselise elektromotoorjõu korral on efektiivväärus keskväärtsusest 1,11 korda suurem ($k_k = 1,11$). Seega on ühe keeru eelektromotoorjõu efektiivväärtus

$$E' = E'_k k_k = 4,44f\Phi \quad (6.4)$$

ja staatorimähise ühes faasis indutseeritud elektromotoorjõud, kui jadamisi on ühendatud w keerdu, on

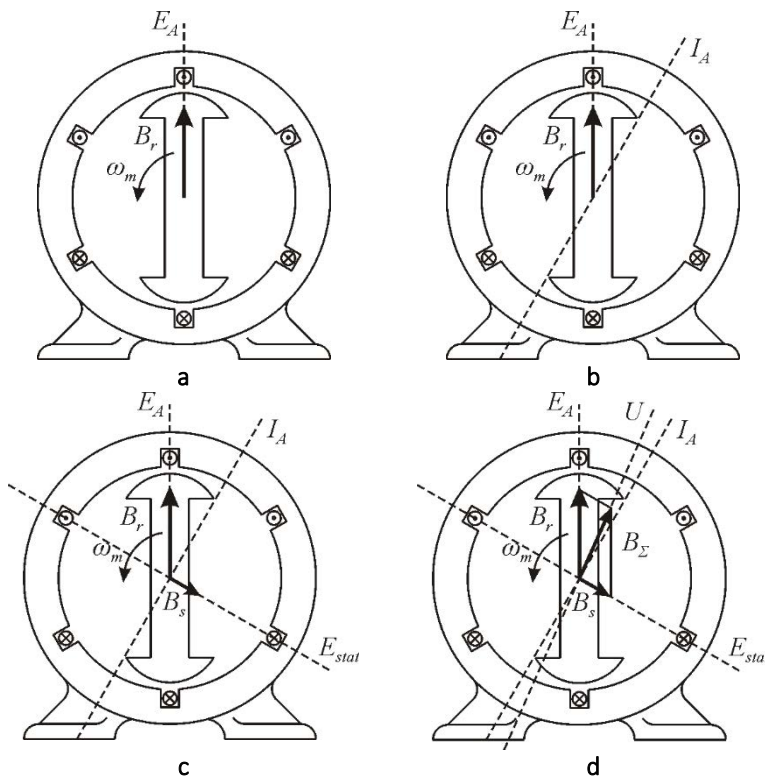
$$E = 4,44fwk_w\Phi. \quad (6.5)$$

Mähisetegur k_w arvestab siin mähisekeeru elektromotoorjõu E_k' vähenemist, mis on tingitud mähisekeerdude paigutuse erinevustest ruumis.

Pooluse magnetvoo Φ tekitab ergutusvool I_e , st $\Phi = f(I_e)$. Sõltuvust $E = f(I_e)$ nimetatakse sünkroongeneraatori tühijooksukarakteristikuks (vt joonis 6.9,a), mis on samaaegselt ka masina magneetimiskõver.

Generaatori koormamisel ei ole vool staatorimähises null ja siis tekitab kolme-faasiline staatorivool I samuti pöördmagnetvälja, mis liigub sünkroonselt rootori magnetväljaga. Masina resulteeriv magnetväli, mis on põhjustatud rootori ja staatori magneetimisergutustest, erineb tühijooksu magnetväljast. Staatori (ankur) magnetvälja mõju rootori magnetväljale nimetatakse **ankrureaktsiooniks**.

Faasi elektromotoorjõud E ja faasi väljundpinge U on ühesugused vaid siis, kui staatoris puudub vool. Staatorivool tekitab aga E ja U vahel erinevuse, kuna moonutab õhupilus olevat magnetvälja (ankrureaktsioon) ja põhjustab pingelangu nii staatorimähise induktiiv- kui ka aktiivtakistusel. Ankrureaktsiooni mõju on harilikult kõige suurem. Ankrureaktsiooni teket on selgitatud joonisel 6.7.



Joonis 6.7. a – rootori pöörlev magnetväli B_r tekitab emj E_A ; b – generaatori klemmidele ühendatud aktiivinduktiivkoormusel tekib mahajääva faasinurgaga vool; c – staatori vool tekitab omaenda magnetvälja B_s , mis tekitab omaenda emj E_{stat} masina staatorimähises; d – väli B_s liitub väljaga B_r ja tekib summa B_Σ , emj E_{stat} ja emj E_A liituvad ja tekib väljundpinge U

Kahepooluseline rootor pöörleb kolmefaasilise staatori sees. Joonisel 6.7,a ei ole staatoriga ühendatud koormust. Rootori magnetväli B_r tekitab elektromotoorjõu E_A , mille tippväärtus langeb kokku B_r suunaga. Pinge ülemistes mähise juhtmetes on suunatud joonise pinnalt väljapoole ja alumistes juhtmetes sissepoole. Kui generaatoril ei ole koormust, siis ei ole ka ankruvoolu ja E_A on võrdne väljundpingega U .

Nüüd eeldame, et generaator on ühendatud aktiivinduktiivkoormusega ja voolu faas jääb pinge faasist maha. See on näidatud joonisel 6.7,b. Staatorimähistes voolav vool tekitab magnetvälja, mille tähiseks on B_s . Magnetväli B_s tekitab omakorda elektromotoorjõu, mille tähiseks on E_{stat} .

Faasimähises tekib seega kaks elektromotoorjõudu – rootori elektromotoorjõud E_A ja ankrureaktsiooni elektromotoorjõud E_{stat} . Nende summa on väljundpinge, $U = E_A + E_{stat}$. Summaarne magnetväli B_Σ on staatori ja rootori magnetväljade summa: $B_\Sigma = B_s + B_r$.

Ankrureaktsiooni elektromotoorjõudu võib sünkroonmasina ühe faasi aseskeemis arvesse võtta fiktiivse induktiivtakistusena X , mille suurus on selline, et kui seda takistust läbib faasi vool I_A , siis tekib sellel pingelang, mis on võrdne ankrureaktsiooni elektromotoorjõuga: $E_{stat} = -jX \cdot I_A$.

Lisaks ankrureaktsioonile tuleb arvestada ka staatorimähise aktiiv- ja induktiivtakistust. Kui staatori induktiivtakistus on X_A ja aktiivtakistus R_A , siis kujuneb väljundpinge U avaldiseks

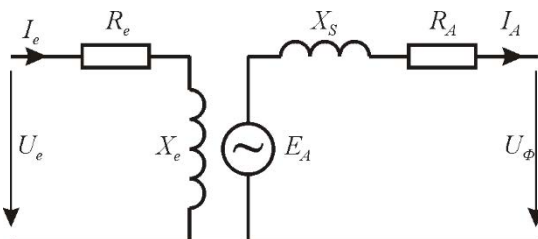
$$U = E_A - jXI_A - jX_A I_A - R_A I_A. \quad (6.6)$$

Tavaliselt ankrureaktsiooni fiktiivne induktiivtakistus X ja ankrumähise induktiivtakistus X_A liidetakse ja seda summat nimetatakse masina sünkroonreaktantsiks $X_S = X + X_A$.

Sel juhul kujuneb väljundpinge avaldis järgmiseks:

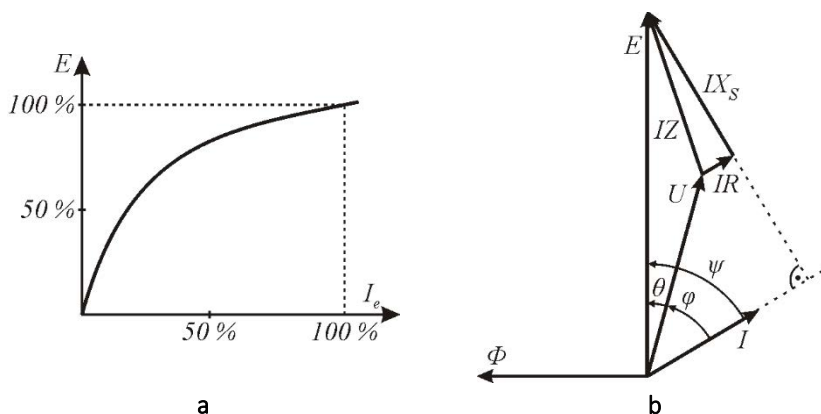
$$U = E_A - jX_S I_A - R_A I_A. \quad (6.7)$$

Selle valemi alusel saab koostada asünkroonmasina ühe faasi aseskeemi, mis on näidatud joonisel 6.8. Ergutusahelat kujutavad ergutuspoolide induktiivtakistus X_e ja aktiivtakistus R_e , mis koosneb mähise aktiivtakistusest ja ergutusvoolu regulaatori takistusest. Ergutusahelat toidetakse alalispingega. Ergutusvoolu reguleerimisel muutub masina elektromotoorjõud E_A . Selle elektromotoorjõu allikaga on jadamisi sünkroonne induktiivtakistus ehk sünkroonreaktants X_S ja ankrumähise aktiivtakistus R_A .



Joonis 6.8. Sünkroongeneraatori ühe faasi aseskeem

Sünkroonmasina tühijooksupinge sõltuvus ergutusvoolust on toodud joonisel 6.9,a ja selle masina faasordiagramm joonisel 6.9,b. Nurk θ elektromotoorjõu E ja pinge U vahel on koormusnurk. Tühijooksul on see nurk võrdne nulliga ning E ja U on võrdsed. Nurk φ pinge U ja voolu I vahel on koormusvoolu faasinihkenurk. Koormusel tekkiva masinasisese pingelangu aktiivkomponendi IR faasor on rööpne voolu I faasoriga ja selle pingelangu induktiivkomponent IX_S on risti voolu I faasoriga.



Joonis 6.9. Sünkroongeneraatori tühijooksukarakteristik (a) ja faasordiagramm (b)

6.3 Sünkroonmasina moment

Sünkroonmasina elektromagnetiline võimsus avaldub kujul

$$P_{em} = 3EU \frac{\sin \theta}{X_S}. \quad (6.8)$$

Elektromagnetiline moment

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega}, \quad (6.9)$$

kus rootori pöörlemise nurkkiirus

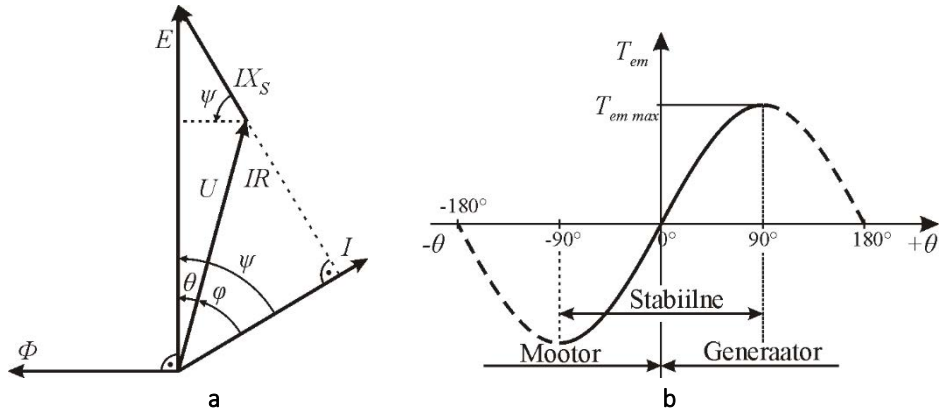
$$\Omega = \frac{2\pi f}{p} = \frac{\omega}{p}, \quad (6.10)$$

mille asendamisel seosesse (6.9) ja arvestades elektromagnetilise võimsuse avaldist (6.8), saame:

$$T_{em} = \frac{3p EU}{\omega X_S} \sin \theta. \quad (6.11)$$

Sõltuvust $T_{em} = f(\theta)$ nimetatakse sünkroonmasina nurkkarakteristikuks (joonis 6.10,b), kus nurgale $+\theta$ vastab sünkroonmasina generaatoritalitus ja nurgale $-\theta$ mootoritalitus. Piirides $-90^\circ < \theta < +90^\circ$ on sünkroonmasina töö stabiilne, kusjuures stabiilsuse piiridel ongi tegemist maksimaalse elektromagnetilise momendiga:

$$T_{em \max} = \pm \frac{3p EU}{\omega X_S}. \quad (6.12)$$



Joonis 6.10. Sünkroonmasina lihtsustatud faasordiagramm (a) ja nurkkarakteristik (b)

Ülesanne 6.1

Sünkroonmootori nimivõimsus on 500 kW, kasutegur $\eta = 0,95$, nimikoormusnurk $\theta_n = 24^\circ$ ja pöörlemiskiirus on 1000 p/min. Leida mootori poolt arendatav võimsus, võrgust võetav võimsus ja koormusnurk, kui koormusmoment on 3500 Nm.

Lahendus

1. Mootori poolt arendatav võimsus on

$$\begin{aligned} P_{meh} &= \omega T = (\pi/30)nT = (\pi/30) \cdot 1000 \cdot 3500 \\ &= 366519 \text{ W} = 366,52 \text{ kW}. \end{aligned}$$

2. Võrgust võetav võimsus on

$$P_{el} = P_{meh}/\eta = 366,92/0,95 = 385,81 \text{ kW}.$$

3. Mootori nimimoment on

$$T_n = P_n/\omega_n = 500000/(\pi/30) \cdot 1000 = 4774,65 \text{ Nm}.$$

4. Koormusnurk koormusmomendil 3500 Nm on

$$\theta = \arcsin(T \sin \theta_n/T_n) = \arcsin(3500 \sin 24^\circ/4774,65) = 17,35^\circ,$$

sest (6.12) põhjal on moment võrdeline koormusnurga siinusega.

6.4 Sünkroonmootori tüübid ja omadused

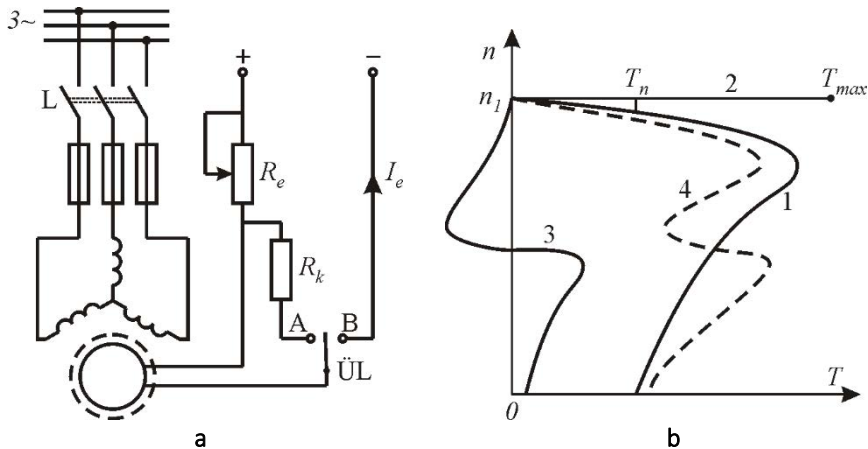
Klassikaline sünkroonmootor on kolmefaasilise staatorimähisega ja elektromagnetpoolustega, mille voolu saab reguleerida (**elektriline ergutus**). Sellised mootorid on tavaliselt suure võimsusega.

Sünkroonmasinate rootoritel ei pea ilmtingimata olema elektromagnetid, võivad olla ka püsिमagnetid. Sellise konstruktsiooniga on **püsिमagnetergutusega sünk-**

roonmasinad. Võimalik on ka selline rootor, kus magneteid ei olegi, aga õhupilu magnetiline takistus ehk reluktants on piki ümbermõõtu muutuv. Sellise rootoriga masinaid nimetatakse **sünkroonreluktantsmasinateks**.

6.4.1 Klassikaline elektrilise ergutusega sünkroonmootor

Selle mootori käivitamiseks on pooluskingades käivitumähis (vt joonis 6.5), mis võimaldab nn asünkroonset käivitust. Asünkroonse käivituse põhimõtteskeem on joonisel 6.11,a.



Joonis 6.11. Sünkroonmootori käivituskeem (a) ja mehaanilised karakteristikud (b)

Liinilülitiga L lülitatakse staatorimähis kolmefaasilisele pingele. Seejuures on ergutusmähis ühendatud käivitustakistiga R_k , ümberlülitil ÜL on asendis A. Staatori pöördmagnetväli indutseerib käivitumähises voolu, mille tulemusena tekib pöörde-moment samal põhimõttel kui asünkroonmootoris. Rotori pöörlemiskiirus hakkab suurenema vastavalt mehaanilisele karakteristikule joonisel 6.11,b. Kui rootori kiirus jõuab sünkroonkiiruse lähedale, lülitatakse ümberlülitil ÜL abil sisse ergutus-vool I_e (asend B) ja mootor tõmbub sünkronismi. Hüppeliselt toimub üleminek sünkroonmootori mehaanilisele karakteristikule 2. Et käivitumähis pöörleb nüüd sünkroonselt staatori magnetväljaga (libistus staatorivälja suhtes $s = 0$), siis ei indutseerita selles elektromotoorjõudu ja vool käivitumähises on null. Kui aga töomasina takistusmoment läheb suuremaks momendist T_{max} , siis langeb mootor sünkronismist välja ja satume uuesti asünkroonsele karakteristikule 1.

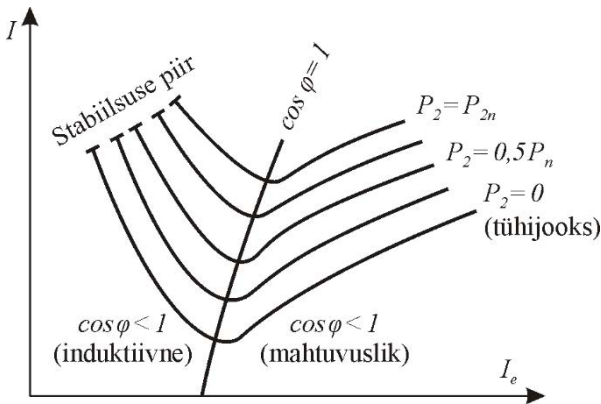
Käivitustakistus R_k valitakse 10...15 korda suurem ergutusmähise takistusest, sest ei ole mõeldav jätta ergutusmähist käivituse ajal lihtsalt avatuks ega ka lühistada. Ergutusmähise keerdude arv on suhteliselt suur ja seetõttu indutseerib staatori pöördvälja käivitusel (libistus muutub siis vahemikus $1 \geq s > 0$) ergutusmähises suure elektromotoorjõu, mis avatud ergutusmähise korral võib põhjustada isolat-siooni läbilöögi. Läbilööki ei toimuks, kui ergutusmähise otsad lühistada. Siis aga tekib ergutusmähises suhteliselt suur vool, mis koos pöördväljaga põhjustab parasiitmomendi (kõver 3 joonisel 6.11,b). Et ergutusmähis ei ole kolmefaasiline,

siis muudab pariitmoment märki poolel pöördvälja kiirusel, mille tulemusena resulteeriv mehaaniline karakteristik 4 (joonis 6.11,b) lubab saavutada käivitusel vaid umbes poolt nimikiirust. Sellisel kiirusel aga sünkronismi tõmbumist ei toimu. Mõlema tingimuse üheaegseks rahuldamiseks on sobiv valida vahepealne olukord – sillata ergutusmähis käivitusel takistiga R_k . Siis ei ole käivitusmähis ei avatud ega ka lühistatud.

Kui staatorimähise otse võrku lülitamine ei ole võimalik samaladsetel põhjustel, nagu on kirjeldatud punktis 5.7 asünkroonmasinate korral, siis tuleb kasutada samu käivitusmeetodeid nagu lühisrootoriga asünkroonmootorite puhul.

Sünkroonmootori ergutusvoolu I_e muutmiseks on ergutusahelas ergutusreostaat R_e (joonis 6.11,a).

Koos ergutusvooluga muutub ka vool I staatorimähises. Sõltuvus $I=f(I_e)$, mis on saadud tingimisel $U=U_n = \text{const}$ ja $P_2 = \text{const}$, muutub joonisel 6.12 toodud V-kõverate järgi.



Joonis 6.12. Sünkroonmootori V-kujulised kõverad

Väiksema kasuliku võimsuse P_2 korral on ka staatorivool väiksem. Väikestel ergutusvoolu väärtustel on $\cos \varphi < 1$ ja reaktiivvõimsus on induktiivse iseloomuga. Staatorivoolu faas on pinge faasist ajaliselt järel nagu asünkroonmootoriski. Ergutusvoolu suurenemisel aga staatorivool väheneb voolu reaktiivkomponendi vähenemise arvel, kusjuures teatud ergutusvoolu puhul on vool pingega faasis, omades seejuures minimaalset väärtust. Ergutusvoolu edasisel suurendamisel hakkab suurenema ka staatorivool, kusjuures nüüd tarbib mootor võrgust mahtvuslikku reaktiivvõimsust – üleergutatud sünkroonmootor toimib $\cos \varphi$ kompensatorina. Kui võimsus võllil $P_2 = 0$, siis ongi tegemist sünkroonkompensatoriga, mis tarbib üleergutatuna võrgust põhiliselt mahtvuslikku reaktiivvõimsust. Staatorivool on pingest ees nurga φ võrra.

6.4.2 Püsimagnetitega sünkroonmootorid

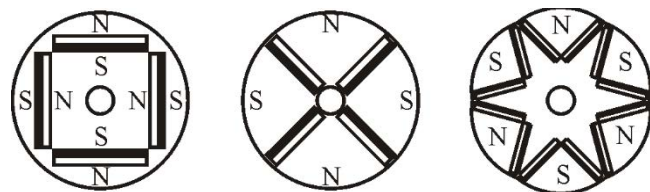
Kui sünkroonmasina rootoril olevad elektromagnetpoolused asendada püsimagnetitega, siis konstruktsioon lihtsustub. Pöörlevasse rootoris ei ole vaja viia ergutusvoolu.

Püsिमagnetid võib paigutada rootori pinnale (joonis 6.13), kuid võib paigutada ka rootori sisse selleks tehtud süvenditesse (joonis 6.14).

Rootori pinnale püsिमagnetid kas liimitakse või kinnitatakse mittemagnetilise vöö abil (näiteks roostevabast terasest vöö). Pinnale paigutamisel kulub püsिमagnetmaterjali vähem kui süvistamisel ja rootori valmistamine on sel juhul ka odavam. Pinnale paigutatud püsिमagnetitega rootoreid kasutatakse kõige rohkem.



Joonis 6.13. Sünkroonmasina rootor, kus püsिमagnetid on paigutatud välispinnale



Joonis 6.14. Sünkroonmasina rootor, kus püsिमagnetid on süvistatud

Süvistatud püsिमagnetitega rootorid on kallimad, kuid paremate omadustega. Süvistatud magnetite kasutamisel on lihtne saada õhupilus suuremaid väljatugevusi (1 tesla). Sellega kasvab masina moment ja võimsus. Suureneb ka töökindlus, sest magnetite purunemise või demagneetumise oht on väiksem. Ka on välja jaotus pooluse pinnal parem kui rootori pinnale paigutatud magnetite korral. Sellega väheneb momendi pulsatsioon ja müra.

Võrreldes elektrilise ergutusega on püsिमagnetergutuse eeliseks lihtsam konstruktsioon ja ergutusvooluga seotud kadude puudumine. Püsिमagnetite kasutamisel ei ole vaja juhtida ergutusvoolu pöörlevasse rootorisse, mis on üsnagi tülikas. Samuti puudub vajadus ergutusvooluallika järele. Lihtsama konstruktsiooni tõttu kasutatakse püsिमagnetergutusega masinaid ka nii väikestel võimsustel, kus elektrilise ergutusega masinaid enam ei kasutata.

Püsिमagnetergutuse puuduseks on see, et ergutusvälja ei saa reguleerida. Selle tõttu ei ole võimalik reguleerida masina võimsustegurit nagu elektrilisel ergutusel ja generaatori korral puudub ka väljundpinge reguleerimise võimalus. Kuna ergutusvälja ei ole võimalik välja lülitada, siis ei ole püsिमagnetergutusega sünkroonmootorite käivitamine otse võrku lülitamisega üldiselt võimalik. Staatori pöörlev magnetväli ei suuda suure inertsiga rootorit hetkeliselt haarata ja koormusnurk läheb üle 180 kraadi. Sellega tekib käivitusmomendi asemel pidurdusmoment (vt joonis 6.10,b) ja rootor hakkab maksimaalse momendiga edasi-tagasi vibreerima. Lühistatud rootorimähise kasutamine tagab käivituse küll elektrilise ergutuse korral, kuid püsिमagnetergutuse korral kahjuks mitte. Püsिमagnetergutusega sünkroon-

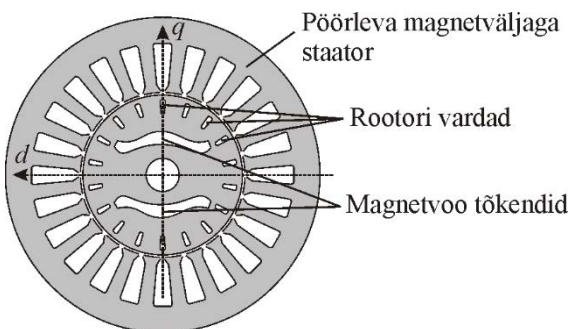
mootorite käivitamiseks tuleb kasutada sagedusmuundurit. Kui pöörlemiskiirust on vaja reguleerida, ei ole see puuduseks. Muidu aga on.

Kui võrrelda püsिमagnetitega sünkroonmootoreid asünkroonmootoritega, siis neil on kõrgem kasutegur. Asünkroonmootori rootorimähises on suhteliselt suured kaod, mida püsिमagnetitega sünkroonmootoril ei ole. See püsिमagnetitega sünkroonmootori eelis tuleb ilmsiks siiski ainult siis, kui mõlema mootori pöörlemiskiirust on vaja reguleerida ja nad töötavad läbi sagedusmuunduri. Kui vajalik on vaid üks püsikiirus, siis on asünkroonmootoriga ajami kasutegur kõrgem, sest asünkroonmasin sel juhul sagedusmuundurit ei vaja. Püsिमagnetitega sünkroonmootoril on ka siis vaja sagedusmuundurit, sest muidu ei saa teda võrku lülitada. Ja selle sagedusmuunduri kaod viivad alla üldise kasuteguri.

6.4.3 Sünkroonreluktantsmootorid

Esimeses peatükis me vaatlesime reluktants-sammumootoreid (joonis 1.15), mille staatoril olid mähistega väljepoolused ja mille mähistesse mineva voolu juhtimisega lülitati nende pooluste magnetvälja sisse ja välja. Nüüd vaatleme reluktantsmootoreid, mille staatoril tekitatakse kolmefaasilise mähise abil pöörlev magnetväli (staator on sarnane asünkroonmasina ja sünkroonmasina staatoriga). Selle masina rootor on aga kujundatud selliselt, et tema magnetiline takistus ehk reluktants (rootorit läbivale magnetvoole) sõltub suunast.

See reluktants on d -telje suunas (joonis 6.15) väiksem ja d -teljega risti oleva q -telje suunas suurem. Mida suurem on nende reluktantside erinevus, seda suuremat momenti mootor suudab arendada. Selleks, et takistus magnetvoole oleks q -telje suunas suurem, on rootorit moodustava teraslehtede paketi kõikidesse lehtedesse lõigatud kaks pilu, mida nimetatakse magnetvoo tõkenditeks (barjäärideks). Magnetvoog peab q -telje suunas liikudes läbima kahte laia õhupilu ja sellepärast on selles suunas magnetiline takistus suurem, kui d -telje suunas, kus magnetvoo tõkendeid ei ole.



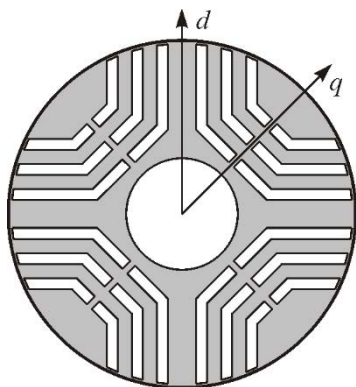
Joonis 6.15. Ühe pooluspaariga sünkroonreluktantsmootori ristlõige

Lisaks magnetvoo tõkenditele on rootoril ka uurded lühismähise varraste jaoks. Lühismähis on sarnane asünkroonmootori lühismähisega. Käivitamisel indutseeritakse pöörleva magnetvälja poolt rootori varrastes elektromotoorjõud, tekib vool ja mootori käivitusmoment. See on asünkroonne käivitus. Mootori kiiruse kasvades libistus ja asünkroonne moment vähenevad ja lõpuks tõmbub rootor reluktants-

momendi tõttu sünkronismi. Rootor hakkab liikuma sünkroonselt pöörleva magnetväljaga. Reluktantsmoment tekib siis, kui staatori pöörleva magnetvoo suuna ja pöörleva rootori d -telje suuna vahel tekib teatud nurk, mida nimetatakse koormusnurgaks.

Sünkroonsel pöörlemisel jäävad lühismähise vardad paigalseisvasse välja. Neis ei indutseerita pinget ja neis ei teki voolu. Sellega ei teki ka rootorimähises kadusid ja sünkroonreluktantsmootori kasutegur on kõrgem kui asünkroonmootoril. Sünkroonreluktantsmootori puuduseks võrreldes asünkroonmootoriga on aga madalam võimsustegur ja suurem kaal ja mõõtmed.

Masina pooluspaaride arvu suurenemisel kujundatakse sünkroonreluktantsmootori rootor selliselt, et seal tekib rohkem kui üks paar d - ja q -telgi. Joonisel 6.16 on näidatud kahe pooluspaariga rootor. Siin on kasutatud kolme rööpset magnetvoo tõkendit. Sellel rootoril ei ole aga lühismähist ja selline masin on käivitata ainult sagedusmuunduri abil nagu püsomagnetitega sünkroonmasin.



Joonis 6.16. Kahe pooluspaariga sünkroonreluktantsmootori rootor

6.4.4 Sünkroonmootorite pöörlemiskiiruse reguleerimine

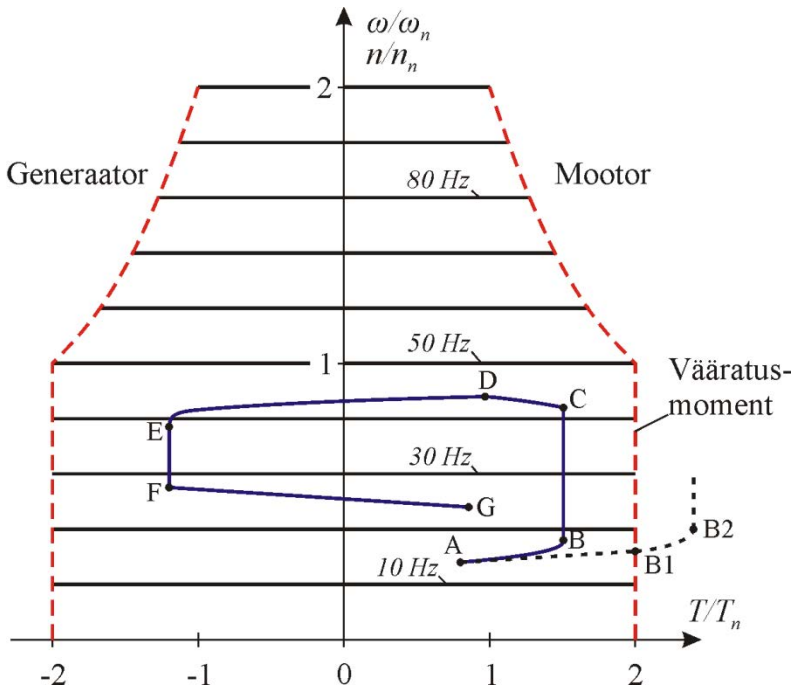
Sünkroonmootoris liigub rootor alati pöörleva magnetväljaga sünkroonselt. Sellepärast saab mootori pöörlemiskiirust muuta ainult staatorivälja pöörlemiskiiruse muutmisega. Staatorivälja pöörlemiskiirus n_s sõltub mootori pooluspaaride arvust p ja toitepinge sagedusest f .

$$n_s = 60f/p. \quad (6.13)$$

Sünkroonmootori pöörlemiskiiruse muutmiseks tuleb muuta toitepinge sagedust. Seda tehakse sagedusmuunduri abil, mille jõuosa on sarnane asünkroonmootorite sagedusmuundurite jõuosaga (alaldi, alalisvoolu vahelüli ja vaheldi nagu joonisel 5.15). Sünkroonmootori mehaanilised karakteristikud sagedusreguleerimisel on näidatud joonisel 6.17.

Mootori kiirus on näidatud nimikiiruse n_n suhtes ja mootori moment on näidatud nimimomendi T_n suhtes. Nimikiiruse suhtes võib mootori kiirust muuta nii suuremaks kui ka väiksemaks. Kuna sünkroonmootori staator on sarnane asünkroon-

mootori staatoriga, siis on sagedusmuunduri sageduse vähendamisel samuti vaja vähendada sagedusmuundurist mootorile antavat pinget (muidu läheb staatori magnetahel küllastusse).



Joonis 6.17. Sünkroonmootori mehaanilised karakteristikud sagedusreguleerimisel

Erinevalt asünkroonmootorist ei sõltu sünkroonmootori pöörlemiskiirus koormusmomendist (karakteristikud joonisel 6.17 on horisontaalsed sirged). Seda kuni väärtusmomendini, kus mootori töö muutub ebastabiilseks. Väärtusmomendini jõudmine on sünkroonmasinate juures üldiselt lubamatu, sest ebastabiilse töö korral tekib tugev vibratsioon ja voolude ohtlik suurenemine.

Kiiruse reguleerimisel alla nimikiirust ($\omega/\omega_n < 1$) väärtusmoment ja ka väärtusmomendist mõnevõrra väiksem lubatud koormusmoment ei muutu. Maksimaalne võimsus aga väheneb võrdeliselt kiiruse vähenemisega, sest $P = \omega T$. Nimikiirusest suurematel kiirustel aga väheneb koos kiiruse kasvuga maksimaalne moment ($\omega T = \text{const}$) ja maksimaalne võimsus ei muutu.

Püsitalitluses (punkt A joonisel 6.17) on mootori poolt arendatav moment T_M võrdne töömasina koormusmomendiga T_{koormus} . Punktis A on mootori kiirus 0,28 suhtelist ühikut. Kui mootori nimikiirus on näiteks 3000 p/min, siis on kiirus selles punktis 840 p/min ehk 87,96 rad/s. Mootori moment on selles punktis 0,8 suhtelist ühikut. Koormusnurk on siis $\arcsin 0,4 = 23,58^\circ$, sest väärtusmoment on 2 suhtelist ühikut ja koormusnurga seost koormusmomendiga kirjeldab valem (6.11).

Vaatame, mis toimub, kui tõstame staatori pöördvälja nurkkiirust 0,1 rad/s võrra ja eeldame, et rootori kiirus jääb samaks. Siis on ühe sekundi pärast nurk staatorivälja

ruumivektori ja rootori pooluse vahel kasvanud 0,1 radiaani ehk 5,7 kraadi võrra. See nurk on koormusnurk. Seega staatori pöördvälja kiiruse väikesel kasvamisel hakkab koormusnurk θ aeglaselt kasvama. See koormusnurk ei saaks muutuda, kui staatorivälja pöörlemiskiiruse ja rootori pöörlemiskiiruse vahel ei oleks lühiajaliselt väikest erinevust. Seega siirdeprotsessides ei pruugi sünkroonmasina rootor staatoriväljaga päris sünkroonselt pöörelda.

Kui me sagedusmuunduri abil tõstame staatorivälja nurkkiirust ω_B selliselt, et $d\omega_B/dt = \text{const}$, siis hakkab koormusnurk θ kiirenevalt kasvama. Vastavalt valemile (6.11) hakkab koos koormusnurgaga kasvama ka mootori moment T_M ja see muutub koormusmomendist T_{koormus} suuremaks. Tekib dünaamiline moment $T_{\text{dün}}$, mis hakkab rootorit kiirendama,

$$T_{\text{dün}} = T_M - T_{\text{koormus}} . \quad (6.14)$$

Mida suuremaks saab dünaamiline moment, seda kiiremini hakkab kasvama rootori nurkkiirus ω_R :

$$d\omega_R/dt = T_{\text{dün}}/J . \quad (6.15)$$

kus J on mootori ja töömasina pöörlevate osade inertsimoment (vt punkt 1.3).

Lõpuks tekib olukord, kus rootori pöörlemiskiiruse kasv saab võrdseks staatorivälja pöörlemiskiiruse kasvuga:

$$d\omega_R/dt = d\omega_B/dt .$$

Selline olukord on punktis B joonisel 6.17. Sealt edasi koormusnurk (ja ka mootori moment) enam ei kasva. Sellest punktist edasi toimub kiiruse kasv rootoril sünkroonselt staatorivälja kasvuga. Mootori moment püsib konstantsena ja on koormusmomendist dünaamilise momendi võrra suurem. Mootori kiirus kasvab niikaua, kui sagedusmuunduri abil sagedust tõstetakse. Joonisel 6.17 toimub see kuni punktini C. Punktis C hakatakse sageduse kasvamise kiirust sujuvalt vähendada ja punktis D muutub sagedus konstantseks. Siis pöörlemist enam ei kiirendata, dünaamiline moment muutub nulliks ja mootori moment saab jälle võrdseks koormusmomendiga. See toimub aga kõrgemal pöörlemiskiirusel, mis on 0,88 suhtelist ühikut.

Mida suurema pöördvälja kiirenduse $d\omega_B/dt$ me valime, seda suurem peab tekkima ka rootori kiirendus $d\omega_R/dt$. Kuid vastavalt valemile (6.15) peab siis tekkima ka suurem dünaamiline moment. Siinjuures tuleb aga jälgida, et mootori moment $T_M = T_{\text{koormus}} + T_{\text{dün}}$ ei ületaks väärtusmomenti T_{max} . Mootori moment peab jääma väärtusmomendist väiksemaks ehk

$$T_{\text{koormus}} + J(d\omega_R/dt) < T_{\text{max}} . \quad (6.16)$$

Teisendades (6.16) ja arvestades, et antud juhul on täidetud ka tingimus $d\omega_R/dt = d\omega_B/dt$, saame staatorivälja pöörlemise maksimaalse kiirenduse, mida ei tohi ületada:

$$d\omega_B/dt < (T_{\max} - T_{\text{koormus}})/J. \quad (6.17)$$

Selleks, et mootori töö jääks kiiruse tõstmisel stabiilseks (et ei tekiks vääratust), ei tohi sagedusmuunduri sagedust tõsta liiga kiiresti. Sagedust tuleb tõsta seda aeglasemalt, mida suurem on koormusmoment ja pöörlevate osade inertsimoment.

Olukord, kus sagedust tõstetakse liiga kiiresti, on näidatud joonisel 6.17 punktidega B1 ja B2. Selleks, et rootor saaks sama suure kiirenduse kui on staatoriväljal, oleks vaja kasutada vääratusmomendist suuremat momenti (punkt B2). Punktini B2 aga ei olegi võimalik jõuda, sest mootori stabiilne töö lõpeb punktis B1, kuhu ei tohikski sattuda.

Ka kiiruse vähendamisel ei tohi seda teha nii kiiresti, et jõutakse generaatoritalitluse maksimaalse momendini. Joonisel 6.17 on näidatud, kuidas pöörlemiskiiruse vähendamisel koormuspunkt liigub mööda mehaanilisi karakteristikuid. Punktist D punkti E liikumisel väheneb staatorivälja kiirus rohkem kui rootori kiirus ja selle tõttu koormusnurk kahaneb. Punktist E punkti F liikumisel toimub pidurdamine konstantsel momendil. Pidurdusmomendi suurus sõltub sellest, kui kiiresti sagedusmuundur sagedust langetab. Punktist F punkti G liikumisel lõpetatakse sageduse langetamine sujuvalt.

Sagedusmuundurid on varustatud juhtprogrammiga, mis valib sobiva pöörlemiskiiruse kiirenduse või aeglustuse vastavalt sisestatud mootori parameetritele ja koormuse hetkväärtusele. Valmistatakse ka sagedusmuundureid, mis on varustatud programmidega nii sünkroonmootori kui ka asünkroonmootori juhtimiseks. Sel juhul sisestatakse muunduri seadistamisel ka mootori tüüp.

6.5 Sünkroongeneraatori töö üksikuna

Sünkroongeneraatori töö koormuse all sõltub selle koormuse võimsustegurist ning suurel määral ka sellest, kas generaator töötab üksikuna või paralleelselt teiste sünkroongeneraatoritega. Vaatleme üksikuna töötavat generaatorit, mis toidab koormust (joonis 6.18).

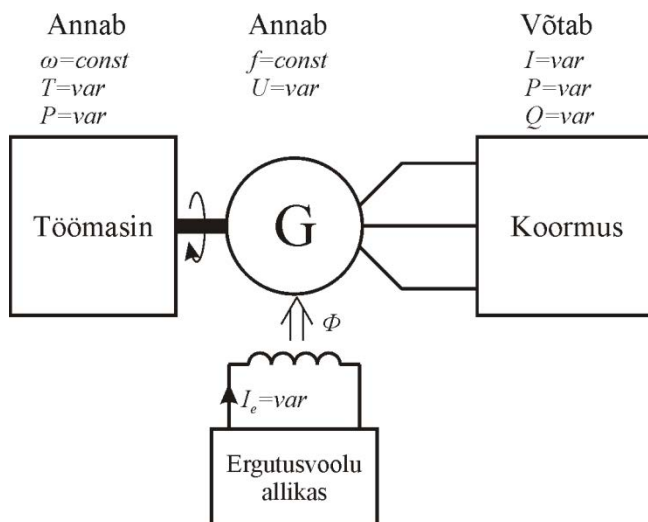
Lähtudes valemistest (6.1) ja (6.5) ning pöörlemiskiiruse ja nurkkiiruse vahelisest seosest $\omega = (\pi/30) \cdot n$, saame sünkroongeneraatori ühe faasi elektromotoorjõu kujul

$$E = 0,707p\omega w k_w \Phi. \quad (6.18)$$

Igal generaatoril on pooluspaaride arv p , faasimähise keerdude arv w ja mähisegur k_w konstantsed suurused. Tähistame $0,707p\omega w k_w = K$ ja saame (6.18) kujul

$$E = K\omega \Phi. \quad (6.19)$$

Töomasina pöörlemiskiirust saab muuta. Sellega muutub ka generaatori nurkkiirus ω . Nurkkiiruse muutus kutsub omakorda esile generaatori poolt välja antava pinge sageduse muutuse (vastavalt valemile (6.1)). Kuid valemi (6.19) põhjal muutub lisaks ka elektromotoorjõud. Elektromotoorjõudu saab muuta ka muutes pooluste voogu Φ .



Joonis 6.18. Üksik generaator, mis toidab koormust

Ülesanne 6.2

Autonoomse sünkroongeneraatori võll pöörleb kiirusega 1500 p/min ja generaatori klemmipinge on 400 V, 50 Hz. Pöörlemiskiirus tõstetakse kuni 1800 p/min ja siis vähendatakse ergutusvoo suurust 20% võrra. Leida generaatori pinge ja sagedus uues olukorras, kui generaator oli mõlemal juhul tühijooksul.

Lahendus

Tühijooksul on pinge U võrdne elektromotoorjõuga E .

1. Pinge pärast pöörlemiskiiruse tõstmist on

$$U_2 = U_1(n_2/n_1) = 400 \cdot (1800/1500) = 480 \text{ V},$$

sest (6.19) põhjal on elektromotoorjõud võrdeline nurkkiirusega ω ja ka pöörlemiskiirus n on võrdeline nurkkiirusega.

2. Pinge pärast ergutusvoo vähendamist on

$$U_3 = U_2(1 - 0,2) = 480 \cdot 0,8 = 384 \text{ V},$$

sest pinge langeb võrdeliselt ergutusvoo suurusega.

3. Generaatori sagedus uues olukorras on

$$f_2 = f_1(n_2/n_1) = 50 \cdot (1800/1500) = 60 \text{ Hz},$$

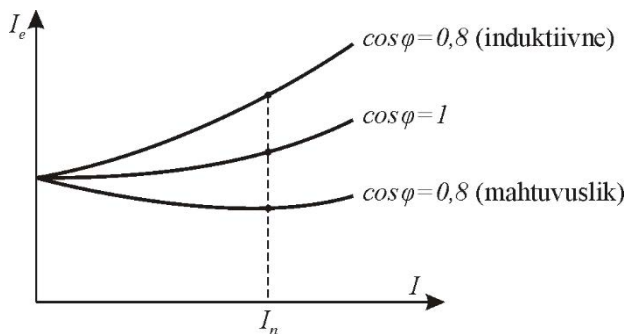
sest (6.1) põhjal on sagedus võrdeline pöörlemiskiirusega.

Generaatori koormuseks olevad tarbijad soovivad reeglina muutumatut sagedust ja muutumatut pinget. Sealjuures võtavad tarbijad ise voolu, mille suurus ettearvamatult muutub. Generaatori vool tekitab generaatorisisesed pingelangud ja generaatori klemmipinge muutub elektromotoorjõust väiksemaks (vt aseskeemi joonisel 6.8 ja faasordiagrammi joonisel 6.9).

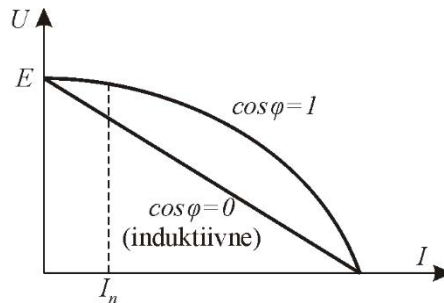
Generaator saab võlli kaudu töömasinalt mehaanilist võimsust ja muudab selle elektriliseks. Esimeses lähenduses määrab generaatori elektrilise võimsuse ja ka töömasinalt võetava mehaanilise võimsuse suuruse tarbitava voolu aktiivkomponent.

Töömasina (näiteks diisलगeneraatori) koormamisel selle pöörlemiskiirus langeb ja sellega langeb ka generaatori sagedus. Selleks, et generaatori sagedus ei langeks, varustatakse töömasinad pöörlemiskiiruse automaatregulaatoritega.

Selleks, et generaatori pinget koormamisel ei langeks, varustatakse generaatorid pinget automaatregulaatoritega, mis pinget langemisel suurendavad ergutusvoolu. Vajalikud ergutusvoolu muutused on näidatud joonisel 6.19 kolme juhu jaoks – aktiivinduktiivkoormus, puhas aktiivkoormus ja aktiivmahtvuslik koormus. Kõige rohkem on ergutusvoolu vaja muuta induktiivse iseloomuga koormuse puhul. Kui automaatregulaatorit ei ole, siis langeb pinget nii, nagu on näidatud joonisel 6.20.



Joonis 6.19. Pinget stabiliseerimiseks vajalikud ergutusvoolu muutused erinevatel koormuse võimsusteguritel



Joonis 6.20. Sünkroongeneraatori klemmipinget langus koormusvoolu suurenemisel, kui ergutusvoolu ei reguleerita

6.6 Sünkroongeneraatorite paralleeltöö

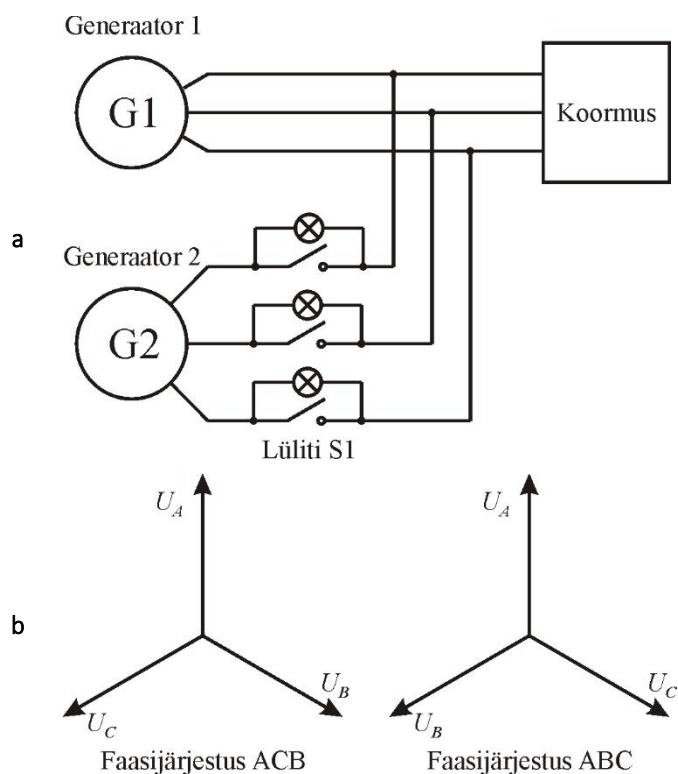
Sünkroongeneraatoreid, mis töötavad lokaalsel koormusel sõltumatult teistest generaatoritest, on suhteliselt vähe ja need on väikese võimsusega. Elektrivõrkudes kasutatakse paljude generaatorite paralleeltalitlust.

Sünkroongeneraatorite paralleeltalitusel on rida eeliseid.

1. Mitu generaatorit saavad toita suuremat koormust kui üksik generaator.
2. Mitme generaatori kasutamine suurendab süsteemi töökindlust, kuivõrd ühe generaatori rike ei tähenda üldist toite kadumist.
3. Mitme generaatori paralleeltalitus võimaldab ühe või enama generaatori väljalülitamist nende hooldustöödeks.

6.6.1 Paralleeltööle lülitamise vajalikud tingimused

Joonisel 6.21 on näidatud koormust toitev sünkroongeneraator G1 ja teine generaator G2, mis oleks vaja lüliti S1 sulgemisega lülitada generaatoriga G1 paralleeltööle. Millised tingimused tuleb täita enne lüliti sulgemist ja kahe generaatori ühendamist?



Joonis 6.21. Uue generaatori lülitamine töötavasse süsteemi (a) ja kolmefaasilise süsteemi kaks võimalikku faasijärjestust (b)

Kui lüliti sulgeda mingil suvalisel hetkel, võivad generaatorid saada tõsiselt viga ja koormus jääb ilma toitet. Suvalisel ajamomendil on pingete hetkväärtused lüliti S1 paremal ja vasemal poolel erinevad ja lülitamisel tekib ühtlustusvool. See vool võib olla väga suur. Et ühtlustusvoolu ei tekiks, peaks pinge lüliti kontaktidega rööbiti lülitatud lampidel (joonis 6.21,a) olema võimalikult nullilähedane. Selleks peavad olema täidetud järgmised paralleeltalitlusele lülitamise tingimused:

- generaatorite pingete efektiivväärtused peavad olema võrdsed;
- generaatoritel peab olema ühesugune faasijärjestus;
- generaatorite A-faasi pingete vahel ei tohi olla faasinihet;
- sisselülitatava generaatori sagedus peab olema natuke suurem juba töötava generaatori sagedusest.

Need paralleelalülitusele lülitamise tingimused vajavad natuke selgitust. Esimene tingimus on ilmselge – kahe generaatori pinged peavad olema identsed, sest muidu tekivad ühtlustusvoolud. Pinged saab ühtlustada juurdelülitatava generaatori ergutusvoolu reguleerimisega.

Teine tingimus kindlustab, et faasipingete tippude järjestus on mõlemal generaatoril ühesugune. Kui faasijärjestused on erinevad (vt joonis 6.21,b), võib üks pingetepaar olla faasis (faasid A), aga teisel kahel paaril on faasinihe 120° . Nii-suguste generaatorite ühendamisel tekiks suured voolud faasides B ja C, mis vigastaksid mõlemaid masinaid. Faasijärjestuse muutmiseks tuleb ühel masinal vahetada omavahel kaks faasi. Faasijärjestuse kontrollimiseks on vastav mõõteriist. Vale faasijärjestus on märgatav ka joonisel 6.21 näidatud lüliti kontaktidele ühendatud hõõglampide järgi. Ühesuguse faasijärjestuse korral kustuvad kõik kolm lampi ühekorraga, kui mõlema süsteemi pinged on faasis. Erineva faasijärjestuse korral on aga olukord, kus ühes faasis (näiteks A) on lamp kustunud, aga kahes ülejäänud faasis põlevad lambid täispingel.

Eri generaatorite pingete hetkväärtused on igal ajamomendil täiesti identsed, kui faasinihe puudub, nagu nõuab kolmas tingimus. Faasinihete muutmist tehakse järgmiselt. Vastavalt neljandale tingimusele sätitakse sisselülitatava generaatori sagedus natuke kõrgemaks, et pärast sisselülitamist hakkaks see generaator võimsust generaatorina võrku andma, aga mitte mootorina tarbima. Sageduse muutmist tehakse jõumasina pöörlemiskiiruse väikese muutmise. Kui sagedused on väga lähedased, siis muutub kahe süsteemi pingete vaheline faasinurk väga aeglaselt. Seda faasimuutust jälgitakse ja kui faasinurgad on võrdsed, siis lülitatakse sisse kahte süsteemi ühendav lüliti.

Kuidas aru saada, et kaks süsteemi on täpselt faasis? Lihtsaks võimaluseks on juba nimetatud kolme lampi jälgimine (joonis 6.21). Kui kõik kolm lampi on kustunud, siis on pinged nendel väikesed või võrdsed nulliga ja süsteemid on faasis. See lihtne skeem ei ole kahjuks kuigi täpne.

Paremaks võimaluseks on sünkronoskoobi kasutamine. Sünkronoskoop on mõõtur, mis mõõdab kahe süsteemi A-faaside faasinurkade vahet. Kuna kahe süsteemi sagedused on natuke erinevad, siis mõõturi faasinurga näit muutub aeglaselt. Kui sisselülitatav generaator pöörleb kiiremini kui töötav süsteem (soovitav olukord), siis faasinurk suureneb ja sünkronoskoobi osuti pöörleb päripäeva (kellaosutite liikumise suunas). Kui sisselülitatav generaator on aeglasem, siis osuti pöörleb vastupäeva. Kui sünkronoskoobi osuti on vertikaalasendis, siis on pinged faasis ja lüliti võib sisse lülitada süsteemide ühendamiseks.

Tuleb meeles pidada, et sünkronoskoop kontrollib ainult ühte faasi ja ei anna infot faasijärjestuse kohta.



Joonis 6.22. Sünkronoskoop

Suurtesse võimsussüsteemidesse kuuluvate generaatorite korral on kogu uue generaatori paralleelalatlusele lülitamise protsess arvuti abil automatiseeritud. Väiksemate generaatorite korral tehakse seda käsitsi.

6.6.2 Võrgus töötava sünkroongeneraatori aktiiv- ja reaktiivvõimsuse reguleerimine

Kõikide generaatorite ajamiseks on jõumasin, mis on generaatorite mehaanilise võimsuse allikas. Kõige tavalisem jõumasin on auruturbiin, kuid selleks võib olla ka diiselmootor, gaasiturbiin või isegi tuuleturbiin.

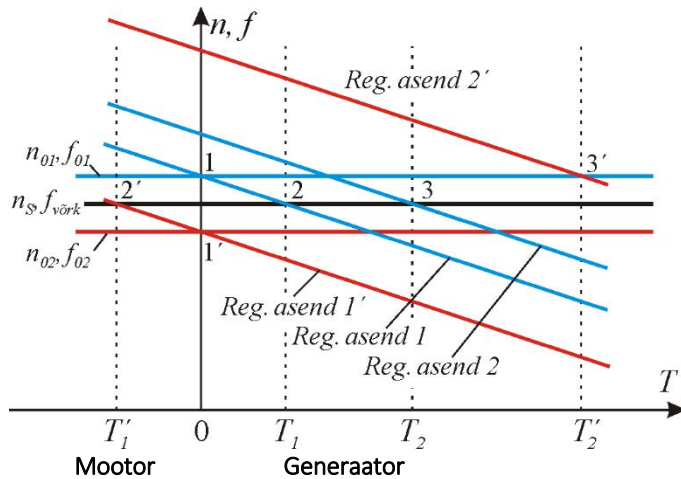
Vaatamata liigile on kõikidel jõumasinatel ühine omadus – kui neilt võetav võimsus suureneb, siis nende pöörlemiskiirus väheneb. Kiiruse vähenemine on tavaliselt mittelineaarne, mis aga ei sobi sünkroongeneraatori jaoks. Sellepärast varustatakse töömasin tavaliselt regulaatormehhanismiga, mis muudab kiiruse vähenemise võimsuse suurenemisel lineaarseks.

See regulaatormehhanism häälestatakse nii, et koormuse suurenemisel tekiks pisut langev karakteristik. Karakteristiku langus on selline, et üleminekul tühijooksult täiskoormusele langeb kiirus 2...4% (joonis 6.23). Seejuures saab regulaatormehhanismi reguleerimisega seda karakteristikut üles ja alla nihutada. Üles-alla nihutamise saad muuta jõumasina võlli kaudu generaatorile antavat momenti ja võimsust siis, kui generaator on võrku lülitatud (regulaatori asendid 1 ja 2). Jõumasin võrku lülitatud generaatori pöörlemiskiirust n_S muuta ei saa. Generaatori pöörlemiskiiruse n_S määrab võrgu sagedus $f_{võrk}$ ja see on konstantne.

Enne generaatori võrku lülitamist määrab regulaatormehhanism ära generaatori tühijooksukiiruse n_0 ja sageduse f_0 .

Alguses on regulaator asendis 1, generaatori koormusmoment on võrdne nulliga ja sagedus on võrgusagedusest veidi suurem (punkt 1 joonisel 6.23, kus sagedus on f_{01}). Kui vastavalt kirjeldatud sünkroniseerimisprotseduurile on saavutatud etteantud väärtused, lülitatakse generaator võrku ja tema sagedus saab võrdseks võrgu sagedusega $f_{võrk}$. Generaator hakkab pöörlema sünkroonselt võrgusagedusega tekitatud pöördväljaga ja tema pöörlemiskiirus langeb veidi. Sellel madalamal pöörlemiskiirusel n_S arendab jõumasin momenti T_1 (punkt 2 joonisel 6.23) ja generaator

hakkab võrku andma sellele momendile vastavat võimsust. Võrku antava võimsuse suurendamiseks tuleb minna regulaatori asendist 1 asendisse 2, millele vastav karakteristik joonisel 6.23 lõikub sünkroonkiirusele n_S vastava joonega punktis 3. Selles punktis arendab jõumasin momenti T_2 ja võrku antav võimsus on suurenenud.



Joonis 6.23 Jõumasina pöörlemiskiiruse sõltuvus momendist erinevatel regulaatori asenditel ja generaatori pöörlemiskiirus (sagedus) enne ja pärast võrku lülitamist

Jõumasin ei tohi rakendada generaatori võllile suuremat momenti, kui on generaatori vääratusmoment. Sel juhul läheks generaator sünkronismist välja ja tekiks avarii (regulaatori asend 2' ja töepunkt 3').

Kui enne võrku lülitamist valida regulaatormehhanismi abil tühijooksukiirus n_{02} ja sagedus f_{02} , mis on alla sünkroonkiiruse n_S ja võrgusageduse $f_{võrk}$ (regulaatori asend 1'), siis tõuseb generaatori pöörlemiskiirus pärast võrku lülitamist sünkroonkiirusele ja generaator sunnib ka jõumasinat kiirust tõstma. Sellega läheb generaator mootoritalitlusse (punkt 2' joonisel 6.32) ja jõumasin muutub töömasinaks. Generaatori kaitseautomaatika käsitleb aga mootoritalitluse teket olukorrana, kus jõumasin ei funktsioneer (näiteks auruturbiinile ei tule auru peale) ja lülitab generaatori otsekohe välja. Sellega generaatori võrku lülitamine ebaõnnestub.

Oluline on meelde jätta, et jõumasina ja regulaatormehhanismi abil on võimalik generaatori sagedust muuta enne seda, kui see generaator võrku lülitatakse. Pärast võrku lülitamist muudab seesama regulaator ainult generaatori poolt võrku antavat aktiivvõimsust.

Põhjus on selles, et võrgus on suur hulk generaatoreid ja nende koguvõimsus on üksiku generaatori võimsusest väga palju suurem. Üks lisatud generaator saab küll varem töötanud generaatoritelt väikese osa koormust ära võtta, kuid võrgu sagedust see märgatavalt ei tõsta.

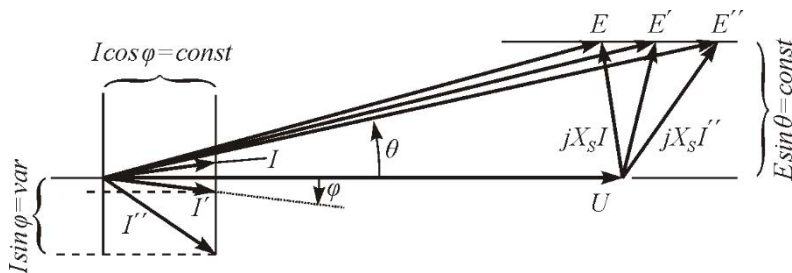
Ka ei mõjuta mingi ühe võrku lülitatud generaatori ergutusvoolu ja sellega tema elektromotoorjõu E muutmine oluliselt selle generaatori klemmipinget. Põhjus on

selles, et generaatori klemmid on ühendatud otse võrguga, kuhu annab pinget suur hulk paralleeltoole lülitatud generaatoreid. Üks generaator ei suuda kõigi ülejäänute pinget märkimisväärselt muuta.

Üksiku generaatori uurimisel käsitletakse elektrivõrku kui lõpmatult suure võimsuse ja nullsisetakistusega pingesallikat. Sellise pingesallika pinget ja sagedus jäävad alati muutumatuks (võrgu stabiilsuse uurimisel sellist lihtsustust siiski teha ei saa).

Kui võrku lülitatud generaatori klemmipinget muutada ei saa, siis mis sellel generaatoril muutub, kui me muudame ergutusvoolu suurust? Seda on selgitatud joonisel 6.24 toodud faasordiagrammil.

Võrku lülitatud generaatori aktiivvõimsus sõltub ainult jõumasina regulaatori asendist. Kui regulaatori asendit ei muudeta, siis on aktiivvõimsus konstantne. Konstantsel pöörlemiskiirusel ja konstantsel võimsusel on ka moment konstantne. Valemist (6.11) järeldeb, et kui moment, nurkkiirus ja pinget U on konstantsed, siis peab korrutis $E \sin \theta$ olema samuti konstantne (masina pooluspaaride arv p ja sünkroonreaktiivtakistus X_s ei muutu).



Joonis 6.24. Võrgus töötava sünkroongeneraatori ergutusvoolu muutmise mõju reaktiivvõimsusele

Kui ergutusvoolu reguleerimisel elektromotoorjõud E muutub ja $E \sin \theta$ peab jääma konstantseks, siis peab E -faasori otspunkt faasordiagrammil järelikult „libisema“ mööda U -faasoriga rööpset sirget, mis on U -faasorist kaugusel $E \sin \theta = \text{const}$ (joonis 6.24). Faasorite E ja U otspunkte ühendav faasor kujutab generaatori voolust I põhjustatud pingelangu $X_s I$, mis tekib generaatori sünkroonreaktiivtakistusel X_s . Elektromotoorjõu muutumisel muutuvad selle pingelangu faasori suund ja pikkus. Selle pingelangu faasori suund on risti generaatori voolufaasori I suunaga ja sellepärast muutub koos elektromotoorjõu suuruse muutumisega faasinihkenurk φ pinget U ja voolu I vahel. Kuna antud juhul aktiivvõimsus ei muutu, siis peab voolu aktiivkomponendile vastav korrutis $I \cos \varphi$ jääma konstantseks. Samas on jooniselt näha, et korrutis $I \sin \varphi$, mis on võrdeline reaktiivvõimsusega, muutub koos elektromotoorjõu E muutumisega. Teisisõnu, lõpmatult suure võimsusega võrku lülitatud generaatori ergutusvoolu suurendamine suurendab generaatorist välja antavat reaktiivvõimsust.

On vaja meeles pidada, et ergutusvooluga saab pinget reguleerida ainult siis, kui generaator töötab üksikult.

Kokkuvõtteks võib öelda, et kui generaator töötab paralleelselt lõpmata võimsa süsteemiga, siis

- generaatori sagedus ja klemmipingeline on määratud süsteemiga, millega ta on ühendatud;
- generaatori jõumasina regulaatori sättepunkt määrab generaatori poolt süsteemi antava aktiivvõimsuse;
- generaatori ergutusvool määrab reaktiivvõimsuse, mida generaator annab süsteemi.

See olukord on enam-vähem samaväärne väga suure võimsussüsteemiga ühendatud reaalse generaatori tööga.

7 ALALISVOOLUMASINAD

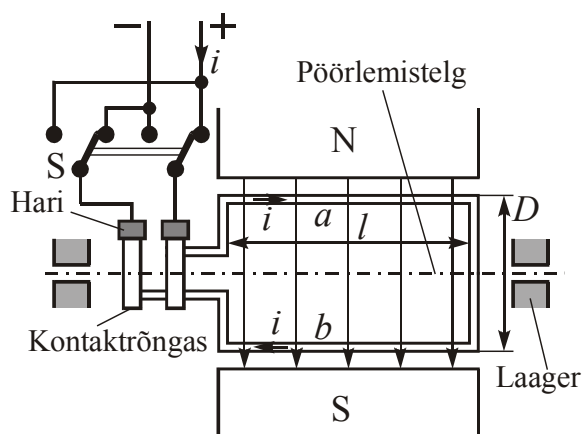
Seni vaatasime selliseid elektrimasinaid, kus paigalseisvas staatoris tekitati pöörlevad magnetvälja poolused. Pooluste liikumine tekitati kas konstruktiivsete pooluste voolu sisse-välja lülitamise teel (samm-mootorid) või vahelduvvoolu abil (sünkroon- ja asünkroonmasinad).

Nüüd vaatleme alalisvoolumootoreid, kus liikuvad poolused tekitatakse pöörleva rootori sees ja staatoril on paigalseisvad poolused. Selline konstruktsioon on klassikalisel alalisvoolumasinal, mis on ajalooliselt vanim elektrimasin. Sellel masinal on üks eriline osa – **kommutaator**. Kommutaatori kaudu läheb alalisvool paigalseisvast osast pöörlevasse rootorisse, kusjuures kommutaator muudab selle alalisvoolu vahelduvvooluks (mootoritalitluses). Voolu ülekanne ja muundamine toimub mehaaniliste kontaktide abil, millest osa asub pöörleval rootoril ja neid nimetatakse **lamellideks**. Teised kontaktid on paigalseisvad ja neid nimetatakse **harjadeks**. Harjad on tavaliselt grafiidist ja need surutakse vedrude abil vastu pöörlevaid lamelle. Lamellid on vasest.

See liikuvate kontaktidega kommutaator ei ole eriti töökindel (vajab perioodilist hooldust). Sellepärast on kasutusele võetud ka nn **harjadeta alalisvoolumootorid**. Neil on kommutaatori asemel pooljuhtlülitid, mida juhitakse **rootori asendianduri** signaalidega. Nende mootorite pöördenurka, kiirust ja kiirendust on võimalik väga täpselt juhtida ja neid kasutatakse seal, kus see on oluline (näiteks metallilõikepingid).

7.1 Alalisvoolumasinate ehitus ja tööpõhimõte

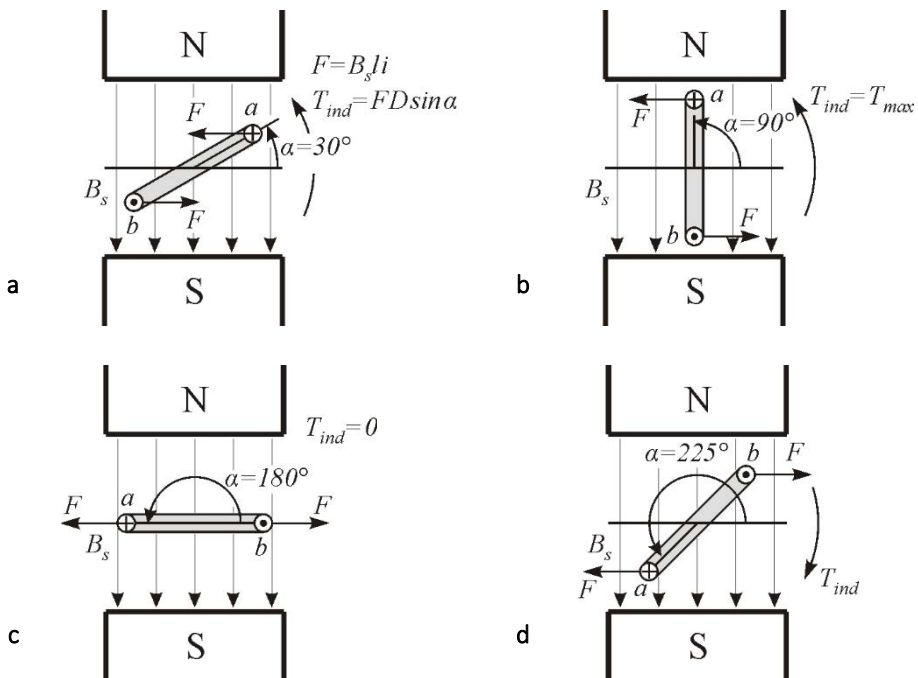
Alalisvoolumasina magnetväli on paigalseisev. Selles väljas asuvad rootorimähise juhtmed. Vaatame esmalt magnetvälja asetatud pöörlevale raamile (joonis 7.1) mõjuvaid jõude.



Joonis 7.1. Laagritel pöörleva magnetvälja asetatud vooluga raami külgsuuna

Kahe koos völliiga pöörleva kontaktrõnga ja nende rõngaste vastu puutuvate liikumatute harjade abil juhitakse raami vool. Raam saab pöörelda ümber laagritele asetatud telje. Raamil on kaks pikemat külge a ja b , mille pikkus on l . Küljes a kulgeb vool kontaktrõngastest eemale, küljes b aga kontaktrõngaste poole. Külgede a ja b vaheline kaugus on D . Kaugus D on ühtlasi raami pöörlemisel moodustuva silindri läbimõõt. Raami läbiva voolu ja magnetvälja koostoimel indutseeritakse raami kõikidesse külgedesse jõud. Indutseeritud jõudude tõttu tekkiva pöörlema-paneva momendi seisukohalt on olulised siiski ainult küljed a ja b . Saab näidata, et lühematele külgedele mõjuvate jõudude summaarne moment on raami igas asendis võrdne nulliga. Pöördemomendi teket on sobiv vaadelda raami teljega risti olevas tasapinnas.

Raami külgedele mõjuvad jõud F raami erinevate pöördenurkade α korral on näidatud joonisel 7.2 – vaade on kontaktrõngaste poolt (kontaktrõngaid pole joonisel näidatud).



Joonis 7.2. Pöördemomenti tekitavate jõudude rakenduspunktide ja suuna muutumine pöördtelje suhtes raami asendi muutumisel

Raami ühele küljele mõjuva jõu suurus on

$$F = B_s l i, \quad (7.1)$$

kus B_s – magnetvoo tihedus;

l – raami külje pikkus;

i – vool raamis.

Konstantse voolu korral raami küljele mõjuva jõu F suurus pöördenurga α muutumisel ei muutu, muutub aga jõupaari $F-F$ õlg. **Indutseeritud pöördemoment** T_{ind} sõltub pöördenurgast α valemi

$$T_{\text{ind}} = FD \sin \alpha \quad (7.2)$$

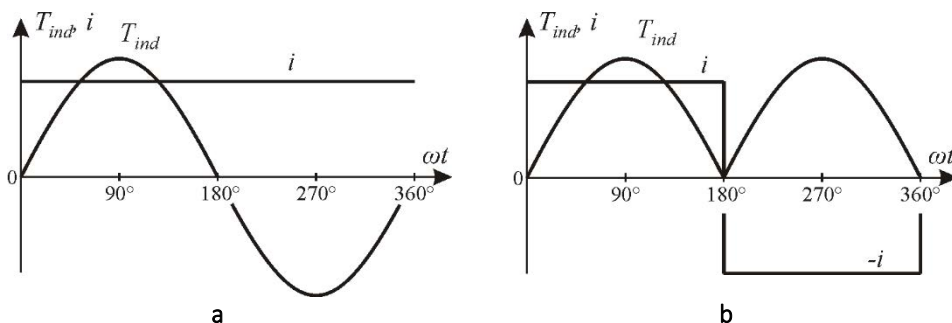
järgi, kus D on pöörleva raami läbimõõt (pikemate külgede vaheline kaugus). Avaldiste (7.1) ja (7.2) põhjal saame

$$T_{\text{ind}} = B_s l i D \sin \alpha = B_s i A \sin \alpha, \quad (7.3)$$

kus $A = lD$ on raami pindala.

Kui voolu sisselülitamise momendil on pöördenurk $\alpha = 0^\circ$, on pöördemoment võrdne nulliga ja raam jääb paigale. Kui aga algasendis on pöördenurk $\alpha = 30^\circ$, hakkab raam liikuma ja pöördenurk kasvama.

Moment saavutab maksimaalse väärtuse, kui $\alpha = 90^\circ$ ja hakkab seejärel vähenema (joonis 7.3,a). Pöördenurgal $\alpha = 180^\circ$ muutub moment jälle nulliks, sest jõud F mõjuvad ühel ja samal sirgel (joonis 7.2,c). Kui raam läheb inertsiga sellest asendist üle, tekib esialgse suhtes vastupidine moment, mis püüab raami asendisse $\alpha = 180^\circ$ tagasi viia (joonisel 7.2,d on näidatud asend $\alpha = 225^\circ$). Ühesuunalise voolu korral saab raam pöörduda ainult pool pööret ehk 180° .

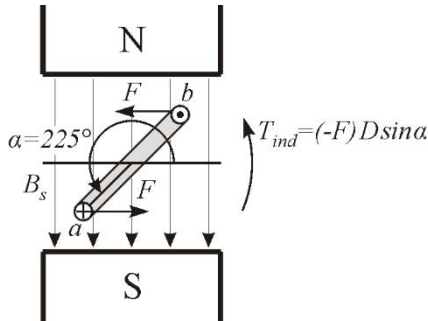


Joonis 7.3. Homogeenses magnetväljas juhtmekeerule indutseeritud momendi muutumine sõltuvalt pöördenurgast: a) voolu suund juhtmekeerus ei muutu; b) voolu suunda juhtmekeerus muudetakse iga poolpöörde järel

Üheks võimaluseks saada pidevat pöörlemist on voolu suuna muutmine raami asendites 180° ja 0° . Põhimõtteliselt saab voolu suunda muuta joonisel 7.1 näidatud ümberlülitil S abil. Selle põhimõtte tegelikul rakendamisel kasutatakse pooljuhtlüliteid (jõutransistore) ja mootori pöörleva osa ehk rootori asendi andurit. Asendianduri signaalide järgi muudetakse voolu suunda pöördenurga nendel väärtustel, kus moment muutub nulliks (antud näites 0° ja 180°). Sel viisil töötavad harjadeta alalisvoolumasinad.

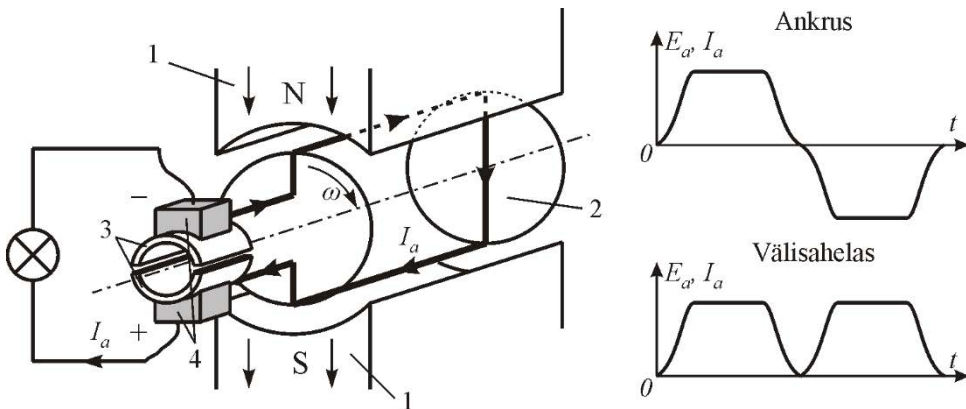
Paneme tähele, et joonisel 7.2 peab pöördemomendi suuna säilitamiseks lõunapoolusele S lähemal oleva raami külje (kas a või b) voolu suund olema alati joonise tasapinnast välja. Sellepärast tuleb iga kord, kui raam läbib horisontaalasendit (0° ,

180° jne), vahetada voolu suunda. Voolu suuna vahetamisel muutub raami küljele mõjuva jõu suund ja sellega ka momendi suund vastupidiseks (joonis 7.4). Voolu suuna perioodilise muutmise tulemusena arendab vooluga raam pidevalt ühesuunalist pöördemomenti (joonis 7.3,b).



Joonis 7.4. Voolu suuna muutmisel muutub raami pöördemomendi suund vastupidiseks

Voolu suunda saab vahetada ka pöörleva raami võllile paigutatud mehaanilise lülitusseadme ehk kommutaatori abil. Sellist voolu suuna muutmise meetodit kasutatakse kommutaatoriga alalisvoolumasinates, mille lihtsustatud variant on näidatud joonisel 7.5.



Joonis 7.5. Lihtsaim alalisvoolumasin:

1 – poolused; 2 – rootor ehk ankur, 3 – kommutaator; 4 – harjad

Poolused 1 tekitavad magnetvoo, mis läbib kahte õhupilu ja nende vahel olevat pöörlevat elektrotehnilise terase lehtedest silindrit 2, mida nimetatakse **ankruks**. Voolujuhtiv raam moodustatakse mähisetraadist, mis on paigutatud silindri välispinnal olevatesse soontesse ehk uuretesse. Kommutaatoriks on lihtsaimal masinal kaks vasest kommutaatorilesta ehk lamelli, mis on nii omavahel kui ka võllist isoleeritud. Lamellide külge on ühendatud ankrumähise otsad. Pöörleva kommutaatoriga puutuvad kokku kaks liikumatut harja 4, mille kaudu ankrumähis ühendatakse välisahelaga. See alalisvoolumasin võib töötada nii **generaatorina** kui ka **mootorina**. Joonisel 7.5 on näidatud generaatoritalitus. Nii generaatori- kui ka mootoritluses on **välisahelas alalisvool** ja mähisetraadist **raamis** (mida nimetatakse ankrumähise pooliks) **vahelduvvool**. Voolu suund mähises muutub, kui pöörlemise

tõttu harja kontakt ühe lamelliga kaob ja teise lamelliga tekib. Voolu suuna muutus, mida nimetatakse **kommutatatsiooniks**, toimub hetkel, kui mähisepooli tasapind on risti pooluse telje suunaga (joonisel 7.5 on mähisepool siis horisontaalne). Joonisel on näidatud ka elektromotoorjõu ja voolu hetkväärtuste kõverad ankrus ja välis-ahelas. Kõverate kuju erineb siinusest, sest masina pooluse otsa kuju ei ole tasapinnaline nagu joonisel 7.2, vaid kumer, ja pooluste vahel asub silindrikujuline elektrotehnilisest terasest ankur. Nii moodustub õhupilu, kus magnetvoo tiheduse välja suund on risti mähise liikumise teekonnaga. Selles teekonna osas on vool, elektromotoorjõud ja moment ligikaudu konstantsed ning voolu ja elektromotoorjõu kõveratel tekib horisontaalne osa.

Generaatoritalitluse korral tuleb elektrimasinale rakendada välist momenti, et masina ankur pöörlema panna. Pöörleva mähisraami ühe külje elektromotoorjõud, kui raam liigub õhupilus, on järgmine:

$$E_{\text{külg}} = B_s l v, \quad (7.4)$$

kus $E_{\text{külg}}$ – elektromotoorjõud voltides, V;

B_s – staatori magnetvoo tiheduse välja tugevus teslades, T;

l – juhtme pikkus meetrites, m;

v – juhtme liikumise kiirus, m/s.

Pöörlemisel liigub mähisekeeru ülemine külg vasakult paremale (joonis 7.5), kuid alumine külg paremalt vasakule. Seejuures on staatori magnetvälja suund nii ülemises kui ka alumises õhupilus ülalt alla. Selle tõttu on mähisekeeru eri külgedes indutseeritud elektromotoorjõudude suunad vastupidised (parema käe reegel). Kui keeru alumisel küljel on kommutaatoripoolsel otsal plussmärgiga potentsiaal, siis keeru ülemisel küljel on kommutaatoripoolsel otsal miinusmärgiga potentsiaal. Raami kahe külje elektromotoorjõud on seega jadamisi ja liituvad. Ühes keerus indutseeritud elektromotoorjõud on

$$E_{\text{keerd}} = 2B_s l v, \quad (7.5)$$

Generaatoritalitluses töötab kommutaator alaldina. Ankrumähises on vahelduv-elektromotoorjõud, kuid harjadele antava elektromotoorjõu polaarsus ei muutu.

Pöörleva masina jaoks ei ole sobiv kasutada joonkiirust v . Punktis 1.3 on näidatud, et joonkiirus v ja nurkkiirus ω on omavahel seotud valemiga

$$v = \omega r = \omega \frac{D}{2}, \quad (7.6)$$

kus r on liikuva punkti trajektoori raadius ja D on trajektoori läbimõõt (antud juhul ankrü läbimõõt).

Avaldistest (7.5) ja (7.6) saame leida keeru elektromotoorjõu nurkkiiruse kaudu:

$$E_{\text{keerd}} = 2B_s l \frac{\omega}{2} D = B_s l D \omega. \quad (7.7)$$

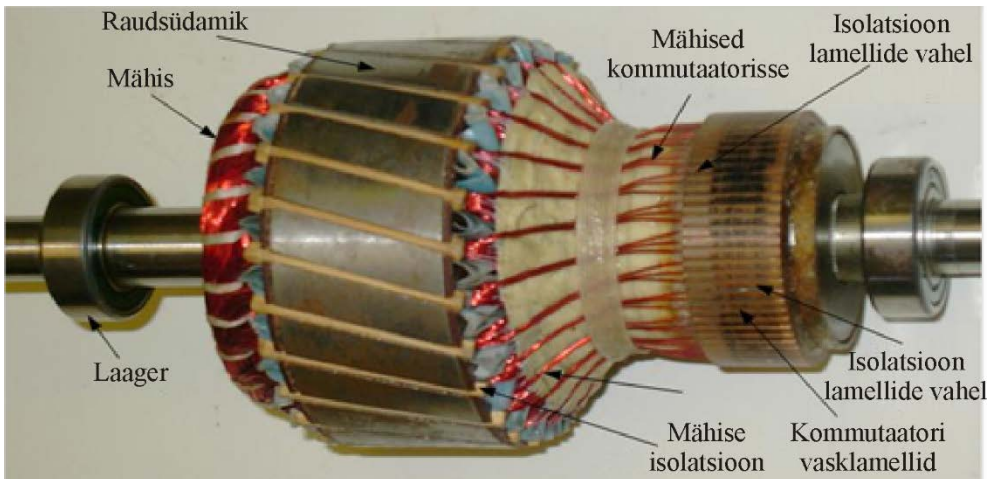
Korrutis $B_s l D$ on võrdne keerdu läbiva magnetvooga Φ , sest $l D = A$ (A on keeru pindala) ja $B_s A = \Phi$ (magnetvoog on võrdne vootiheduse ja pindala korrutisega). Seega on keeru elektromoorjõud magnetvoo kaudu

$$E_{\text{keerd}} = \Phi \omega . \quad (7.8)$$

Reaalse masina ankrul (joonis 7.6) on jadamisi palju kerde ja seda arvestatakse nn masina konstandiga k_E . Alalisvoolumasina elektromotoorjõu avaldiseks on

$$E = k_E \Phi \omega . \quad (7.9)$$

Näeme, et elektromotoorjõu ja pinge tõstmiseks on järgmised võimalused: **kasutada suuremat keerdude arvu, teha suurem masin või ajada masinat kiiremini ringi.**



Joonis 7.6. Alalisvoolumasina ankur

Vaadeldava alalisvoolumasina jaoks mootoritalitluses tekkiva pöördemomendi saame leida eespool toodud avaldise (7.3) alusel. Seejuures peame arvestama, et õhupilus on magnetvoo tiheduse välja suund risti nii õhupiluga kui ka mähise liikumise teekonnaga. Selle tõttu on õhupilus indutseeritud jõud alati õhupilu puutuja suuna-line ja võlli pöördenurgast α ei sõltu. Ühe keeru moment on

$$T_{\text{keerd}} = B_s A i = \Phi i . \quad (7.10)$$

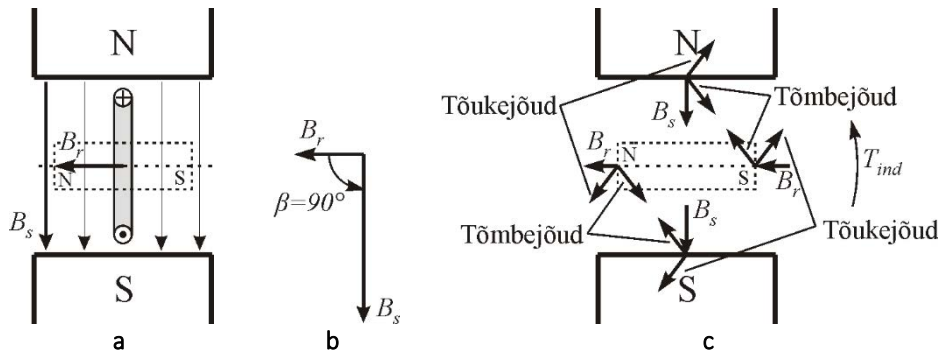
Et avaldises (7.10) on voolu hetkväärtus, saame ka momendi jaoks hetkväärtuse. Reaalses masinas, kus on palju kerde, on vool praktiliselt ühtlane alalisvool ja erinevus hetkväärtuse i ja efektiivväärtuse I vahel peaaegu puudub. Keerdude momendid summeeruvad ja seda võetakse arvesse masina konstandi k_T abil. Seega

$$T = k_T \Phi I . \quad (7.11)$$

Meelespidamise hõlbustamiseks on kasulik tähele panna, et momendi avaldis on kujult sarnane elektromotoorjõu avaldisega $E = k_E \Phi \omega$. Ühtlasi on soovitav meelde jätta, et **moment on võrdeline vooluga ja elektromotoorjõud on võrdeline nurk-kiirusega.**

Peale paigalseivate pooluste magnetvälja, mida nimetatakse ka staatori magnetväljaks B_s , tekitab oma magnetvälja B_r ka pöörleval rootoril olev mähis või lihtsalt vooluga raam. Joonisel 7.7 on näidatud nende väljade suunad, kui raami pöördemoment on maksimaalne.

Et pöördemomendi teket paremini mõista, võib ette kujutada, et vooluga pooli asemel on püsomagnet, mis tekitab samasuunalise välja kui pool. Joonisel on see mõtteline püsomagnet näidatud kriipsjoonega. Püsimagneitel teatavasti samanimelised poolused tõukuvad ja erinimelised tõmbuvad. Joonisel 7.7,c on näidatud staatorivälja tekitavate püsimagneetide ja rootorivälja imiteeriva püsimagneeti vahelised tõmbe- ja tõukejõud. Jooniselt on näha, et need jõud püüavad rootorit keerata asendisse, kus põhja- ja lõunapoolused on vastastikku. Sellega muutuvad staatorivälja B_s jõujooned samasuunalisteks mõttelise püsimagneeti sees oleva välja B_r jõujoontega. **Rootor püüab võtta asendit, kus rootori väli muutub staatori väljaga samasuunaliseks.** Siis saab rootori ja staatori väljade vaheline nurk β (joonis 7.7,b) võrdseks nulliga ja ka pöördemoment muutub nulliks. Selleks, et pöörlemine ei peatuks, muudetakse alalisvoolumasinas rootorivoolu kommuteerimisega rootori välja suunda ja jälle tekib ühe poolpöörde ulatuses liikumapanev moment.



Joonis 7.7. Staatori magnetvälja B_s ja rootori magnetvälja B_r vastastikune asend maksimaalse elektromagnetilise pöördemomendi korral: a) rootorimähise keerd ja tema magnetväli; b) staatori ja rootori magnetväljade vektorid ja nendevaheline nurk; c) rootorimähise magnetvälja asendamine mõttelise püsimagneeti väljaga ning magnetpooluste vahel tekkivad tõmbe- ja tõukejõud

Elektrimasinas tekkiva elektromehaanilise momendi T_{ind} saab avaldada ka staatori ja rootori magnetvoo tiheduste B_s ja B_r kaudu. Kui lähtuda avaldisest (7.3) ja arvestada, et rootori väli

$$B_r = \frac{i\mu}{G}, \quad (7.12)$$

kus μ on magnetiline läbitavus ja G raami kuju ja mõõtmeid arvestav tegur, siis pärast teisendusi

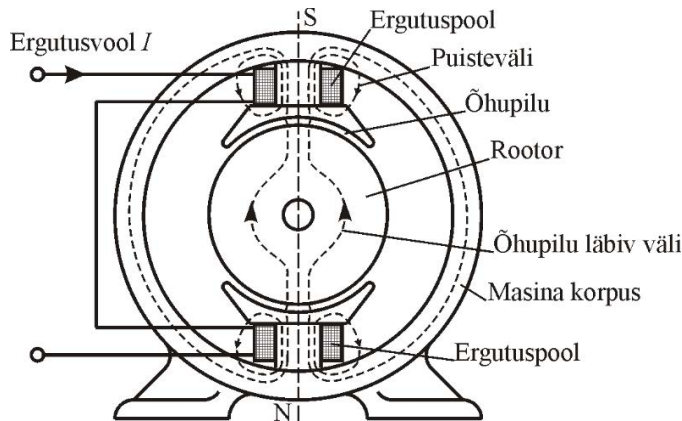
$$T_{ind} = k B_r B_s \sin \beta, \quad (7.13)$$

kus $k = AG/\mu$ (A on raami pindala). See tegur k iseloomustab masina konstruktsiooni.

Seega sõltub moment elektrimasinas üldjuhul neljast tegurist:

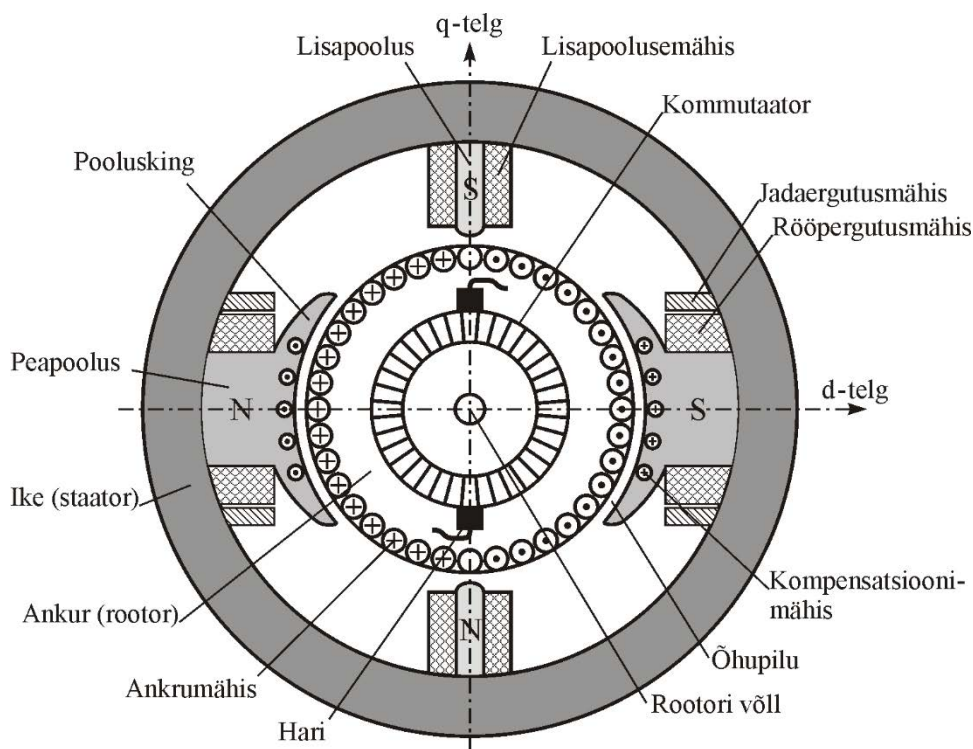
- rootori magnetvoo tiheduse välja tugevusest;
- staatori magnetvoo tiheduse välja tugevusest;
- nende väljade suundade vahelise nurga siinusest;
- masina konstruktsiooni iseloomustavast konstandist.

Valem (7.13) näitab, et elektrimasina moment on kõige suurem, kui staatori ja rootori magnetväljade vaheline nurk on 90° . Staatori magnetväli läheb alumise magnetpooluse pooluskingast (joonis 7.8) läbi õhupilu rootorisse ja väljub rootorist läbi teise õhupilu ülalasuvasse lõunapoolusesse. Rootorimähis ja harjad peavad olema nii paigutatud, et rootorivoolu poolt tekitatud magnetväli on risti staatori magnetväljaga.



Joonis 7.8. Alalisvoolumasina rootorisse ergutusvälja viimine staatoril olevate konstruktiivsete elektromagnetpooluste abil

Rootorimähise ja harjade paigutus on näidatud joonisel 7.9. Ankrumähise vool on harjadest paremal pool joonise tasapinnast välja ja vasakul pool joonise tasapinna sisse (tähistatud ristiga). Mähisepoolide uuretesse paigutamise ja lamellidega ühendamine on tehtud nii viisi, et rootori pöörlemisele vaatamata jäävad eespool kirjeldatud voolu suunad mähistes püsima. Paremal pool harju on voolud alati ühes suunas ja vasakul pool harju vastassuunas. Masina pöörlemisel muutub voolu suund mähise poolides siis, kui pooli otsaga ühendatud lamell läheb ühelt poolt harja teisele poole harja (lamell läheb harja alt läbi), joonisel 7.9 näidatud voolujaotuse pilt jääb selle juures samaks. Sellise voolujaotuse korral paiknevad rootorivoolu poolt tekitatud poolused alati joonisel näidatud q -teljel. Joonisel näidatud rootoris on voolud sellise suunaga, et rootorivoolu poolt tekitatud põhjapoolus on ülal. Sellepärast on ülal paigutatud rootorivoolu välja kompenseeriv lisapoolus, mis on lõunapoolus. Rootori magnetväli on risti d -teljel paiknevate staatori pooluste väljaga. Nurk β valemis (7.13) on seega alati 90° ja moment on kõige suurema väärtusega.

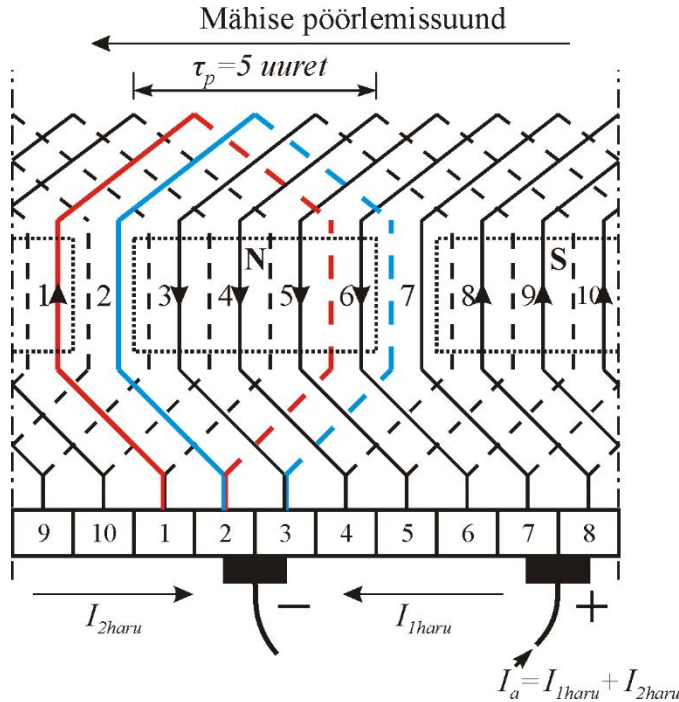


Joonis 7.9. Alalisvoolu-kompaundmasina ristlõige

Mähisepoolide ühendusskeem ning pooluste ja harjade paiknemine mähisepoolide suhtes on näidatud joonisel 7.10. Rootoril on 10 uuret ja igas uurdes on kaks poolikülge (see on väiksem rootor kui joonisel 7.9). Poolide arv on samuti 10 ja tegemist on kahekihilise mähisega. Ühe pooluse kohta tuleb 5 uuret. Ka lamellide arv on 10 ja iga lamelliga on ühendatud kaks mähisepooli otsa. Neist üks kuulub ühe mähisepooli lõpule (näiteks esimese pooli lõpp, mis tuleb uurdest 6, läheb lamellile 2) ja teine kuulub järgmise mähisepooli algusele (see on teise mähisepooli algus, mis tuleb uurdest 2 ja on samuti ühendatud lamelliga 2). Lamellide kaudu on esimene mähisepool ühendatud jadamisi teise mähisepooliga, teine mähisepool on ühendatud jadamisi kolmanda mähisepooliga ja nii edasi kuni viimase pooli lõpp on ühendatud esimese pooli algusega. Sellega jadaahel sulgub. Sellist mähist nimetatakse silmusmähiseks ja selline mähis on tavaline väikese ja keskmise võimsusega masinatel. Suurematel võimsustel kasutatakse ka teisi mähiste ühendusskeeme.

Kollektori lamellidega on ühenduses kaks harja, mis ühe pooluspaariga masinal on teineteise suhtes nihutatud 180° . Vool läheb mõlemalt harjalt nii paremale kui ka vasakule ja sellega tekib kaks võrdse pikkusega rööpset vooluharu (joonis 7.10). Harjad paigutatakse ergutuspooluste suhtes niiviisi, et harjast läheb vool kollektori lamelli kaudu nendele poolikülgedele, mis asuvad kahe ergutuspooluse vahel, kus ergutusväli puudub. Harjade asukoht seisab staatoril olevate ergutuspooluste asukoha suhtes paigal, kuid vähesel määral saab seda sättida, et leida neile selline

asukoht, kus sädelemine töö ajal on kõige väiksem. Rootor pöörleb koos uurete, mähisepoolide ja lamellidega, kuid harjadest läheb vool alati otse ainult nendes uuretes olevatesse poolidesse, mis antud ajahetkel on kahe staatoripooluse vahel, kus väli on nullilähedane ja poolidesse pinget ei indutseerita.



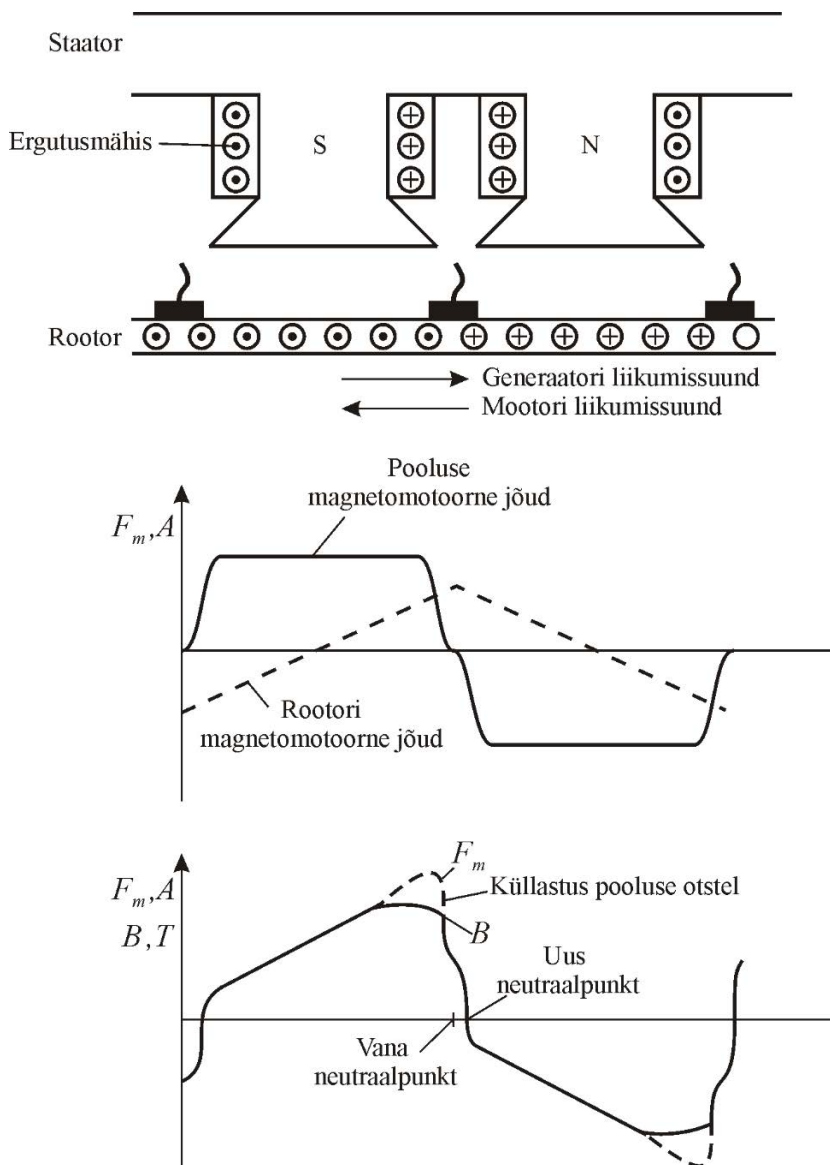
Joonis 7.10. Silmumähis kahepooluselises alalisvoolumasinas

Selline konstruktsioon annab kaks olulist eelist. Esiteks sel ajal, kui kaks kõrvuti-olevat lamelli on ühendatud harjaga (hari lühistab lamellide vahele jääva pooli), ei ole nende lamellide vahel poolist tulevat ergutusvälja poolt indutseeritud pinget (poolid on siis kahe pooluse vahel). Seetõttu ei teki voolu üleminekul ühelt lamellilt teisele, kõrval olevale lamellile, sädelemist (või on sädelemist oluliselt vähem).

Teiseks säilib pöörlemisel olukord, kus voolu suund uuretes on ühel pool harja ühes suunas ja teisel pool harja teises suunas. Sellepärast tekibki pöörlevas rootoris igal ajahetkel selline voolude jaotus, nagu on näidatud joonisel 7.9, ja tekkiv pöörde-moment on alati suurima võimaliku väärtusega. Rootori pöörlemisel pöörleb rootori välispind ühes suunas ja rootori voolude väli pöörleb selleksamal pinnal alati sama kiirusega vastassuunas. Seega on rootori voolude väli staatori suhtes alati paigal ja q -telje suunaline (joonis 7.9). Pole tähtis, kas rootor pöörleb või mitte.

Joonisel 7.9 on lisaks d -teljel paiknevatele põhipoolustele näidatud ka q -teljel paiknevad lisapoolused ja põhipooluste pooluskingades paiknevad kompensatsioonimähised. Lisapooluseid ja kompensatsioonimähiseid kasutatakse selleks, et vähendada rootorivälja poolt staatoriväljale tekitatud moonutust, mis on näidatud joonisel 7.11. Sellist välja moonutust nimetatakse ankrureaktsiooniks. Staator ja rootori

välispind on joonisel näidatud sirgestatud kujul. On näidatud ka staatori ja rootori mähised. Ülemisel graafikul on näidatud staatorimähise pooluste ja rootorimähise voolude magnetomotoorsed jõud õhupilus piki übermõõtu, alumisel graafikul aga nende magnetomotoorsete jõudude summa (kõver F_m) ja samuti magnetomotoorsete jõudude mõjul tekkinud magnetvoo tiheduse jaotus B õhupilus piki übermõõtu.



Joonis 7.11. Rootorimähise voolust põhjustatud ergutusvälja moonutus ja seda moonutatud välja põhjustavad magnetomotoorsed jõud alalisvoolumasinas

On näha, et nendes kohtades, kus magnetomotoorsed jõud lahutuvad, väheneb voo-tihedus võrdeliselt magnetomotoorse jõu vähenemisega, aga nendes kohtades, kus magnetomotoorsed jõud liituvad, tekib magnetahela küllastus ja vootihedus kasvab vähem kui summaarne magnetomotoorne jõud. Selle tulemuseks on keskmise summaarse magnetvoo vähenemine kogu pooluse pinna all. Voo vähenemine tekitab probleeme nii generaatoritel kui ka mootoritel. Generaatoritel tekib lihtsalt pinge vähenemine koormusel. Mootorite puhul on mõju tunduvalt tõsisem. Mootori voo vähenemisel suureneb kiirus. Mootori kiiruse suurenemine toob kaasa koormuse suurenemise ja sellest tuleneva uue voo vähenemise, kuni võib tekkida väärtusnähtus.

Jooniselt 7.11 on veel näha, et magnetvoo tiheduse nullpunkti asukoht, mida nimetatakse **neutraalpunktiks**, on ankrureaktsiooni tõttu nihkunud. Neutraalpunkti nihe tekitab probleeme kommutatsioonil. Harjad paigutatakse nii, et lamelli kaudu harjaga ühendatud pooliküljed oleksid neutraalpunktis, kus magnetvoo tihedus on nullilähedane, sest siis ei teki otse harjaga ühendatud mähisepoolides elektromotoorjõudu ja sädelemist harjadel on kõige vähem. Neutraalpunkti nihke tõttu satub harjaga ühendatud pool aga magnetvälja. See põhjustab sädelemist ja lamellide kiiremat kulumist.

Ankrureaktsiooni kahjulike ilmingute vältimiseks kasutatakse joonisel 7.9 näidatud lisapooluseid ja kompensatsioonimähiseid.

Lisapoolused on väikesed poolused, mis paigutatakse peapooluste vahele masina q -teljele. Lisapooluste mähised ühendatakse rootorimähistega jadamisi. Kui rootori vool ja magnetväli suurenevad, siis sama palju suureneb ka lisapooluste vool ja lisapooluste magnetväli, mis on vastupidine rootori väljale. Sellega lisapooluste väli kompenseerib rootori välja ja staatorivälja nullpunkti nihet ei teki. Nii hoitakse ära sädelemise kasv ning kommutaatori lamellide ja harjade tööiga pikeneb. Lisapoolused toimivad nii mootori- kui ka generaatoritaltluses, sest üleminekul ühelt talitlusviisilt teisele muutuvad voolu suunad nii rootoris kui ka lisapoolustes. Märkime, et lisapoolused ei mõjuta ankrureaktsiooni peapooluse pindade all, seega nad ei mõjuta ka masina voo nõrgenemist.

Suure võimsusega masinatel kasutatakse ankrureaktsiooni kompenseerimiseks ka kompensatsioonimähiseid, mis paigutatakse poolusepindadel olevatesse uretesse, et likvideerida ankrureaktsiooni poolt tekitatav välja moonutus ja sellega kaasnev peapooluste voo nõrgenemine. Kompensatsioonimähised ühendatakse rootori mähistega jadamisi, seega voolu muutumisel rootori mähises muutub ka nende mähiste kompenseeriv mõju. Kompensatsioonimähiste puuduseks on nende kõrge hind. Kompensatsioonimähiste kasutamisel on masinal ka lisapoolused, kuna kompensatsioonimähised ei likvideeri neutraalpunkti nihet ja sellega kaasnevat sädelemise kasvu.

7.2 Alalisvoolumasina talitlused

Joonisel 7.12 on lihtsustatult näidatud, kuidas masina võllile mõjuva momendi muutmisega saab minna kas mootoritalitlusse, generaatoritalitlusse või tühijooksule. Masina võlli külge on kinnitatud vänt, mille abil saab pöörlemist takistada või kiirendada. Takistamisel läheb masin mootoritalitlusse ja kiirendamisel generaatoritalitlusse. Kui võlli ei mõjutata, siis on masin tühijooksul ja hakkab pöörlema sellise nurkkiirusega, et tekkiv elektromotoorjõud $E = k_E \Phi \omega$ on võrdne toitepingega U . Kui moment T on võrdne nulliga (idealiseeritud juhtum) siis vastavalt seosele (7.11) on ka vool I võrdne nulliga. Kui aga moment erineb nullist, siis tekib (7.11) järgi vool

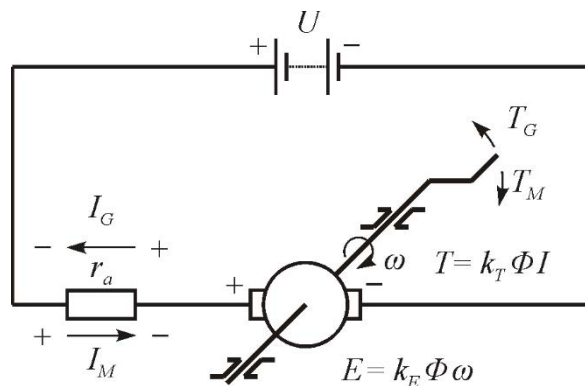
$$I = \frac{T}{k_T \Phi} . \quad (7.14)$$

See vool põhjustab ankrumähise takistusel pingelangu, mille suurus on $I \cdot r_a$. Joonisel 7.12 on ankrumähise takistus näidatud eraldi takistina, mis on lülitatud jadamisi ankruga. Mootoritalitluses on kiirus tühijooksukiirusest väiksem ja sellepärast on ka elektromotoorjõud pingest väiksem (elektromotoorjõud muutub koos kiirusega). Sellepärast tekib vool, mille suund on toiteallika plussklemmilt välja. Mootoritalitluses tasakaalustab toitepinge U ankrupingelangu ja elektromotoorjõu summa:

$$U = E + I r_a . \quad (7.15)$$

Generaatoritalitluses on elektromotoorjõud toitepingest suurem ja voolu suund on mootoritalitlusele vastupidine. Sellega antakse võimsust generaatorist toiteallikasse. Kui toiteallikaks on aku, siis akut laetakse. Voolu suuna muutusega muutub ka ankrumähisel tekkiva pingelangu suund ja generaatoritalitlust kirjeldab avaldis

$$U = E - I r_a . \quad (7.16)$$



Joonis 7.12. Alalisvoolumasina moment ja voolud mootori- ja generaatoritalitluses

Ülesanne 7.1

Püsimagnetitega alalisvoolumootori võlli koormatakse momendiga $T = 20 \text{ Nm}$. Mootori klemmidele antakse pinge $U = 230 \text{ V}$. Ankruahela takistus $r_a = 0,5 \Omega$. Masina konstant $k_E \Phi = 1 \text{ V}\cdot\text{s}/\text{rad}$ ja konstant $k_T \Phi = 1 \text{ Nm}/\text{A}$.

Määrata pöörlemiskiirus n ja võimsus P mootori võllil (mehaanilised kaod ja lisakaod jätta arvestamata).

Lahendus

1. Mootori vool:

$$I = T / (k_T \Phi) = 20 / 1 = 20 \text{ A}.$$

2. Pingelang ankruahelas:

$$\Delta U = I \cdot r_a = 20 \cdot 0,5 = 10 \text{ V}.$$

3. Elektromotoorjõud:

$$E = U - I \cdot r_a = 230 - 10 = 220 \text{ V}.$$

4. Pöörlemise nurkkiirus:

$$\omega = E / (k_E \Phi) = 220 / 1 = 220 \text{ rad/s}.$$

5. Pöörlemiskiirus:

$$n = \frac{30 \cdot \omega}{\pi} = \frac{30 \cdot 220}{3,14} = 2102 \text{ p/min}.$$

6. Võimsus võllil:

$$P_{\text{meh}} = \omega \cdot T = 220 \cdot 20 = 4400 \text{ W}.$$

7. Ankruahela poolt tarbitav võimsus:

$$P_{\text{el}} = U \cdot I = 230 \cdot 20 = 4600 \text{ W}.$$

Ülesanne 7.2

Püsimagnetitega alalisvoolugeneraator pannakse pöörlema kiirusega 230 rad/s . Generaatori klemmidele on rakendatud koormus $R_{\text{koormus}} = 11 \Omega$. Generaatori konstandid on järgmised: $k_E \Phi = 1 \text{ V}\cdot\text{s}/\text{rad}$; $k_T \Phi = 1 \text{ Nm}/\text{A}$. Generaatori ankruahela takistus on $r_a = 0,5 \Omega$.

Määrata võimsus, mida generaator annab koormustakistusele, ja võimsus, mida generaator saab võlli kaudu.

Lahendus

1. Elektromotoorjõud:

$$E = \omega \cdot k_E \Phi = 230 \cdot 1 = 230 \text{ V}.$$

2. Vool:

$$I = E / (R_{\text{koormus}} + r_a) = 230 / (11 + 0,5) = 20 \text{ A}.$$

3. Moment:

$$T = I \cdot k_T \Phi = 20 \cdot 1 = 20 \text{ Nm}.$$

4. Jõumasina võimsus:

$$P = T \cdot \omega = 20 \cdot 230 = 4600 \text{ W}.$$

5. Koormusse antav elektrivõimsus:

$$P = I^2 \cdot R_{\text{koormus}} = 20^2 \cdot 11 = 4400 \text{ W}.$$

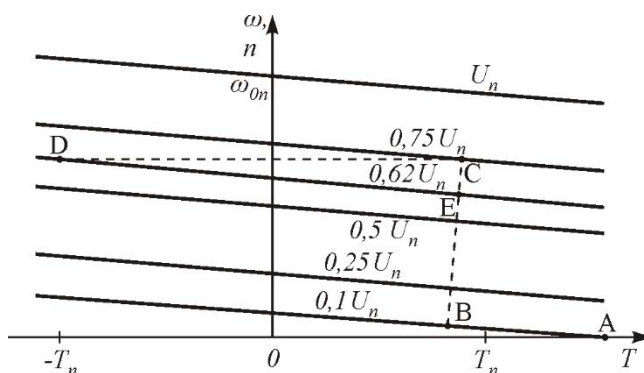
7.3 Alalisvoolumootori pöörlemiskiiruse reguleerimine

Uurime pöörlemiskiiruse muutmise võimalusi sellisel mootoril, kus on võimalik ankruahela ja ergutusahela toidet eraldi reguleerida. Sellist mootorit nimetatakse sõltumatu ergutusega mootoriks (ka võõrergutusega mootoriks).

Kui me avaldisse (7.15) paneme elektromotoorjõu avaldise (7.9) ja voolu avaldise (7.14), siis saame sealt avaldada nurkkiiruse ω

$$\omega = \frac{U}{k_E \Phi} - \frac{T r_a}{k_E k_T \Phi^2}. \quad (7.17)$$

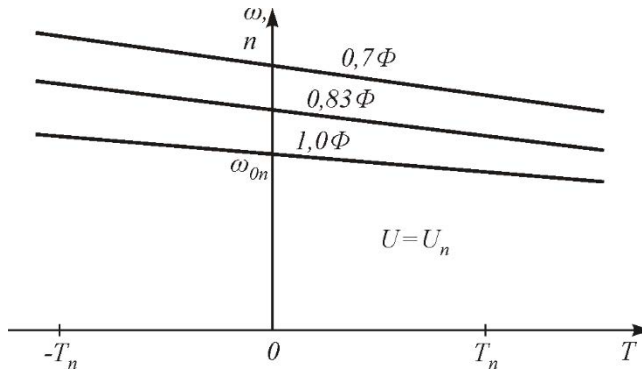
Avaldisest (7.17) on näha, et alalisvoolumootori pöörlemiskiirust saab reguleerida kolmel viisil: toitepinge U muutmisega, magnetvoo Φ muutmisega (küllastuse tõttu saab seda ainult vähendada) ja ankruahela takistuse muutmisega (see on võimalik, kui ühendada ankruga jadamisi lisatakistus R_{lisa}). Kiiruse reguleerimine ankruahela toitepinge muutmisega on näidatud joonisel 7.13.



Joonis 7.13. Alalisvoolumasina mehaanilised karakteristikud toitepinge vähendamisel

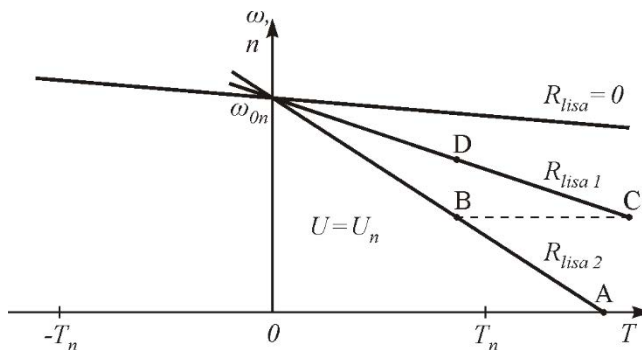
Mootori käivitamisel valitakse väike pinget (0,1 nimipinget punktis A, joonis 7.13). Käivitusel seisab rootor paigal ja masina elektromotoorjõud on võrdne nulliga. Käivitusvoolu suurus on määratud siis ainult ankruahela takistusega: $I_k = U/r_a$. Ankruahela takistus on nii väike, et kui käivitusel kasutada nimipinget U_n , siis on käivitusvool umbes 20-kordne nimivool, mis rikub mootori. Väikesel pingel jääb aga vool lubatud piiridesse ja masin hakkab aeglaselt pöörlema (punkt B). Seejärel tõstetakse aeglaselt pinget, kuni jõutakse soovitud pöörlemiskiiruseni (punkt C). Kiirete pinget muutustega kaasneb voolu suurenemine ja tuleb jälgida, et vool liiga

suureks ei läheks. Kui me näiteks läheme pingelt $0,75U_n$ kiirelt üle pingele $0,62U_n$ (vähendame pinget), siis satume hüppeliselt punktist C punkti D, kus toimub nimi-momendiga pidurdus generaatoritalitluses. Vool on selles punktis võrdne nimi-vooluga, kuid esialgsele vastupidise suunaga. Pidurdusmomendi tõttu kiirus langeb ja me jõuame punkti E.



Joonis 7.14. Alalisvoolumasina mehaanilised karakteristikud pooluste ergutusvoo vähendamisel

Kiiruse muutmine ergutusvoolu vähendamisega on näidatud joonisel 7.14. Avaldis (7.17) näitab, et kui pooluste magnetvoog Φ väheneb, siis pöörlemiskiirus suureneb. Joonisel 7.14 on näha, et mida väiksemaks pooluse voog jääb, seda suuremaks kiirus muutub. Kuid väga palju siiski kiirust tõsta ei saa. Koos magnetvoo vähendamisega väheneb (7.11) põhjal ka mootori poolt arendatav moment. Kuna aga töomasina takistusmoment jääb endiseks, siis selle takistusmomendi tasakaalustamiseks peab suurenema mootori vool. Et mootorit vooluga mitte üle koormata, peab ergutusvälja vähendamise korral koormusmoment olema nimimomendist väiksem. Mida rohkem me kiirust tõstame, seda vähem tohime mootorit koormata.



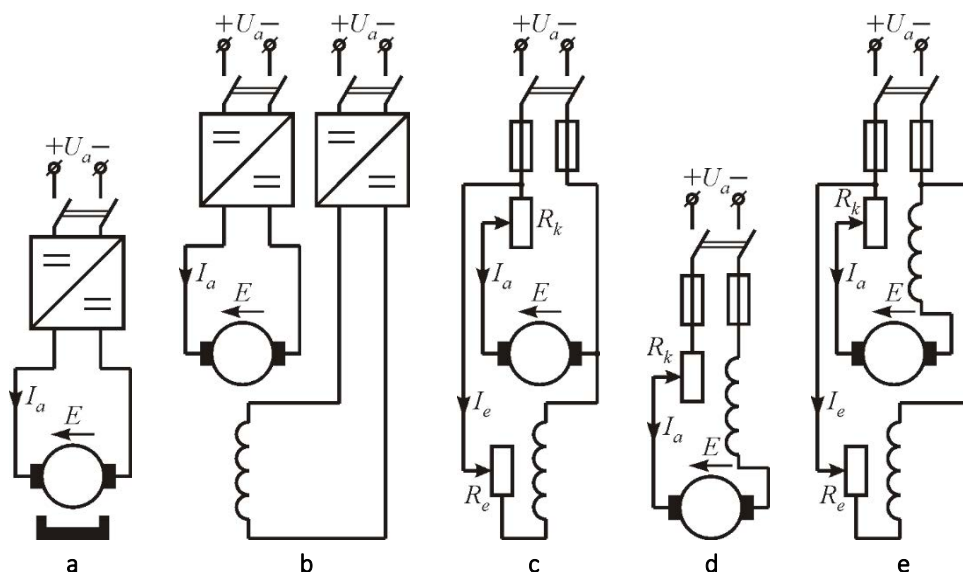
Joonis 7.15. Alalisvoolumasina mehaanilised karakteristikud, kui ankruga jadamisi on lülitatud lisatakisti

Lisatakistuse mõjul tühijooksukiirus ei muutu, kuid momendiga koormamisel hakkab kiirus rohkem langema. Mida suurem on lisatakisti, seda rohkem kiirus langeb (joonisel 7.15 on $R_{lisa2} > R_{lisa1}$). Lisatakistust saab kasutada ka mootori

käivitamisel. Kui käivitamisel on rootoriahelas takisti R_{lisa2} , siis see takisti piirab käivitusvoolu ja me oleme joonisel 7.15 punktis A. Kiirus hakkab kasvama ja me jõuame punkti B, kus mootori moment saab koormusmomendiga võrdseks. Edasiseks kiiruse tõstmiseks vähendame ankruahela takistust ja läheme üle takistusele R_{lisa1} . Siis satume algul punkti C, seejärel kiirus kasvab ja me jõuame punkti D.

Lisatakistuse kasutamine kiiruse reguleerimisel ei ole nii tõhus, kui toitepinge muutmine. Lisatakistust kasutati siis, kui pooljuhtmuundureid veel ei olnud.

On olemas ka alalisvoolumootoreid, kus ergutusvool ja ankruvool on reguleeritavad ainult üheskoos (joonis 7.16,d), ja ka selliseid mootoreid, kus ergutuseks kasutatakse püsिमagneteid (joonis 7.16,a). Joonisel 7.16 on näidatud veel teisigi võimalusi ergutusvälja tekitamiseks.



Joonis 7.16. Alalisvoolumootorite ergutuse skeemid

Kui ergutamiseks kasutada püsिमagneteid, mis asuvad staatoril (joonis 7.16,a), siis ergutusvälja suurust muuta ei saa ja mootori kiirust saab reguleerida ainult ankrupinge muutmisega.

Sõltumatu ergutuse korral (joonis 7.16,b) on ankruahela ja ergutusahela jaoks erinevad pingellikad, mille pinget saab eraldi reguleerida. Sellise reguleerimise mõju me vaatlesime eespool.

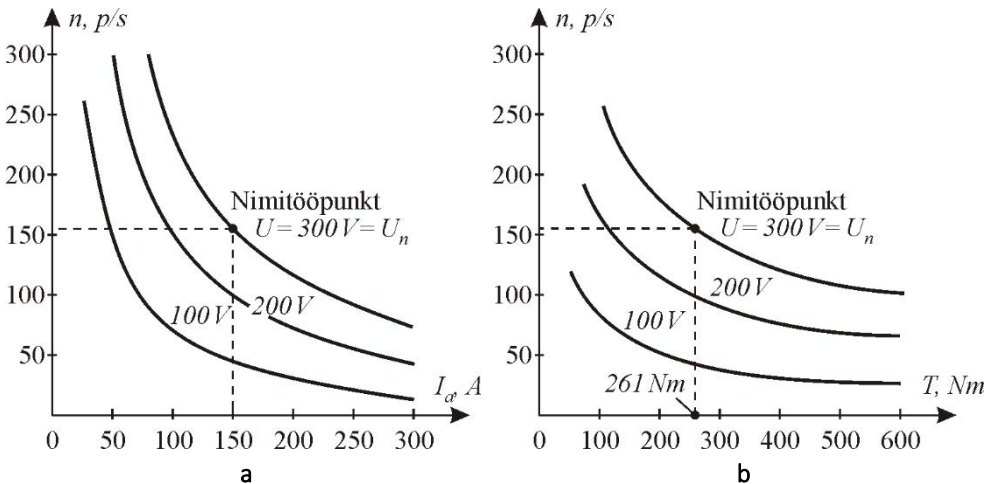
Kui ankrumähis ja ergutusmähis on lülitatud rööbiti ja saavad toidet ühest ja samast pingellikast, siis nimetatakse sellist mootorit haruvoolumootoriks või rööpergutusmootoriks (joonis 7.16,c). Haruvoolumootorit saab käivitada ja reguleerida muudetavate takistitega, mis on lülitatud jadamisi kas ainult ankruga või nii ankruga kui ka ergutusega. Omadustelt on haruvoolumootor sarnane sõltumatu ergutusega mootoriga. Haruvoolumootori jaoks on ohtlik, kui ergutusahel mootori töö ajal mingi rikke tõttu katkeb. Siis suureneb ankruvool järsult ja kiirus hakkab piiramatult

kasvama, sest ergutusvoolu kadumisel jääb järele ainult nõrk jääkmagnetväli. Seda saab vältida vastava kaitselülitusega.

Sellist mootorit, kus ankrumähis ja ergutusmähis on lülitatud jadamisi, nimetatakse peavoolumootoriks ehk jadaergutusmootoriks (joonis 7.16,d). Peavoolumootori pooluste voog Φ sõltub voolust I . Kui küllastust ignoreerida, siis $\Phi = k_\phi I$, kus k_ϕ on voo ja voolu vahelist sõltuvust arvestav tegur. Avaldist (7.17) teisendades saab leida peavoolumootori tühijooksukiiruse kujul

$$\omega = \frac{U}{k\sqrt{T}},$$

kus k võtab arvesse tegureid k_ϕ , k_E ja k_T üheskoos. Sellest avaldisest on näha, et momendi vähenemisel nullini peaks kiirus kasvama lõpmata suureks. Sellepärast peab jälgima, et peavoolumootor oleks alati momendiga koormatud. Muidu võib kiirus kasvada mootori purunemiseni. Momendi kasvamisel langeb kiirus palju suuremal määral, kui haruvoolumootori kiirus (momendi-kiiruse tunnusjoontel on suur kalle, joonis 7.17,b). Selline tunnusjoon sobib transpordivahenditele, kus väikestel kiirustel on vaja suurt momenti. Kiiruse reguleerimine toimub toitepinge muutmisega. Erinevatele toitepingetele vastavad tunnusjooned on toodud joonisel 7.17,a,b.



Joonis 7.17. Peavoolumootori kiiruse-voolu tunnusjooned (a) ja momendi-kiiruse tunnusjooned (b)

Joonisel 7.16,e on mootoril kaks ergutusmähist, millest üks on ankruga jadamisi, nagu peavoolumootoril, ja teine on ankruga rööbiti. Sellist mootorit nimetatakse kompaundmootoriks. Ka joonisel 7.9 kujutatud mootor on kompaundmootor, mille poolustel on näha kaks mähisepooli. Sellel mootoril jääb ergutusvoog alles ka nulliga võrdse ankruvoolu korral ja koormamata olekus ei kasva mootori kiirus liiga suureks. Kompaundmootori momendi-kiiruse tunnusjooned on väiksema kaldega kui peavoolumootoril, kuid suurema kaldega kui haruvoolumootoril. Seda mootorit kasutatakse samuti transpordivahenditel. Kiiruse reguleerimine toimub

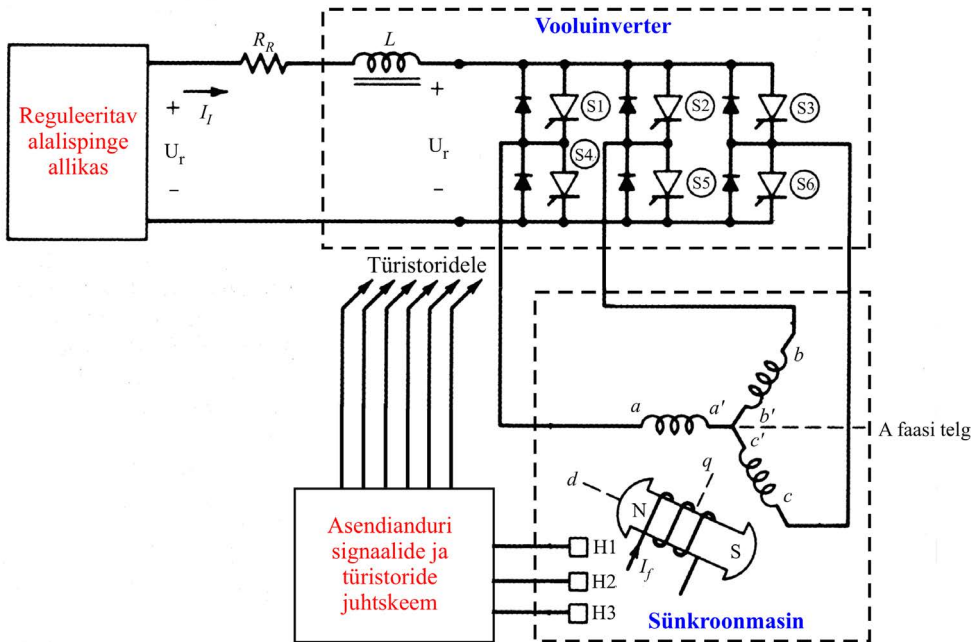
nagu võõrergutusega mootoril – ankruahela pinge muutmisega ja ankruga rööbiti lülitatud ergutusmähise voolu vähendamisega.

7.4 Vahelduvvoolu servomootor ehk harjadeta alalisvoolumootor

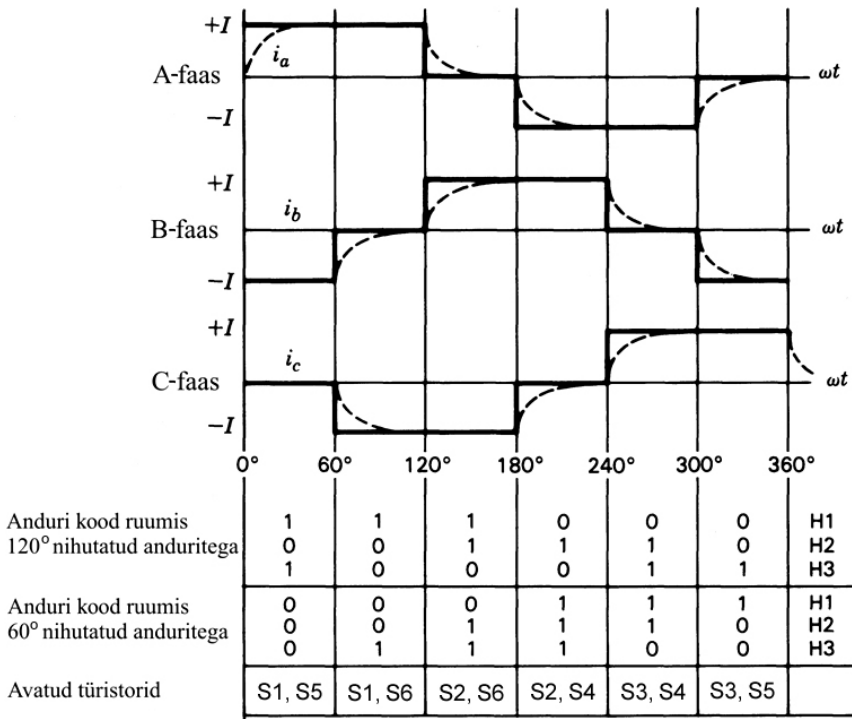
Ehituselt on vahelduvvoolu servomootor sarnane sünkroonmasinaga. Erinevuseks on see, et servomootor sisaldab ka rootori asendi andurit. Staatorimähis on kolme-faasiline nagu tavalisel sünkroonmasinal, kuid seda toidetakse vaheldist, mida juhitakse rootori asendi anduri signaalidega. Sealjuures hoitakse ruuminurk rootori-välja põhjapooluse telje ja staatorivälja põhjapooluse telje vahel ligikaudu konstantne. See nurk valitakse harilikult vahemikus $60\dots90^\circ$. Asendianduri järgi juhtimise tõttu muutuvad masina omadused sarnaseks alalisvoolumasina omadustega, kus kommutaatori toimel on rootori ja staatori väljade vaheline ruuminurk pidevalt 90° (selline ruuminurk tagab maksimaalse pöördemomendi). Sarnaste omaduste tõttu nimetatakse vahelduvvoolu-servomootorit ka harjadeta alalisvoolumootoriks. Harjadeta alalisvoolumootoris on voolu mehaaniline kommutatsioon asendatud elektrooniliselega – kommuteerib asendianduri poolt juhitud vaheldi. Ergutusvälja tekitaja on servomootoris viidud staatorilt rootorile – selleks kasutatakse tavaliselt püsimagneeteid. Kommuteeritav mähis on aga viidud rootorilt staatorile, et ei oleks vaja juhtida voolu pöörlevast osast paigalseisvasse. Seda nimetatakse pöördkonstruktsiooniks. Elektroonilise kommutaatori lihtsustamise huvides on kasutatud ainult kolme mähisesektsiooni. Tavalises alalisvoolumasinas põhjustaks nii väike sektsioonide arv lubamatult suure pinge kommutaatori lamellide vahel. Elektroonilises kommutaatoris hoitakse aga liigpinge teke vastava skeemiga ära. Sisseehitatud asendianduri tõttu on masinat lihtne kasutada teekonnajuhtimisega ajamites ja järgivajamites. Sellest tuleneb ka nimetus vahelduvvoolu-servomootor (*AC servomotor*).

Servomootorit toidetakse reguleeritava pingega alalisvooluallikast läbi vaheldi (joonis 7.18). Suurematel võimsustel on kasutusel türistorvaheldi koos alalisvooludrosseliga L , mis moodustab vooluinverteri. Väiksematel võimsustel kasutatakse jõutransistoridega pingeinverterit. Vaheldisse antava alalispinge U_r muutmisel muutub mootori kiirus nagu alalisvoolumootori ankrupinge muutmisel. Vaheldi türistoridega $S1\dots S6$ on rööbiti lülitatud vastuvooludiodid. Türistori sulgemisel ei saa mootori mähise vool hetkeliselt kaduda, sest selle vooluga on seotud staatori magnetvälja energia. Vastuvooludiodi kaudu saab mähise vool jätkuda seni, kuni kogu magnetvälja energia on viidud vaheldi alalisvoolupoolele tagasi.

Mootori kõigi kolme faasi voolukõverate kujud on näidatud joonisel 7.19. Pidevjoonega on näidatud idealiseeritud voolukõverad – vool tekib ja kaob hetkeliselt. Kriipsjoonega on näidatud tegelikud voolukõverad, kus voolu kasv ja langus toimub mööda eksponentkõverat. Voolukõverate horisontaalne osa on tingitud skeemis olevast alalisvooludrosselist L . Drosselit L läbiva voolu suuruse määrab ühelt poolt alalispingeallika pinge U_r ja teiselt poolt seda tasakaalustav sünkroonmootori elektromotoorjõud ja vaheldi ventiilide pingelang. Türistorvaheldi kasutamisel on otstarbekas sünkroonmasin üle ergutada, et voolu faas oleks pinge faasist ees. See on soodne türistoride sulgemisel. Selleks valitakse staatori ja rootori väljade vaheline nurk veidi väiksem kui 90° (nurk β joonisel 7.20).



Joonis 7.18. Vahelduvvoolu servomootori ja seda toitva vaheldi (vooluverteri) skeem

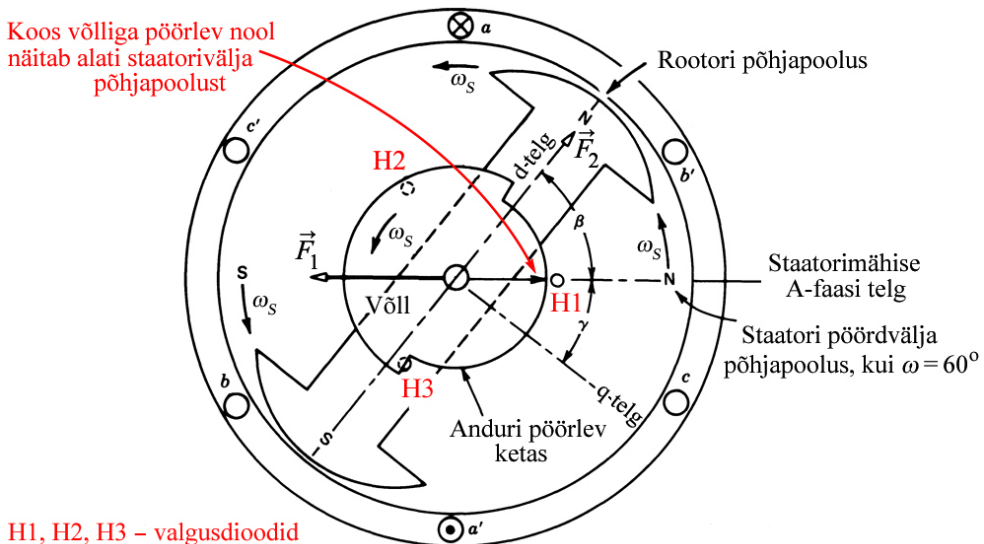


Joonis 7.19. Servomootori faasivoolude hetkväärtuste kõverad ja faasivoolude saamiseks kasutatavate türistoride numbrid ja anduri koodid

Väikestes servomootorites kasutatakse pingeinverteereid, milles drossel L puudub. Rootoril on enamikul juhtudel püsिमagnetid. Vaheldi ja mootori mähiste vooluga ülekoormamise vältimiseks kasutatakse kas toitealaldis või vaheldis pinge impulsslaiusmodulatsiooni, kus türistoride ($S1$ kuni $S6$ joonisel 7.18) asemel on jõutransistorid. Normaaltalitluses reguleeritakse impulssmodulatsiooni abil aga kiirust. Väga väikeste masinate puhul võib üks ja seesama integraallülitus sisaldada nii vaheldit kui ka juhtskeemi.

Vaheldi juhtimine toimub rootori asendit tuvastava anduri järgi. Kasutatakse valgusdiodidega andureid või Halli andureid. Kasutusel on kaks põhimõtteliselt võrdväärset valgusdiodide paigutust ruumis – kas kolm valgusdiodi iga 120° elektrilise kraadi tagant ($H1$, $H2$ ja $H3$ joonisel 7.20) või kolm valgusdiodi iga 60° tagant. Nende valgusdiodide signaalide paralleelkood (valgusdiodide signaalid tulevad paralleelselt ja sõltumatult) ja igale koodikombinatsioonile vastavad sisselülitatud türistoride numbrid on toodud joonisel 7.19.

Joonisel 7.20 on näidatud üks valgusdiodidega anduri konstruktsioon. Võlliga koos pöörlev valgust mitteläbilaskev kodeerimisketas on sellise kujuga, et 180° ulatuses see valguse jõudmist valgusdiodilt valgustundlikule andurile ei takista, aga ülejäänud 180° ulatuses takistab. Valgustatud anduri loogikanivoo on 1, valgustamata anduril 0.



Joonis 7.20. Servomootori rootori ja kodeerimisketta asend ajamomendil, kui staatorivool kommuteeritakse faasist B faasi C

Joonisel on näidatud ajahetk $\omega t = 60^\circ$, kui anduri kood 101 asendub koodiga 100. Enne seda ajahetke juhtisid türistorid $S1$ ja $S5$ ning vool sisenes A-faasi algusest ja väljus B-faasi algusest. Faasis C voolu ei olnud. Pärast seda ajamomenti lülitati türistor $S5$ välja ja türistor $S6$ sisse. See kutsus esile B-faasi voolu kulgemise ahela

muutuse. Vool läbi türistori S5 lõpeb ja sama vool hakkab minema läbi türistoriga S2 rööbiti lülitatud vastuvooludiodi toiteallika plussklemmide. Selle voolu suurus hakkab vähenema ja faasi C vool hakkab kasvama. Voolu üleviimine ehk kommutatsioon faasist B faasi C muudab staatori välja suunda 120° . Staatori magnetväli pöördub samas suunas ja sama nurga võrra, kui seda teeb kodeerimisketas ja sellega jäigalt ühendatud rootor koos oma magnetväljaga. Selle tõttu säilib nurk staatori ja rootori magnetväljade vahel sellisena, et pidevalt indutseeritakse pöörde-moment (see nurk on 90° lähedane).

Tavalises alalisvoolumootoris hoolitseb nurga säilimise eest mehaaniline kommutaator, mis koosneb kollektori lamellidest ja harjadest. Siin teeb sama operatsiooni türistorsild, mida võib nimetada elektrooniliseks kommutaatoriks. Kodeerimiskettale kantakse tavaliselt nool, mis näitab alati staatori magnetvälja põhjapooluse poole. Staatoriväli pöörleb sünkroonselt rootoriväljaga nagu igas sünkroonmasinas. Erinevalt sünkroonmasinast ei ole aga masina pöörlemiskiirus ja staatorivoolu sagedus konstantsed.

LISA 1 Väiketrafode lihtne arvutus

Algandmed

1. Trafo näivvõimsus S voltamprites.
2. Nimiprimaarpinge U_{1n} voltides.
3. Sekundaarpinge tühijooksul U_{20} voltides.
4. Töösagedus f hertsides.

Magnetahela valik

Magnetahela valik sõltub kõigepealt töösagedusest. Sagedusel 50 või 60 Hz kasutatakse trafo magnetahela jaoks tavaliselt kas stantsitud E- või U-kujulisi 0,35 mm paksusi trafoplekke või siis kahte vastamisi asetatud U-kujulist lindist keritud magnetahela osa. Muundurites kasutatakse tavaliselt sagedusi 20 kHz kuni 1 MHz. Sealjuures on suurematel võimsustel sagedus madalam. Võimsustel 1...10 kW on sagedus tavaliselt 30...40 kHz. Muundurites kasutatakse ferriitsüdamikke. Ferriite on mitut marki. Sageduste 20...40 kHz jaoks on ferriitide magnetvoo tiheduse amplituud umbes 0,2 T (ehk 0,2 Wb/m² ehk 2000 Gaussi). Kõrgematel sagedustel on magnetvoo tiheduse amplituud väiksem.

Enne trafo arvutamist on soovitatav teha magnetahela esialgne valik. Magnetahelaid valmistavad firmad näitavad oma tootekataloogides tavaliselt tervet rida eri suurusega magnetahelaid. Samas tuuakse ka südamikus tekkiv kaovõimsus ruumala või kaalu ühiku kohta (W/cm³ või W/g) sõltuvalt valitud töösagedusest ja magnetvoo tiheduse amplituudist. Trafo arvutamisega määratakse siis ära, millise suurusega südamik on soovitud trafo jaoks paras.

Magnetahela geomeetria kirjeldamine

Trafo magnetahela jaoks on kaks olulist põhinäitajat. Need on

- magnetahela samba ristlõike pindala A_{Fe} ;
- akna pindala A_{ak} .

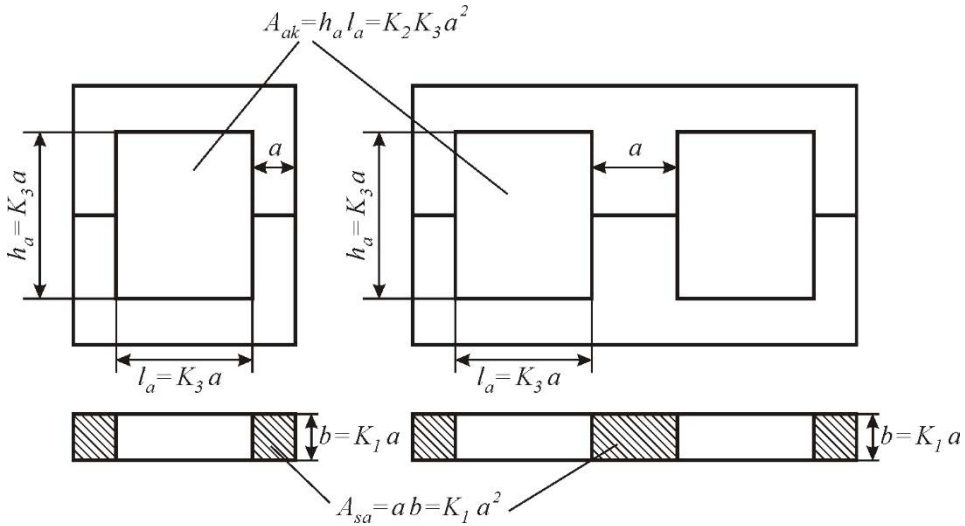
Neid saab määrata samba laiuse a ja tegurite K_1 , K_2 , K_3 ja K_{Fe} kaudu (joonis 1).

Kui südamik on koostatud plekkidest või keritud lindist, siis on magnetahela ristlõike pindala väiksem kui samba ristlõike pindala, sest osa ruumi võtab ära isolatsioon. Seda saab arvestada raua täiteteguriga K_{Fe} :

$$A_{Fe} = K_{Fe} \cdot A_{sa} . \quad (L.1)$$

Tegurid K_1 , K_2 ja K_3 saab määrata firmade tootekataloogidest, kus samba laius a , samba paksus b , akna laius l_a ja akna kõrgus h_a on antud ($K_1 = b/a$; $K_2 = l_a/a$; $K_3 = h_a/a$).

Raua täiteteguri väärtuseks võib plekkide või lindi puhul võtta $K_{Fe} = 0,9$ ja ferriidi puhul $K_{Fe} = 1,0$.



Joonis L.1. Akna ristlõike A_{ak} ja samba ristlõike A_{sa} määramine samba laiuse a ning tegurite K_1 , K_2 ja K_3 kaudu

Samba ristlõikepindala määrab ära magnetvoo amplituud Φ_m , sest magnetvoo tiheduse amplituud B_m on kas küllastusega (50 Hz korral) või kadudega (kõrgematel sagedustel) piiratud.

$$\Phi_m = A_{Fe} \cdot B_m. \quad (L.2)$$

Trafo arvutus lähtub trafo elektromotoorjõu avaldisest

$$E_1 = U_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m. \quad (L.3)$$

Trafo arvutuse juures on ette antud primaarpinge U_1 ja sagedus f . Valida tuleb korrutis $w_1 \Phi_m$:

$$w_1 \Phi_m = \frac{U_1}{4,44 f}. \quad (L.4)$$

Siit on selgesti näha, et mida suurem on valitud magnetvoo amplituud Φ_m (mis on määratud magnetahela ristlõikepindalaga A_{Fe}), seda väiksemaks jääb primaarmähise keerdude arv w_1 . Kui keerdude arv on väga väike, siis jääb osa aknast tühjaks. See pole hea, sest südamik on siis mõttetult suur. Kui keerdude arv on liiga suur, siis ei mahu mähis aknasse ja südamikku on vaja suurendada. Projekteerimisülesanne on lahendatav seega katse ja eksituse meetodil. On olemas siiski ka parem tee. On võimalik tuletada matemaatiline avaldis, mis määrab magnetahela suuruse samba laiuse a kaudu, kui tegurid K_1 , K_2 , K_3 ja K_{Fe} ning ka mähiste voolutihedused j ja akna täitetegur vasega K_{at} on ette antud. Akna täitetegur vasega on defineeritud järgmiselt

$$K_{at} = \frac{A_{Cu}}{A_{ak}}, \quad (L.5)$$

kus A_{Cu} on kõigi aknas olevate mähisekeerdude ristlõige kokku.

Ristlõike A_{Cu} saab leida, kui primaarmähise ühe mähisetraadi ristlõike pindala korrutada primaarmähise keerdude arvuga ja sellele lisada veel sekundaarmähise traadi ristlõike pindala ja keerdude arvu korrutis. Tegelikult on need eelnimetatud korrutised primaar- ja sekundaarmähise jaoks põhimõtteliselt võrdsed ja A_{Cu} saab leida avaldisest

$$A_{Cu} = \frac{2 w_1 I_1}{j}, \quad (L.6)$$

kus I_1 – primaarmähise nimivool, $I_1 = S/U_1$;
 j – voolutihedus mähises.

Vaskmähise korral on soovitatav voolutihedus 2...4 A/mm² (ehk 2·10⁶...4·10⁶ A/m²). Väga väikestel trafodel (mõni watt) sobib võtta 4 A/mm², suurematel trafodel tuleb aga voolutihedust vähendada, sest neil on jahutuspinna võimsusühiku kohta vähem.

Akna täiteteguri K_{at} soovituslik väärtus on 0,3. See tähendab, et kogemuslikult on magnetahela akent mähise vasega võimalik täita ainult umbes 30% ulatuses. Ülejäänud 70% läheb poolialusele, isolatsioonile ja mitmesugustele õhupiludele.

Magnetahela samba laiuse üldavaldis

Samba laiuse a üldavaldise saamisel lähtume trafo elektromotoorjõu avaldisest (L.3). Avaldises (L.3) on keerdude arv w_1 tundmatu. See keerdude arv w_1 on meil avaldises (L.6), kuid selle avaldise kasutamiseks peame eelnevalt leidma vase ristlõike A_{Cu} . Avaldise (L.5) ja joonise L.1 järgi

$$A_{Cu} = K_{at} \cdot A_{ak} = K_{at} \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot a^2. \quad (L.7)$$

Võrdsustades (L.6) ja (L.7) paremad pooled ja võttes arvesse, et $I_1 = S/U_1$, saame

$$\frac{2w_1 S}{jU_1} = K_{at} \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot a^2,$$

millest edasi

$$w_1 = \frac{jU_1 \cdot K_{at} \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot a^2}{2 S}. \quad (L.8)$$

Teiseks tundmatuks trafo elektromotoorjõu avaldises on magnetvoo amplituud Φ_m . Avaldiste (L.1) ja (L.2) ning joonise L.1 järgi saame

$$\Phi_m = A_{Fe} \cdot B_m = K_{Fe} \cdot A_{sa} \cdot B_m = K_{Fe} \cdot K_1 a^2 \cdot B_m. \quad (L.9)$$

Kui asendame lähteavaldises (L.3) w_1 ja Φ_m avaldistega (L.8) ja (L.9), siis saame

$$U_1 = 4,44f \cdot \frac{jU_1 \cdot K_{at} \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot a^2}{2 S} \cdot K_{Fe} \cdot K_1 a^2 \cdot B_m. \quad (L.10)$$

Avaldisest (L.10) saame leida otsitava samba laiuse a (meetrites):

$$a = \sqrt[4]{\frac{S}{2,22f \cdot j \cdot K_{\text{at}} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_{\text{Fe}} \cdot B_m}}, \quad (\text{L.11})$$

kus S – trafo näivvõimsus, VA;

f – sagedus, Hz;

j – mähiste voolutihedus, A/m², ($j = 2 \cdot 10^6 \dots 4 \cdot 10^6$ A/m²);

K_{at} – akna täitetegur vasega ($K_{\text{at}} \approx 0,3$);

K_1 – samba paksuse b ja laiuse a suhe ($K_1 = b/a$);

K_2 – akna laiuse l_a ja samba laiuse a suhe ($K_2 = l_a/a$);

K_3 – akna kõrguse h_a ja samba laiuse a suhe ($K_3 = h_a/a$);

K_{Fe} – raua täitetegur (plekkidel ja lindil $K_{\text{Fe}} \approx 0,9$, ferriidil $K_{\text{Fe}} = 1$);

B_m – südamik magnetvoo tiheduse amplituud, Wb/m² (elektrotehnilisel terasel 1,0...1,6 Wb/m², ferriidil olenevalt margist ja sagedusest 0,1...0,3 Wb/m²).

Avaldisest (L.11) on näha, et trafo mõõtmed kasvavad koos näivvõimsuse S kasvuga ja vähenevad koos sageduse f kasvuga. Näiteks suurendab sageduse 10-kordne tõus samade mõõtmete korral trafo võimsust 10 korda, kui magnetvoo tiheduse amplituud B_m ei muutu. Sageduse kasvades suureneb aga oluliselt rauas-kadu ja selle piiramiseks tuleb tavaliselt magnetvoo tiheduse amplituudi B_m vähendada. Sellegipoolest on sageduse tõstmine kõige radikaalsem viis trafo kaalu ja mõõtmete vähendamiseks.

Ülejäänud parameetrite leidmine

Kui arvutuslik samba laius a on leitud, siis tuleb valmistaja kataloogist valida lähim pakutav samba tegelik laius ja koos sellega magnetahel. Seejärel saame avaldiste (L.3) ja (L.9) kaudu leida primaarmähise keerdude arvu

$$w_1 = \frac{U_1}{4,44 f \cdot K_{\text{Fe}} \cdot K_1 a^2 \cdot B_m}, \quad (\text{L.12})$$

kus a on juba kataloogist valitud samba laius.

Sekundaarmähise keerdude arvu saame sekundaarpinge kaudu:

$$w_2 = w_1 \cdot \frac{U_2}{U_1}. \quad (\text{L.13})$$

Mähiste vase ristlõikepindalad saame leida vastava mähise voolu ja voolutiheduse kaudu. Primaarmähise arvutuslik ristlõikepindala A_{w1} (m²):

$$A_{w1} = \frac{I_1}{j} = \frac{S}{U_1 j}. \quad (\text{L.14})$$

Analoogiliselt leiame sekundaarmähise arvutusliku ristlõikepindala A_{w2} :

$$A_{w2} = \frac{S}{U_2 j}. \quad (\text{L.15})$$

Pärast mähiste arvutuslike ristlõikepindalade leidmist tuleb valida mähisetraati valmistavate firmade tootekataloogidest lähim pakutav ristlõige.

Mähisetraadi valikul tuleb silmas pidada, et kui 50(60) Hz trafodel on sobiv kasutada ühtainsat traati, millel on vajalik ristlõige, siis kõrgematel sagedustel selline valik pinnaefekti tõttu ei sobi. Kõrgematel sagedustel tuleb kasutada rööbiti mitut väiksema ristlõikega elektriliselt isoleeritud ja omavahel kokku punutud traati, millel on veel ka ühine isolatsioonümbris. Sellist mähisetraati nimetatakse litsetraadiks (sks *Litzendraht*). Võib kasutada ka õhukest vasklehte.

Trafosüdämike valmistajate kataloogides on tavaliselt antud ka südämiku kaal ja ruumala või üks nendest. Samuti võib sealt leida erikaovõimsused (kas W/cm^3 või W/g) sõltuvalt sagedusest f , magnetvoo tihedusest B_m ja südämiku töötemperatuurist. Nende andmete põhjal on võimalik leida ka südämikus eralduv kaovõimsus, kui korrutada erikaovõimsus vastavalt kas kaalu või ruumalaga. Sealjuures võime töötemperatuuri suurust ainult oletada ja selline arvutus on ligikaudne.

Arvutusnäide

Algandmed

1. Nimivõimsus 3300 VA.
2. Nimiprimaarpinge 210 V.
3. Sekundaarpinge tühijooksul 3300 V.
4. Töösagedus 20 kHz.

1. Magnetahela tüübi ja valmistajafirma valik

Kuna sekundaarpinge on kõrge, siis valime UU-kujulise magnetahela (kaks U-kujulist magnetahela osa vastamisi). Siis saab sekundaarmähise paigutada ühele ja primaarmähise teisele sambale, mis lihtsustab kõrgepinget isoleerimist. Südämiku materjaliks valime P-tüüpi ferriidi firmalt Magnetics, mille soovituslik magnetvoo tiheduse amplituud 25 kHz juures on 200 mT ($0,2 \text{ Wb/m}^2$).

Tegurite K_1 , K_2 ja K_3 leidmiseks võtame esialgu keskmise suurusega südämiku 0-49316UC, millel samba laius $a = 28 \text{ mm}$; samba paksus $b = 16 \text{ mm}$; akna kõrgus $h_a = 2 \times 48 \text{ mm}$ ja akna laius $l_a = 36 \text{ mm}$. Nende mõõtmete järgi saame:

$$K_1 = b/a = 16/28 = 0,571 ;$$

$$K_2 = l_a/a = 36/28 = 1,286 ;$$

$$K_3 = h_a/a = 96/28 = 3,429 .$$

2. Samba laiuse leidmine

Avaldise (L.11) jaoks teeme järgmised valikud.

Valime voolutiheduse $j = 2 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$, kuna võimsus on suhteliselt suur.

Valime akna täiteteguri $K_{at} = 0,25$, et jätta mähiste vahele lisaruumi.

Ferriidi puhul $K_{Fe} = 1,0$.

Valime magnetvoo tiheduse amplituudi $B_m = 0,2 \text{ Wb/m}^2$.

Leiame samba laiuse

$$a = \sqrt[4]{\frac{3300}{2,22 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^6 \cdot 0,25 \cdot 0,571 \cdot 1,286 \cdot 3,429 \cdot 1,0 \cdot 0,2}}$$

$$= 0,0233 \text{ m} = 23,3 \text{ mm} .$$

Lähimad pakutavad samba laiused on 20 mm ja 28 mm. Valime 28 mm (0,028 m) laiusega samba, mis on südamikul tähisega 0-49316UC. Seega alguses juhuslikult valitud südamik osutuski kõige lähemaks.

3. Mähiste keerdude arvud ja ristlõiked

Primaarmähise keerdude arv

$$w_1 = \frac{U_1}{4,44 f \cdot K_{Fe} \cdot K_1 a^2 \cdot B_m} = \frac{210}{4,44 \cdot 20 \cdot 10^3 \cdot 1,0 \cdot 0,571 \cdot 0,028^2}$$

$$= 26,4 \text{ keerdu} .$$

Valime $w_1 = 27$ keerdu.

Sekundaarmähise keerdude arv

$$w_2 = w_1 \cdot \frac{U_2}{U_1} = 27 \cdot \frac{3300}{210} = 424,2 \text{ keerdu} .$$

Valime $w_2 = 424$ keerdu.

Primaarmähise vase ristlõige

$$A_{w1} = \frac{S}{U_1 j} = \frac{3300}{210 \cdot 2 \cdot 10^6} = 7,88 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 = 7,88 \text{ mm}^2 .$$

Sekundaarmähise vase ristlõige

$$A_{w2} = \frac{S}{U_2 j} = \frac{3300}{3300 \cdot 2 \cdot 10^6} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 = 0,5 \text{ mm}^2 .$$

4. Kontrollarvutus

Kontrollimiseks leiame valitud südamiku ja arvutatud mähiseristlõigete järgi akna vasega täiteteguri.

Summaarne vase ristlõige on:

$$A_{Cu} = w_1 \cdot A_{w1} + w_2 \cdot A_{w2} = 27 \cdot 7,88 + 424 \cdot 0,5 = 425 \text{ mm}^2 = 4,25 \text{ cm}^2 .$$

Akna ristlõige on:

$$A_{\text{ak}} = h_a \cdot l_a = 96 \cdot 36 = 3456 \text{ mm}^2 = 34,56 \text{ cm}^2 .$$

Akna täitetegur on:

$$K_{\text{at}} = \frac{A_{\text{Cu}}}{A_{\text{ak}}} = \frac{425}{3456} = 0,123 .$$

Akna täitetegur on seega umbes kaks korda väiksem, kui oli ette antud. Erinevus on tingitud põhiliselt sellest, et me suurendasime samba laiust 23,3 millimeetrilt 28 millimeetrile ehk

$$\frac{28}{23,3} = 1,2 \text{ korda} .$$

Akna täitetegurile mõjub see samba laiuse erinevus aga neljandas astmes:

$$1,2^4 = 2,08 .$$

Kui me soovime materjalide paremat ära kasutamist, siis võime proovida kas sama firma teise kujuga magnetahelaid või siis mõne teise firma magnetahelaid.

LISA 2 Firma ABB lühisrootoriga asünkroonmootorite kataloogiandmed

Firma ABB ühekiiruseliste lühisrootoriga suletud ehitusega alumiiniumkerega asünkroonmootorite kataloogiandmed on esitatud tabelis L.2. Mootorite võimsus on vahemikus 0,06...55 kW, toitepinge 3×400 V; kere kaitseaste on IP55 ja mähiste isolatsiooniklass F.

Tabel L.2

2-pooluselised, sünkroonkiirus $n_s = 3000$ p/min

| P_n kW | Tüüp ja suurusaste | n_n p/min | η_n % | $\cos\varphi_n$ | I_n A | I_{st}/I_n | T_n Nm | T_{st}/T_n | T_{max}/T_n | J kgm ² | m kg |
|-------------|-----------------------|----------------|---------------|-----------------|------------|--------------|-------------|--------------|---------------|-------------------------|-----------|
| 0,09 | M2VA 56 A | 2820 | 59,8 | 0,69 | 0,32 | 3,9 | 0,31 | 2,9 | 2,7 | 0,00011 | 3,2 |
| 0,12 | M2VA 56 B | 2840 | 67,2 | 0,64 | 0,41 | 4,1 | 0,41 | 3,2 | 2,8 | 0,00012 | 3,4 |
| 0,18 | M2VA 63 A | 2820 | 73,7 | 0,64 | 0,56 | 4,2 | 0,62 | 3,5 | 3,1 | 0,00013 | 3,9 |
| 0,25 | M2VA 63 B | 2810 | 77,5 | 0,71 | 0,66 | 4,5 | 0,87 | 3,6 | 3,3 | 0,00016 | 4,4 |
| 0,37 | M2VA 71 A | 2840 | 77,1 | 0,72 | 1,0 | 5,5 | 1,25 | 3,8 | 3,9 | 0,0004 | 5,5 |
| 0,55 | M2VA 71 B | 2830 | 79,2 | 0,76 | 1,35 | 5,7 | 1,86 | 3,6 | 3,7 | 0,00045 | 6,5 |
| 0,75 | M2VA 80 A | 2870 | 81,2 | 0,75 | 1,8 | 6,2 | 2,49 | 2,9 | 3,6 | 0,000722 | 9 |
| 1,1 | M2VA 80 B | 2850 | 81,4 | 0,78 | 2,5 | 6,1 | 3,69 | 2,3 | 3,5 | 0,000763 | 11 |
| 1,5 | M2AA 90 S | 2870 | 80,1 | 0,82 | 3,35 | 5,5 | 5 | 2,4 | 3,0 | 0,0019 | 13 |
| 2,2 | M2AA 90 L | 2880 | 83,6 | 0,87 | 4,37 | 7,0 | 7,5 | 2,7 | 3,0 | 0,0024 | 16 |
| 3 | M2AA 100 L | 2900 | 86,0 | 0,88 | 5,95 | 7,5 | 10 | 2,7 | 3,6 | 0,0041 | 21 |
| 4 | M2AA 112 M | 2850 | 86,0 | 0,91 | 7,4 | 7,5 | 13,4 | 2,8 | 3,0 | 0,01 | 25 |
| 5,5 | M2AA 132 SA | 2855 | 86,0 | 0,88 | 10,5 | 6,8 | 18,3 | 2,7 | 3,6 | 0,014 | 37 |
| 7,5 | M2AA 132 SB | 2855 | 87,0 | 0,90 | 13,9 | 7,2 | 25 | 3,2 | 3,8 | 0,016 | 42 |
| 11 | M2AA 160 MA | 2915 | 88,4 | 0,89 | 20,5 | 6,1 | 36 | 2,1 | 2,5 | 0,039 | 73 |
| 15 | M2AA 160 M | 2900 | 89,5 | 0,90 | 27 | 6,1 | 49,4 | 2,4 | 2,6 | 0,047 | 84 |
| 18,5 | M2AA 160 L | 2915 | 90,2 | 0,91 | 32,5 | 6,8 | 61 | 2,6 | 3,0 | 0,053 | 94 |
| 22 | M2AA 180 M | 2925 | 91,2 | 0,89 | 39 | 7,9 | 72 | 2,7 | 3,4 | 0,06 | 111 |
| 30 | M2AA 200 LA | 2945 | 92,0 | 0,88 | 53 | 7,9 | 97 | 3,0 | 3,7 | 0,094 | 139 |
| 37 | M2AA 200 L | 2945 | 92,8 | 0,89 | 65 | 8,2 | 120 | 3,1 | 3,6 | 0,115 | 170 |
| 45 | M2AA 225 M | 2940 | 93,0 | 0,88 | 80 | 7,7 | 146 | 2,8 | 3,0 | 0,21 | 209 |
| 55 | M2AA 250 M | 2960 | 93,5 | 0,90 | 95 | 7,3 | 177 | 2,8 | 3,0 | 0,31 | 277 |

Tabel L.2 (järg)

4-pooluselised, sünkroonkiirus $n_s = 1500$ p/min

| P_n kW | Tüüp ja suurusaste | n_n p/min | η_n % | $\cos\phi_n$ | h A | l_{st}/h | T_n Nm | T_{st}/T_n | T_{max}/T_n | J kgm ² | m kg |
|-------------|-----------------------|----------------|---------------|--------------|----------|------------|-------------|--------------|---------------|-------------------------|-----------|
| 0.06 | M2VA 56 A | 1340 | 51,1 | 0,67 | 0,26 | 2,5 | 0,43 | 2,2 | 2,2 | 0,00017 | 3,2 |
| 0.09 | M2VA 56 B | 1370 | 55,5 | 0,62 | 0,38 | 2,8 | 0,63 | 2,9 | 2,9 | 0,00018 | 3,4 |
| 0.12 | M2VA 63 A | 1400 | 63,7 | 0,59 | 0,46 | 3,1 | 0,82 | 2,6 | 2,6 | 0,00019 | 4 |
| 0.18 | M2VA 63 B | 1380 | 65,6 | 0,64 | 0,63 | 3,1 | 1,25 | 2,5 | 2,6 | 0,00026 | 4,5 |
| 0.25 | M2VA 71 A | 1410 | 70,4 | 0,71 | 0,74 | 4,3 | 1,71 | 2,7 | 2,9 | 0,00066 | 5,5 |
| 0.37 | M2VA 71 B | 1420 | 74,6 | 0,69 | 1,05 | 4,4 | 2,51 | 2,6 | 2,8 | 0,00089 | 6,5 |
| 0.55 | M2VA 80 A | 1390 | 75,3 | 0,76 | 1,4 | 4,6 | 3,75 | 2,6 | 2,9 | 0,001257 | 9 |
| 0.75 | M2VA 80 B | 1410 | 78,2 | 0,74 | 1,9 | 4,7 | 5,08 | 3,5 | 3,9 | 0,001565 | 10,5 |
| 1.1 | M2AA 90 S | 1410 | 77,5 | 0,81 | 2,59 | 5,0 | 7,5 | 2,2 | 2,7 | 0,0032 | 13 |
| 1.5 | M2AA 90 L | 1420 | 80,3 | 0,79 | 3,45 | 5,0 | 10 | 2,4 | 2,9 | 0,0043 | 16 |
| 2.2 | M2AA 100 LA | 1430 | 83,0 | 0,81 | 4,8 | 5,5 | 15 | 2,4 | 2,9 | 0,0069 | 21 |
| 3 | M2AA 100 LB | 1430 | 85,0 | 0,81 | 6,48 | 5,5 | 20 | 2,5 | 2,9 | 0,0082 | 24 |
| 4 | M2AA 112 M | 1435 | 84,5 | 0,80 | 8,6 | 7,0 | 27 | 2,8 | 3,0 | 0,015 | 27 |
| 5.5 | M2AA 132 S | 1450 | 87,0 | 0,83 | 11,1 | 7,3 | 36 | 2,2 | 3,0 | 0,031 | 40 |
| 7.5 | M2AA 132 M | 1450 | 88,0 | 0,83 | 14,8 | 7,9 | 49 | 2,5 | 3,2 | 0,038 | 48 |
| 11 | M2AA 160 M | 1460 | 89,1 | 0,81 | 22 | 6,5 | 72 | 2,7 | 2,6 | 0,067 | 75 |
| 15 | M2AA 160 L | 1460 | 90,4 | 0,82 | 29 | 7,1 | 98 | 2,7 | 3,3 | 0,088 | 92 |
| 18.5 | M2AA 180 M | 1460 | 91,1 | 0,81 | 36,5 | 7,6 | 121 | 3,1 | 3,5 | 0,102 | 110 |
| 22 | M2AA 180 L | 1460 | 91,8 | 0,82 | 42 | 7,9 | 143 | 3,0 | 3,8 | 0,127 | 128 |
| 30 | M2AA 200 L | 1470 | 92,0 | 0,80 | 59 | 7,8 | 195 | 3,0 | 3,4 | 0,225 | 177 |
| 37 | M2AA 225 S | 1475 | 92,8 | 0,85 | 68 | 6,8 | 240 | 3,0 | 3,1 | 0,35 | 216 |
| 45 | M2AA 225 M | 1475 | 93,0 | 0,84 | 84 | 8,1 | 291 | 3,5 | 3,2 | 0,41 | 237 |
| 55 | M2AA 250 M | 1475 | 93,7 | 0,84 | 98 | 6,8 | 356 | 2,5 | 2,6 | 0,5 | 286 |

LISA 3 Firma ABB sagedusmuundurite ACS880-01 kataloogiandmed

ABB sagedusmuundurid ACS880-01 on ühe mootoriga ajami jaoks, kus kasutatakse asünkroonmootorit, püsimagnetitega sünkroonmootorit või servomootorit (harjadeta alalisvoolumootorit).

Siin on toodud kataloogiandmed nendele sagedusmuunduritele, mille võrgutoide on 3 faasi 400 V sagedusel 50 või 60 Hz. Nende sagedusmuundurite võimsustegur on 0,93 kuni 0,95 ja voolu esimese harmoonilise faasinihketegur $\cos\varphi = 0,98$. Kasutegur nimitalitluses on 98%.

Muundurilt antakse mootorile muutuva suuruse ja sagedusega kolmefaasiline pinge. Sagedus on muudetav piirides 0 kuni 500 Hz. Faasijärjestus on muudetav sageduse nullist läbiminekul.

Mootorit saab juhtida kas pöörlemiskiiruse või momendi järgi. Kasutada võib nii avatud kui ka suletud tagasisideahelat. Suletud tagasisideahela kasutamisel on pöörlemiskiiruse hoidmise täpsus püsitalitluses 0,01% nimipöörlemiskiirusest.

Tabelis on toodud sagedusmuunduri nimivool püsitalitluses I_n , maksimaalne vool kestusega kuni 10 sekundit I_{\max} ja mootorile antav nimivõimsus P_n .

Tabel L.3

| Nimiparameetrid | | | Müra dBA | Eraldus- soojus- võimsus W | Jahutus- õhu voog m ³ /h | Tüübitähis | Kõrgus mm | Laius mm | Sügavus mm | Kaal kg |
|-----------------|----------------|-------------|-------------|-------------------------------------|--|------------------|--------------|-------------|---------------|------------|
| I_n A | I_{max} A | P_n kW | | | | | | | | |
| 2,4 | 3,1 | 0,75 | 46 | 30 | 44 | ACS880-01-02A4-3 | 405 | 155 | 227 | 6 |
| 3,3 | 4,1 | 1,1 | 46 | 40 | 44 | ACS880-01-03A3-3 | 405 | 155 | 227 | 6 |
| 4 | 5,6 | 1,5 | 46 | 52 | 44 | ACS880-01-04A0-3 | 405 | 155 | 227 | 6 |
| 5,6 | 6,8 | 2,2 | 46 | 73 | 44 | ACS880-01-05A6-3 | 405 | 155 | 227 | 6 |
| 7,2 | 9,5 | 3 | 46 | 94 | 44 | ACS880-01-07A2-3 | 405 | 155 | 227 | 6 |
| 9,4 | 12,2 | 4 | 46 | 122 | 44 | ACS880-01-09A4-3 | 405 | 155 | 227 | 6 |
| 12,6 | 16 | 5,5 | 46 | 172 | 44 | ACS880-01-12A6-3 | 405 | 155 | 227 | 6 |
| 17 | 21 | 7,5 | 51 | 232 | 88 | ACS880-01-017A-3 | 405 | 155 | 250 | 8 |
| 25 | 29 | 11 | 51 | 337 | 88 | ACS880-01-025A-3 | 405 | 155 | 250 | 8 |
| 32 | 42 | 15 | 57 | 457 | 134 | ACS880-01-032A-3 | 471 | 172 | 262 | 10 |
| 38 | 54 | 18,5 | 57 | 562 | 134 | ACS880-01-038A-3 | 471 | 172 | 262 | 10 |
| 45 | 64 | 22 | 62 | 667 | 200 | ACS880-01-045A-3 | 573 | 203 | 275 | 18,5 |
| 61 | 76 | 30 | 62 | 907 | 200 | ACS880-01-061A-3 | 573 | 203 | 275 | 18,5 |
| 72 | 104 | 37 | 62 | 1117 | 280 | ACS880-01-072A-3 | 730 | 203 | 274 | 23 |
| 87 | 122 | 45 | 62 | 1120 | 280 | ACS880-01-087A-3 | 739 | 203 | 274 | 23 |
| 105 | 148 | 55 | 67 | 1295 | 435 | ACS880-01-105A-3 | 726 | 252 | 357 | 45 |
| 145 | 178 | 75 | 67 | 1440 | 435 | ACS880-01-145A-3 | 726 | 252 | 357 | 45 |
| 169 | 247 | 90 | 67 | 1940 | 450 | ACS880-01-169A-3 | 880 | 284 | 365 | 55 |
| 206 | 287 | 110 | 67 | 2310 | 450 | ACS880-01-206A-3 | 880 | 284 | 365 | 55 |
| 246 | 350 | 132 | 65 | 3300 | 550 | ACS880-01-246A-3 | 963 | 300 | 386 | 70 |
| 293 | 418 | 160 | 65 | 3900 | 550 | ACS880-01-293A-3 | 963 | 300 | 386 | 70 |
| 363 | 498 | 200 | 68 | 4200 | 1150 | ACS880-01-363A-3 | 955 | 380 | 414 | 98 |
| 430 | 617 | 250 | 68 | 4800 | 1150 | ACS880-01-430A-3 | 955 | 380 | 414 | 98 |

KIRJANDUS

1. Chapman, S. J. (2005). *Electric Machinery Fundamentals*. 4th ed. New York : McGraw-Hill.
2. Jänes, H., Kaasik, P., Puusepp, E., Voldek, A. (1961). *Elektrimasinad*. Tallinn : Eesti Riiklik Kirjastus.
3. Lehtla, T. (2007). *Elektriajamid*. Tallinn : Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus.
4. McPherson, G., Laramore, R. D. (1990). *An Introduction to Electrical Machines and Transformers*. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons.
5. Mohan, N., Undeland, T. M., Robbins, W. P. (1995). *Power Electronics : Converters, Applications, and Design*. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons.
6. Voldek, A. (1972). *Elektrimasinad, I. Alalisvoolumasinad ja transformaatorid*. Tallinn : Valgus.
7. Voldek, A. (1973). *Elektrimasinad, II. Vahelduvvoolumasinad*. Tallinn : Valgus.
8. Vörk, R., Mägi, V. (1989). *Elektrotehnika*. 3. täiend. tr. Tallinn : Valgus.