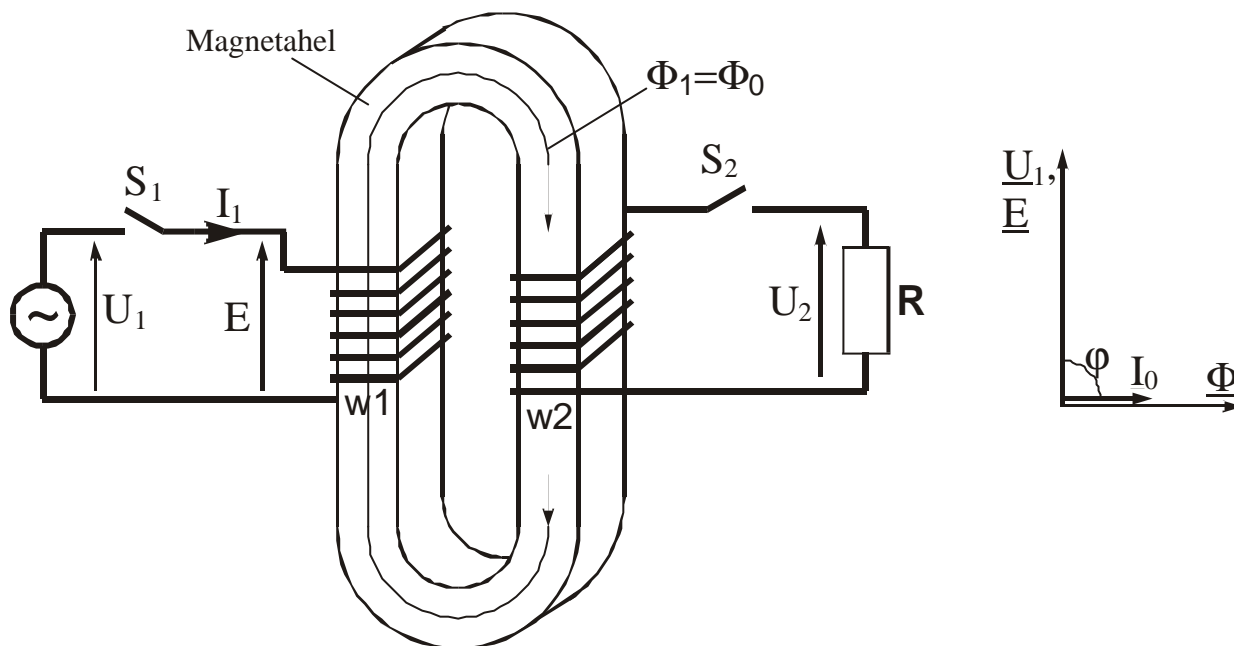


3. TRAFOD

3.1. Trafo töötamis põhimõte

Trafo ehk transformator on seade, mis muundab vahelduvvoolu elektrienergiat ühelt pingetasemelt (voltage level) teisele pingetasemele magnetvälja abil. Näiteks 10kV 50Hz pingetase muundatakse tasemeks 230V 50Hz. Sagedust trafo ei muuda. Alalisvoolu ei suuda trafo üle kanda. Trafo konstruktsioon on lihtne. Ta koosneb kahest või enamast **mähisest**, mis on keritud ühisele ferromagnetilisele **südamikule** (joonis 3.1).



Joonis 3.1. Trafo ehitus ja idealiseeritud tühijooksu faasordiagramm

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 $f < 150\text{Hz}$ valmistatakse südamik 0,35...0,50mm paksustest elektrotehnilise terase lehtedest.

Trafo lülitamisel lüliti S_1 abil siinuspingele U_1 tekib mähises w_1 vool I_1 . See vool tekitab piki südamikku **magnetvoo** F_1 . Muutuv magnetvoo indutseerib mõlemas mähises **elektromotoorjõu**. Kui lüliti S_2 on suletud, siis tekib sekundaarahelas ka vool I_2 , mida nimetatakse **koormusvooluks**. Kui lüliti S_2 on avatud, siis sekundaarvool puudub. Seda olukorda nimetatakse **tühijooksuks**. Primaarvool I_1 on olemas ka tühijooksul ja seda voolu nimetatakse siis **tühijooksuvooluks** ehk **magneetimisvooluks**.

3.1.1. Kadudeta trafo tühijooksul

Jätame esialgu trafosüdamikus esineva hüstereesi- ja pöörisvoolukao arvestamata. Samuti ignoreerime suhteliselt väikest aktiivvõimsuse kadu, mis tekib voolu läbiminekul primaarmähisest. Faraday seaduse järgi on magnetvoo F_1 ja indutseeritud elektromotoorjõud e_1 seotud järgnevalt

$$e_1 = -w_1 \frac{dF}{dt}, \quad (3.1)$$

kus w_1 on primaarmähise keerdude arv.

Kui trafo primaarahelas takistus puudub, siis igal ajamomendil peab elektromotoorjõu hetkväärtus e_1 olema võrdne primaarpinge hetkväärtusega, mis muutub siinusseaduse $u_1 = U_{1m} \sin \omega t$ kohaselt. Järelikult me võime sel juhul avaldises (3.1) elektromotoorjõu e_1 asendada pingega u_1 ja saame

$$U_{1m} \sin \omega t = -w_1 \frac{dF}{dt}. \quad (3.2)$$

Avaldise (3.2) vasak pool kirjeldab muutuvat pinget ja parem pool muutuvat magnetvoogu. Kui Faraday seadus kirjeldab magnetvoo muutumisel tekkivat elektromotoorjõudu, siis (3.2) kirjeldab vastupidist protsessi, see on pinge mõjul tekkivat magnetvoo muutust. Meid huvitab, millise seaduspärasuse järgi toimub magnetvoo muutus. Selleks teisendame avaldist (3.2) järgnevalt

$$dF = -\frac{U_1 \sqrt{2}}{w_1} \cdot \sin \omega t dt$$

ja integreerimisel saame

$$\Phi = -\frac{U_1 \cdot \sqrt{2}}{w_1} \int \sin \omega t dt = \frac{U_1 \sqrt{2}}{2p f w_1} \cdot \cos \omega t + K, \quad (3.3)$$

kus siinuspinge korral $K=0$ ja f on toitepinge sagedus ($\omega = 2\pi f$) ja $\int \sin \omega t dt = \frac{1}{\omega} \cos \omega t + K$

Järelikult pinge muutumisel siinusseaduse järgi muutub magnetvoog koosinusseaduse järgi. Magnetvoo F kõver jääb pingekõverast 90° maha, nagu on näidatud joonisel 3.1 toodud faasordiagrammil. Idealiseeritud tühijooksuvool I_0 on samuti siinuseline ja magnetvooga samas faasis. Sellega on voolu ja pinge vaheline faasinihkenurk f võrdne 90° -ga. Kadudeta trafo poolt tühijooksul tarbitav aktiivvõimsus

$$p = U_1 I_0 \cos 90^\circ = 0 \quad (3.4)$$

ja

$$Q = U_1 I_0 \sin 90^\circ = U_1 I_0. \quad (3.5)$$

Reaktiivvõimsuse tarbimine võrgust on trafo tööks paratamatult vajalik. Muidu ei saa tekitada muutuvat magnetvoogu, aga ilma selleta ei saa indutseerida sekundaarpinget.

Kadude esinemisel on f veidi väiksem kui 90° ja (3.4) järgi määratav aktiivvõimsus on nullist suurem. Avaldist (3.3) võib kirjutada ka kujul

$$F = F_m \cdot \cos \omega t,$$

kus

$$F_m = \frac{U_1 \sqrt{2}}{2p f w_1}. \quad (3.6)$$

Avaldisest (3.6) võime teha kaks järeldust. Esiteks väheneb magnetvoo amplituud sageduse f kasvamisel. Kui magnetvoog on väiksem, siis me võime vähendada ferromagnetilise südamikuga (s.o. magnetahela) ristlõiget. Sellega muutub ka mähise keeru pikkus lühemaks ja kogu trafo tuleb väiksem ja kergem. Kui 50Hz asemel kasutada sagedust 500Hz, tuleks samal võimsusel trafo kaal umbes 10 korda väiksem. Miks siis kasutatakse elektrienergia ülekandel ja jaotamisel 50Hz sagedust. Põhjus on selles, et koos sageduse kasvuga suureneb reaktiivvõimsus. Sagedus 50Hz (või 60Hz nagu USA-s) oli optimumi lähedane umbes aastal 1900. Praegu loetakse optimumiks umbes 400 Hz, kuid energiasüsteemi ja tarbijaid ei saa välja vahetada. See on ülimalt kallis.

Teiseks järeldub avaldisest (3.6), et magnetvoog väheneb primaarmähise keerdude arvu kasvamisel. Selle tõttu on väikese südamikuga trafo primaarmähisel alati palju rohkem keerde, kui suure südamikuga trafo, kui pinge ja sagedus on samad.

Avaldisest (3.6) saab leida ka primaarpinge U_1 , mis eelpool tehtud lihtsustuste tõttu (aktiivkadude ignoreerimine) on võrdne mähises indutseeritud vastu-elektromotoorjõuga, $U_1 = E_1$. Selle tõttu võime kirjutada

$$E_1 = \sqrt{2} p f w_1 F_m = 4,44 f w_1 F_m. \quad (3.7)$$

Elektromotoorjõud on sõltumatu ahela takistusest. Selle tõttu kehtib avaldis (3.7) ka reaalseste kadudega trafo korral ja seda nimetatakse transformatoorse elektromotoorjõu võrrandiks. See on üks trafo põhiseostest siinuspinge korral.

Avaldist (3.7) võime me kasutada ka sekundaarmähise elektromotoorjõu E_2 leidmiseks, kui me paneme sellesse avaldisse sekundaarmähise keerdude arvu w_2

$$E_2 = 4,44 f w_2 F_m. \quad (3.8)$$

Trafo primaarmähise ja sekundaarmähise elektromotoorjõudude suhet nimetatakse trafo **ülekandeeguriks**, mida tähistatakse k_{12} ,

$$\frac{E_1}{E_2} = k_{12}. \quad (3.9)$$

Avaldiste (3.7) ja (3.9) teisenduse põhjal

$$k_{12} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (3.10)$$

Ülekandeegur on võrdne ka keerdude arvu suhtega. Ingliskeelses kirjanduses on keerdude suhe (turns ratio) kasutusel ülekandeeguri tähenduses. Lineaarne seos keerdude arvu ja elektromotoorjõu vahel järeldub ka otseselt Faraday seadusest $e = -w dF/dt$. **Pinge vähendamiseks peab sekundaarmähise keerdude arv olema väiksem kui primaarmähisel.**

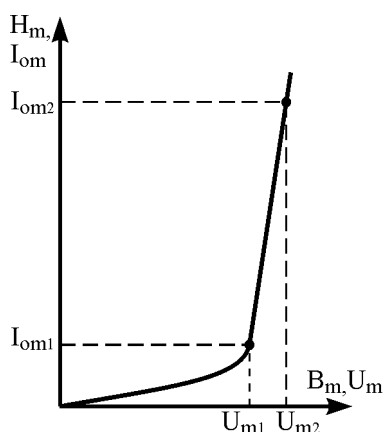
Transformatoorse elektromotoorjõu võrrandit võib järgnevalt teisendada

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m = 4,44 f w_1 B_m \cdot S, \quad (3.11)$$

kus B_m – magnetvootiheduse amplituud trafosüdamikus,

S – trafosüdamiku plekkide ristlõige.

Magnetvootiheduse amplituud on piiratud trafosüdamiku küllastusega ja on sõltuvalt südamiku materjalist piirides 1,0...1,7 Wb/m². Trafo konstrueeritakse nii, et selline magnetvootiheduse amplituud tekib trafo nimipingel. Sellise magnetvootiheduse amplituudi juures jääb trafo tühijooksuvool suhteliselt väikeseks (tavaliselt alla 10% nimivoolust). Kui trafote rakendatakse nimipingest suurem pinge, siis suureneb magneetimisvool väga järsult. Seda selgitab joonis 3.2.



Joonis 3.2. Trafo tühijooksuvoolu järsk suurenemine, kui pinge ületab nimipinge

Trafosüdamiku magnetvootihedus B suureneb proportsionaalselt pingega U , mis avaldisest (3.2). Teisest küljest on trafo tühijooksuvoolu I_0 ja südamiku magnetväljatugevuse H vahel lineaarne sõltuvus, mis järeldub koguvoolu seadusest. Selle tõttu on trafo pingeamplituudi U_m ja tühijooksuvoolu amplituudi I_{0m} vahelise sõltuvuse $I_{0m} = f(U_m)$ kõver joonisel 3.2 sarnane trafosüdamiku materjali magneetimiskõverale $B_m = f(H_m)$. Nimipingel juures on joonisel 3.2 näidatud pingeamplituud U_{m1} ja tühijooksuvoolu amplituud I_{0m1} . Kui pinge suureneb näiteks 20% üle

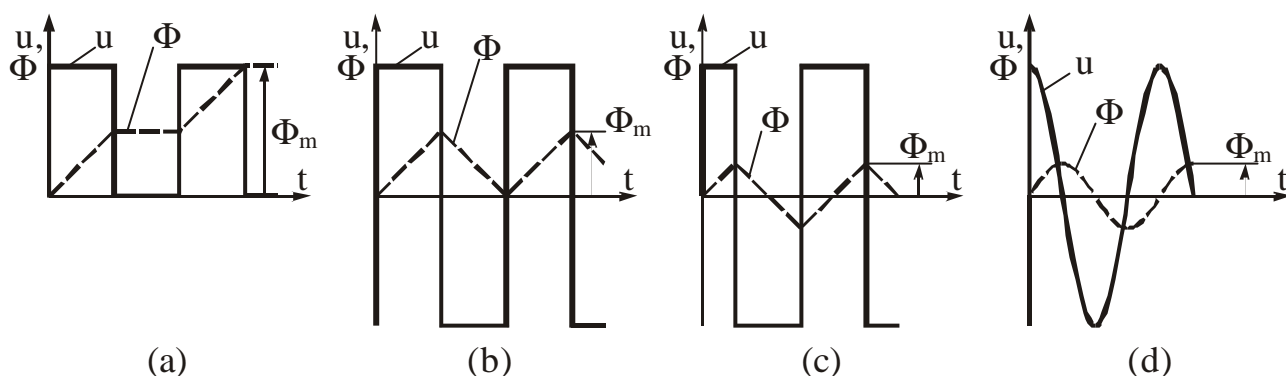
nimipinge (U_{m2}), siis suureneb tühijooksuvool umbes 5 korda (I_{0m2}) ja moodustab juba kuni poole nimivoolust. Kui aga trafole rakendada nimipingest 1,5...2 korda suurem pinge, siis läheb tühijooksuvool nimivoolust palju suuremaks ja trafo isolatsioon rikneb ülekuumenemise tõttu isegi koormuse täielikul puudumisel. Nimipingest väiksemal pingel töötab trafo probleemideta.

Avaldist (3.8) võime me kasutada ka trafomähiste keerdude arvu määramiseks juhul kui meil on näiteks mingi vana magnetahela plekipakk ja me soovime sinna kerida uued mähised. Primaarmähise keerude arv avaldub kujul

$$w_1 = U_1 / 4,44 f B_m \cdot S \quad (3.12)$$

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

Muundurites kasutatavatel trafodel võib siinuspinge asemel olla ka nelinurkpinge.



Joonis 3.3. Magnetvoo muutus trafos ; (a) – ühe polaarsusega impulsid; (b) – kahe polaarsusega impulsid; (c) – kahe polaarsusega impulsid, kus esimene impulss on poole lühem; (d) – siinuspingel

Joonisel 3.3 on näidatud magnetvoo muutused selle juhu jaoks. Lihtsuse mõttes on kadudeta ja puistetada trafo. Nelinurkimpulsi kestel on pinge väärtus konstantne. Avaldis (3.2) omab sel juhul peale teisendamist kuju

$$dF = -\frac{U_1}{w_1} dt. \quad (3.13)$$

Märki miinus ei tarvitse antud juhul arvestada ja integreerimisel saame

$$F = \frac{U_1}{w_1} t + K. \quad (3.14)$$

K on siin magnetvoo algväärtus pingeimpulsi algul. Pingeimpulsi kestel kasvab magnetvoog ajas lineaarselt. Kui pingeimpulsid on ühe polaarsusega ja nende vahel on paus (joonis 3.3a), siis pausi ajal on pinge võrdne nulliga. Magnetvoo väärtus sel ajal ei muutu. Selle tõttu ka magneetimisvool peab olema konstantne. See on võimalik, kui elektri ahela takistus on võrdne nulliga. Ka pingeallika sisetakistus on null. Reaalselt seda harilikult ei ole ja kahe impulsi vahel magnetvoog väheneb veidi.

Uue pingeimpulsi ajal hakkab magnetvoog endises suunas kasvama. Lõpuks muutub magnetvoog alati nii suureks, et südamik küllastub. Sel juhul magnetvoo edasise suurenemise jaoks peab magneetimisvool väga järsult kasvama hakkama. Idealiseeritud juhtumil (nelinurkne magneetimiskõver) muutub vool lõpmata suureks. Tegelikult omandab vool mingi lõpliku väärtuse ja magnetvoo suurenemine lõpeb. Siis kaob täielikult ka indutseeritud elektromotoorjõud ja sekundaarpinge. Siit saab selgeks, et ühepolaarsetel impulssidel ja alalisvoolul läheb trafo kiiresti küllastusse ja lakkab funktsioneerimast. Enamgi veel. Primaarvool muutub mitukümmend korda

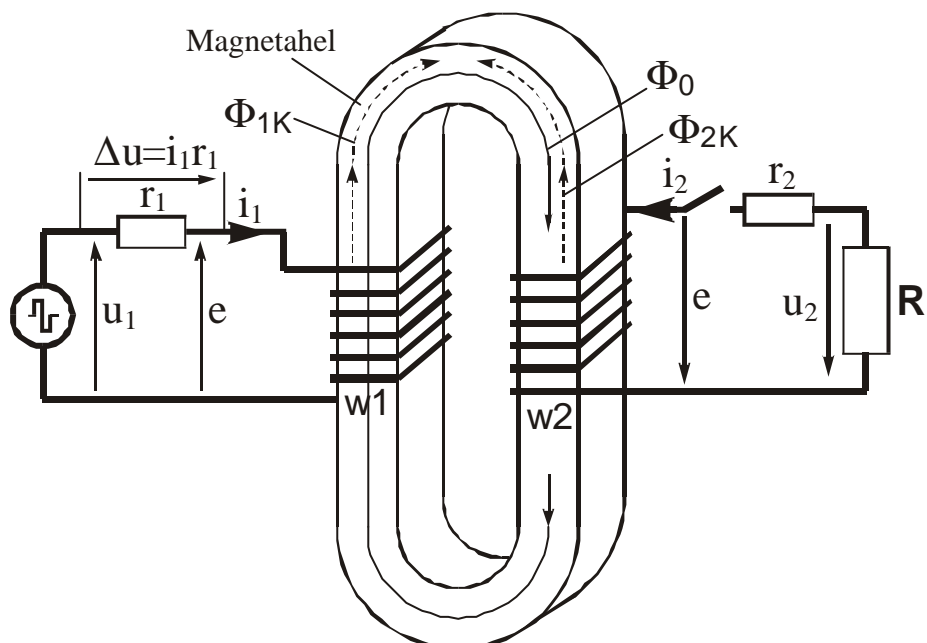
suuremaks arvutuslikust nimivoolust, trafomähis kuumeneb üle ja isolatsioon rikneb. Seda muidugi juhul, kui puudub kaitse, mis liiga suure voolu puhul trafo välja lülitab.

Kui impulsside polaarsus vaheldub, siis negatiivse impulsi ajal muutub magnetvoog alanemise suunas ja trafo küllastusse ei lähe. Töövõime säilib. Vahelduva polaarsusega pingel aga võib magnetvoog (ja ka magneetimisvool) olla ühepolaarne nagu joonisel 3.3b. Magnetahela jaoks on parem joonisel 3.3c toodud variant, kus magnetvoog on vahelduva polaarsusega. Samal pingel on magnetvoo amplituud F_m siis kaks korda väiksem. Vahelduva magnetvooga talitluse võib saada sel teel, et anda esimene pingepulss poole lühem. Siinuspingel korral saadakse kohe ilma alaliskomponendita magnetvoog, kui trafo lülitatakse sisse võrgupinge maksimumi ajal (joonis 3.3d). Kui sisselülitus on mõnel teisel ajamomendil, siis tekib alaliskomponent, mis aga reaalsetel trafodel sumbub mõnekümne toitepinge perioodi jooksul (alaliskomponendi korral ei ole positiivne ja negatiivne poolperiood võrdsed).

Nelinurkpingel korral on pingel ja magneetimisvoolu kõverate kujud erinevad. Magneetimisvool on kolmnurkakuju, pingel on nelinurkakuju. Siinuspingel on need kõverate kujud idealiseeritud juhul sarnased. Reaalsetes trafodes esinev magneetimisvoolu kõver on aga osalise küllastuse tõttu moonutatud.

3.1.2. Primaarvoolu koormuskomponendi tekkimine sekundaarvoolu mõjul

Vaatame trafo sekundaarvoolu poolt põhjustatud primaarvoolu ehk täpsemalt primaarvoolu koormuskomponenti. Sealjuures eeldame lihtsuse huvides, et kõik magnetvälja jõujooned haaravad mõlemat mähist ja mähiste keerdude arvud on võrdsed. Tegelikuses erinevad puistevälju me ignoreerime. Sealjuures peame silmas, et voolu läbimisel mähistest tekib seal teatud pingelang. Me võime ka ette kujutada, et mähised on ilma takistuseta aga selle eest on mähistega järjestikku lülitatud resistorid r_1 ja r_2 nagu joonisel 3.4.

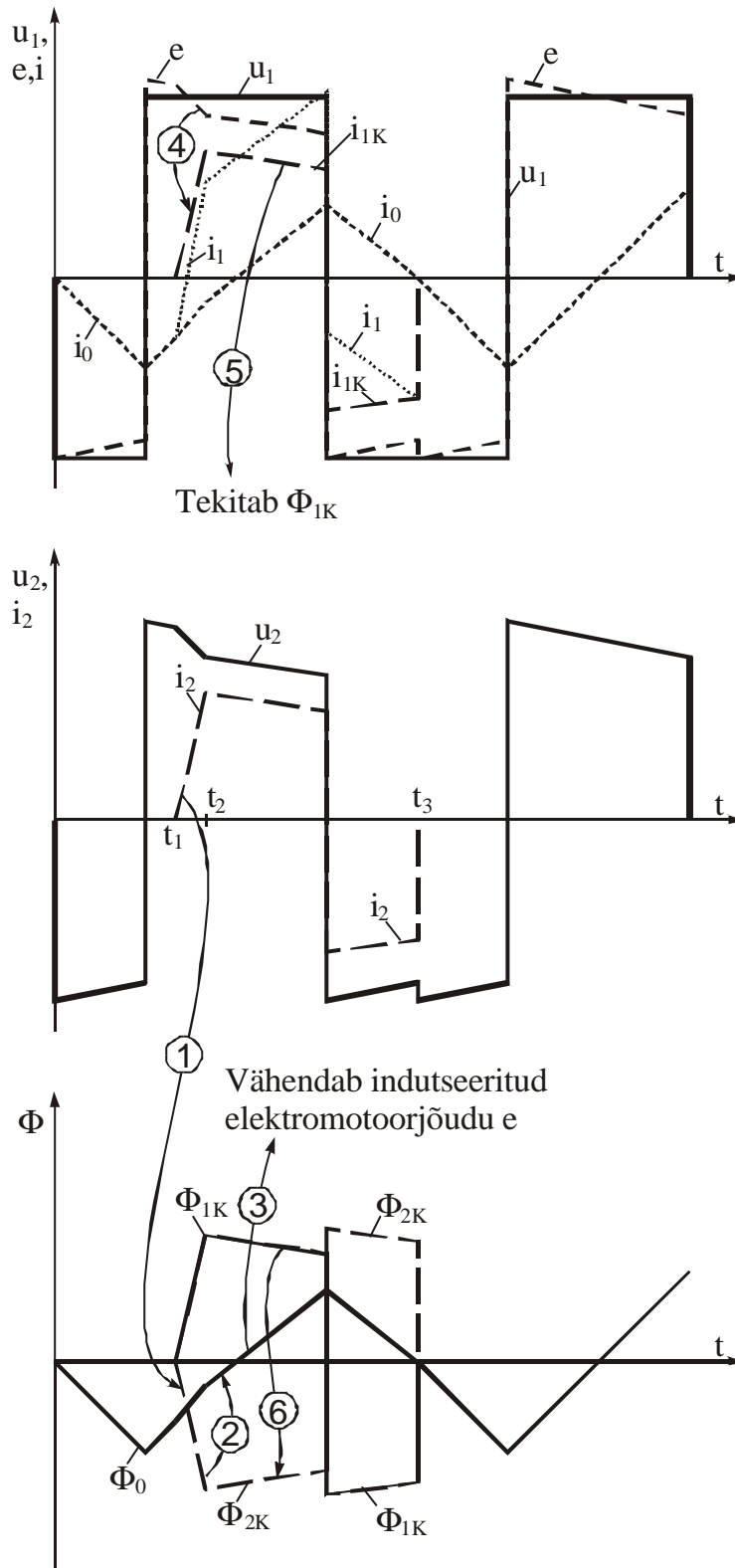


Joonis 3.4. Trafo koormamine vooluga

Oletame, et trafo primaarmähis lülitatakse nelinurkpingele u_1 (ostsillogramm joonisel 3.5). Ajamomendil t_1 lülitatakse sisse koormustakisti R ja tekib sekundaarvool i_2 . Koormustakisti väärtust vähendatakse kuni ajamomendini t_2 . Siis hoitakse koormustakistus konstantne ja ajamomendil t_3 lülitatakse koormus välja. Sekundaarahela koormusvoolu mõjul tekivad trafos

järgmised protsessid. Protsessi käigus esinevad mõjud on joonisel 3.5 näidatud nooltega 1 kuni 6. Need mõjud on järgmised.

1. Vool i_2 tekitab magnetahelas magnetvoo F_{2K} .
2. Magnetvoog F_{2K} on Lenzi seaduse järgi vastassuunaline magneetimisvoolu i_0 magnetvooga F_0 ja vähendab seda veidi (vaata ka magnetvoo suundi joonisel 3.4).



Joonis 3.5. Primaarvoolu koormuskomponendi i_{1k} tekkimine sekundaarvoolu i_2 mõjul

3. Magnetvoo F_0 vähenemise tõttu väheneb indutseeritud vastuelektromotoorjõud e (võrdle vastuelektromotoorse jõuga järgmisel positiivsel pingepulsil, kus koormusvool i_2 puudub).
4. Vastuelektromotoorjõu e vähenemise tõttu suureneb pinge U takistil r_1 . Selle tulemusena suureneb Ohmi seaduse kohaselt vool. Tekib primaarvoolu koormuskomponent i_{1K} .
5. Primaarvoolu koormuskomponent i_{1K} tekitab magnetahelas oma magnetvoo F_{1K} .
6. Primaarvoolu koormuskomponendi magnetvoog F_{1K} on vastassuunaline sekundaarvoolu magnetvooga F_{2K} ja need vood kompenseeruvad. Selle tõttu magneetimisvoog F_0 väheneb ainult pingelangu U kasvamise tõttu ja see vähenemine on väike.

Lühemalt öeldes *sekundaarvoolu väli hävitab magneetimisvoolu välja ja magneetimisvoolu välja taastamiseks võetakse toiteallikast voolu juurde. Energiavahetuse protsess käib välja kaudu. Primaarpoolelt võetava koormusvoolu energia muutub välja energiaks ja välja energia muutub sekundaarvoolu energiaks.* Kui me punktis 2.1 vaatasime, et elektrivool tekitab alati magnetvälja ja viib sinna energia, siis siin on ka vastupidine protsess, magnetväli viib voolule energiat. Harilikult tagajärg ilmneb peale põhjust teatud aja pärast. Põhjuse ja tagajärje vahel on ajavahe. Voolu tekke ja tema magnetvälja tekke vahel ajavahe puudub absoluutselt. Voolu ja tema magnetvälja suhe on selle poolest unikaalne. Selle tõttu küsimus, mis on primaarne, kas vool või väli, muutub mõttetuks. Väli võib olla sama hästi primaarne kui vool. Sellel põhineb trafo töö. Eelkirjeldatud protsessi sammud ei järgne üksteisele ajaliselt. Kõik toimub üheaegselt. Et aga toimuvat mõista, on kasulik asja vaadata kuue järoneva sammuna.

Trafo primaarmähises magneetimisvool i_0 ja primaarvoolu koormuskomponent i_{1k} summeeruvad ja annavad kokku voolu i_1 (peen punktiirjoon joonisel 3.5).

Trafo elektromotoorjõu e kõver erineb primaarpinge kõverast, sest primaarmähise takistusel (r_1 joonisel 3.4) tekib pingelang. Ristkülikimpulsi alguses on tühi jooksul elektromotoorjõud pingest suurem, sest sel ajal antakse magnetahela magnetvälja salvestatud energiat toiteallikasse tagasi (vool on vastupidi pinge suunale). Kui magneetimisvoolu hetkväärtus võrdub nulliga ja koormusvool puudub, siis sel ajamomendil on elektromotoorjõud võrdne primaarpingega (vaata parempoolset positiivset pingepulssi joonisel 3.5). Elektromotoorjõu suurust vähendab nii magneetimisvool kui ka koormusvool, mis mõlemad tekitavad mähise takistusel pingelangu. Sekundaarpinge erineb elektromotoorjõust veel sekundaarmähise takistusel r_2 tekkiva pingelangu poolest, kuid on antud juhul elektromotoorjõu kõveraga sarnane. Sekundaarpinge kõveral on hästi näha koormusvoolust tingitud sekundaarpinge vähenemine.

Reaalse trafo voolu ja pinge kõverad erinevad mõnevõrra joonisel 3.5 toodud kõveratest, sest reaalses trafos primaar- ja sekundaarmähise magnetvood erinevad puistevoogude tõttu alati.

3.2. Trafode konstruktsioon, liigid ja kasutamine

3.2.1. Elektrienergia parameetrite valik ja muutmise

On üldtuntud, et 100-vatine hõõglamp annab rohkem valgust kui 40-vatine. Võimsus on elektriseadet iseloomustavaks põhiparameetrik.

100-vatise võimsuse võime me saada pingel 10 V ja voolul 10 A. Kuid võime valida ka pinge 100 V ja voolu 1 A ja põhimõtteliselt ka pinge 1 V ja voolu 100 A. Hõõglambi võimsus P on määratud tema pinge U ja voolu I korrutisega, mida võib kirjutada kujul

$$P=U_1I_1=U_2I_2=U_3I_3. \quad (3.15)$$

Seda avaldist võib tõlgendada nii, et *sama võimsuse ülekandmiseks võib valida erinevad pingeniivood.*

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

Kui aga pingeallika pinge on 1000 V, siis sellisele pingele 100-vatise lambi valmistamine muutub liiga keeruliseks ja kalliks. Hõõgniit muutub ülimalt pikaks ja peeneks ja tema toestamisega kuumas olekus on probleeme. Siin on muunduri kasutamine parem lahendus.

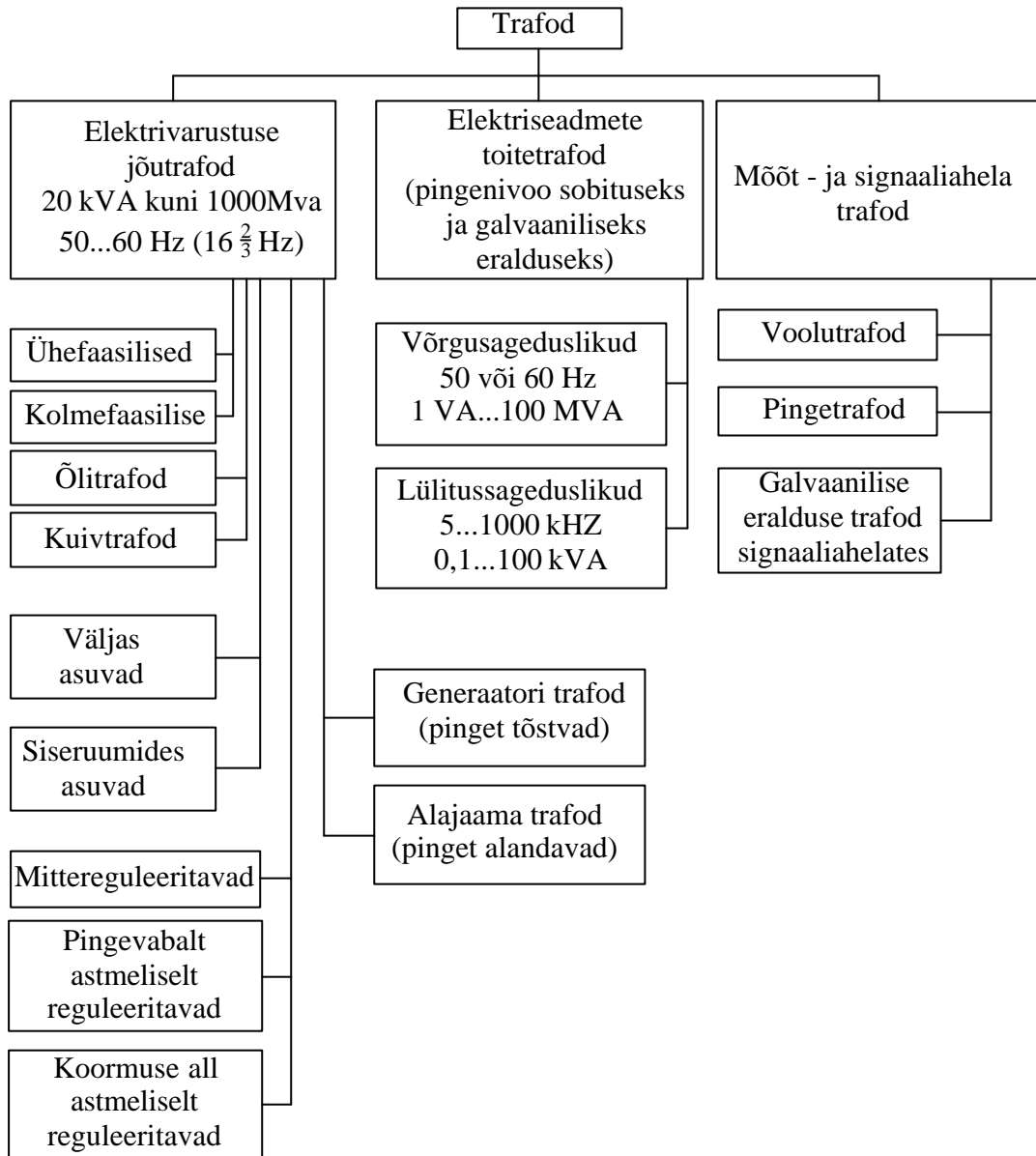
Kui pingeallika pinge on 1 V, siis sellisele pingele 100-vatise hõõgniidi valmistamine ei ole seotud suurte raskustega, kuid suured raskused on ühendusjuhtmetega, sest vool on 100 A. Kui me lubame ühendusjuhtmetes kao 1%, siis on vaja, et pingelang juhtmetes $U=0,01 \cdot 1=0,01$ V ja juhtmete takistus $R=0,01/100=0,0001 \Omega$. Kui näiteks liin toiteallikast lambini on 10 m, siis peavad liiniks olema 6,6 cm läbimõõduga vaskvardad. See oleks ennenägematu vase raiskamine. Võrdluseks märgime, et 100-voldise pinge ja muude võrdsete tingimuste juures kujuneb juhtme vajalikuks läbimõõduks 0,66 mm,

Nagu näeme on juhtme vajalik läbimõõt pöördvõrdeline pingega. Mida suurem pinge seda peenemad juhtmed. Kuid suurem pinge on ohtlikum ja nõuab ka paksemat isolatsiooni, et ei tekiks läbilööki. Selle tõttu ei ole liiga kõrge pinge hea. Osutub, et ligikaudu optimaalse liini pinge saab määrata kauguse järgi pingeallika ja tarbija vahel. Kui valida 1 volt 1 meetri kohta ehk 1000 V kilomeetrile, siis saamegi optimaalsele lähedase pinge. Kuna nii liinide kui ja tarbijate pinged ei ole vabalt valitavad ja üldjuhul ka mitte võrdsed, siis on muundurite kasutamine paratamatu.

Oluline on, et need muundurid oleksid võimalikult töökindlad, väikeste kadudega ja odavad. Neile kriteeriumidele vastab küllalt hästi eelpool vaadeldud trafo. Kui alles elektrit kasutama hakati, siis olid kaugused generaatori ja tarbijate vahel väikesed ja kasutati alalisvoolu. Hiljem mindi üle vahelduvvoolule ja siis sai hakata kasutama elektrienergia kaugülekannet, kus pika ülekandeliini algul on trafo, mis tõstab pinge üles ja liini lõpus on teine trafo, mis muudab pinge madalamaks, nagu see on elektritarvitite jaoks vajalik. Alalisvoolu puhul ei olnud see võimalik.

Möödunud sajandi lõpul ilmusid siiski ka pooljuhtmuundurid, mille abil saab ka alalisvoolu pinget muuta. Sellele vaatamata trafode kasutamine jätkub ja paljudel juhtudel on trafod asendamatud. Trafo primaarmähis ja sekundaarmähis on elektriliselt isoleeritud ehk teisiti väljendatult galvaaniliselt eraldatud. Selle tõttu ei satu näiteks ohtlik kõrgepingeliini pinge elamusse.

Trafode kasutamist iseloomustab joonisel 3.6 toodud klassifikatsioon.



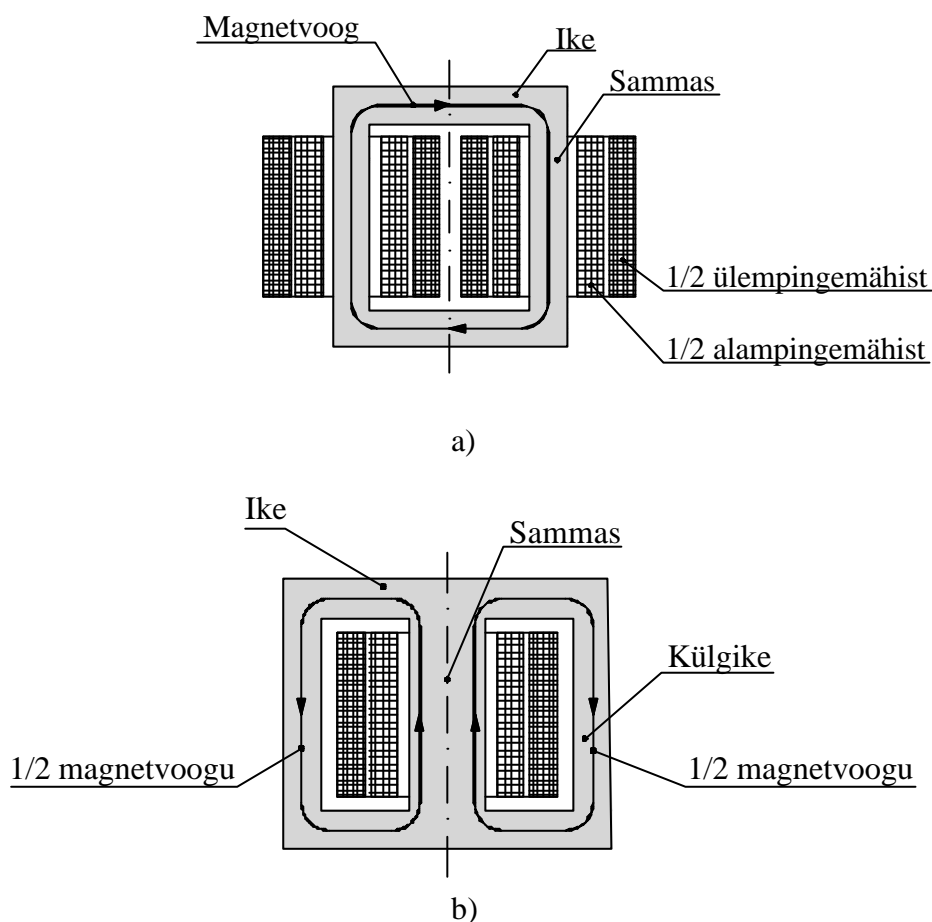
Joonis 3.6. Trafode klassifikatsioon

3.2.2. Trafode magnetahelad

Sõltuvalt magnetsüdamikkude konstruktsioonist jaotatakse trafod sammas- ja manteltrafodeks. Ühefaasiline **sammastrafo** (joonis 3.7) koosneb kahest **sambast**, millele paigutatakse mähis ja kahest **ikkest**, mille abil saadakse kinnine magnetahel. Kumbki mähis koosneb kahest osast, mis on paigutatud kahele sambale ja ühendatud omavahel kas järjestikku või rööbiti.

Primaar- ja sekundaarmähise selline kontsentriline paigutus lähendab neid teineteisele ja suurendab nende elektromagnetilist sidestust.

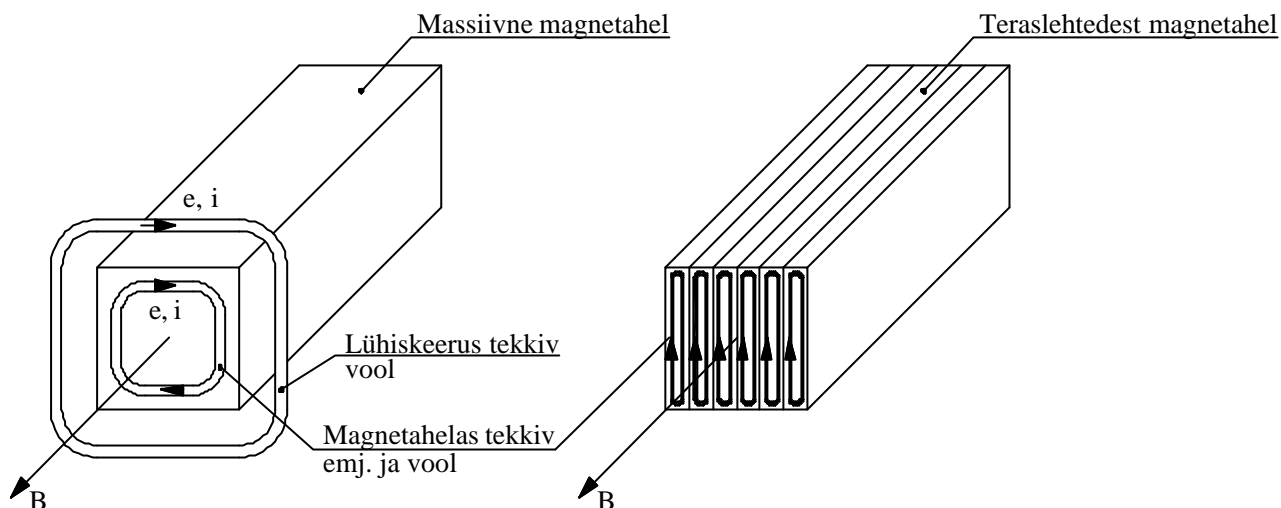
Ühefaasilisel **manteltrafol** (joonis 3.7b) on üks mähistega sammas ja hargnev ike, mis osaliselt katab mähist (nagu "mantel").



Joonis 3.7. Sammastrafo (a) ja manteltrafo (b), mis on näidatud lõikes

50...60 hertsi sagedusel 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 pöörivoolukadusid, kuid muudab teraslehed kõvaks ja rabadaks. Süsinik halvendab elektrotehnilise terase omadusi ja seda välditakse.

Õhukeste teraslehtede kasutamise vajadus on tingitud sellest, et massiivses magnetahelas tekivad suured pöörivoolud ja pöörivoolukaod.



Joonis 3.8. Pöörivoolu kontuurid massiivses ja teraslehtedest koostatud magnetahelas

Vahelduva magnetvoo korral indutseeritakse elektromotoorjõud kõikides kontuurides, mida see magnetvoog läbib (Faraday seadus). Kui kontuur on juhtiv, siis tekib seal ka elektrivool. Joonise 3.8 vasakul pool on näidatud massiivse magnetahela osa, mida läbib vahelduvvoog. Elektromotoorne jõud ja vool indutseeritakse seal nii magnetahela ümber olevas lühiskeerus asuvas kontuuris (seda lühiskeerdu on näidatud probleemi olemuse selgitamiseks) kui ka igas juhtivas kontuuris, mis asub selle magnetahela enda sees. Massiivse magnetahela korral on voolukontuuri ristlõige suur, takistus väike ja pöörivool suur. Voolu läbiminekutõttu magnetahel kuumeneb. Kuumenemine toimub magnetahelat läbiva vahelduvvoo energia arvel. Magnetväljas kadumamineva energia asendamiseks võetakse toiteallikast uut juurde. Tekkivat energiakadu nimetatakse **pöörivoolukaoks**.

Kui me valmistame magnetahela omavahel isoleeritud teraslehtedest, nagu on näidatud joonisel 3.8 paremal pool, siis saab vool tekkida ainult kontuurides, mis asuvad ühe teraslehe sees. Lehe väikese paksuse tõttu on voolukontuuri ristlõige väike, takistus suur ja tekkinud pöörivool väike.

Pöörivoolukao P_e suuruse saab määrata avaldisega

$$P_e = V \cdot K_e f^2 \cdot t^2 \cdot B_{\max}^2 ; \quad (3.16)$$

kus V – magnetahela ruumala;

K_e – magnetahela materjali eritakistust ja kasutatavaid mõõtühikuid arvestav tegur;

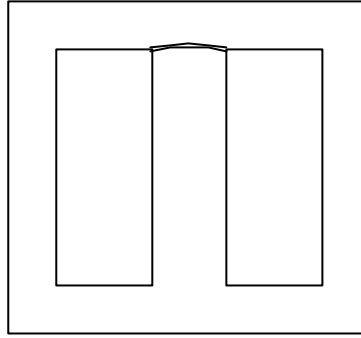
f – sagedus;

t – teraslehe paksus;

B_{\max} – magnetvootiheduse amplituud.

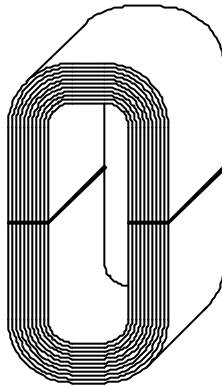
Pöörivoolukadu kasvab võrdeliselt sageduse, lehe paksuse ja magnetvootiheduse amplituudi ruuduga. Sageduse kasvamisel vähendatakse teraslehe paksust või võetakse kasutusele mittejuhtivast materjalist (**ferriit** jt) magnetahelad, kus rauale on mitmesuguste menetlustega lisatud teisi aineid.

Trafo teraslehtedest südamikku koostamisel kasutatakse mitut erinevat viisi. Väikese võimsusega trafodel võib ikked koos sammastega välja stantsida teraslehest (joonis 3.9).



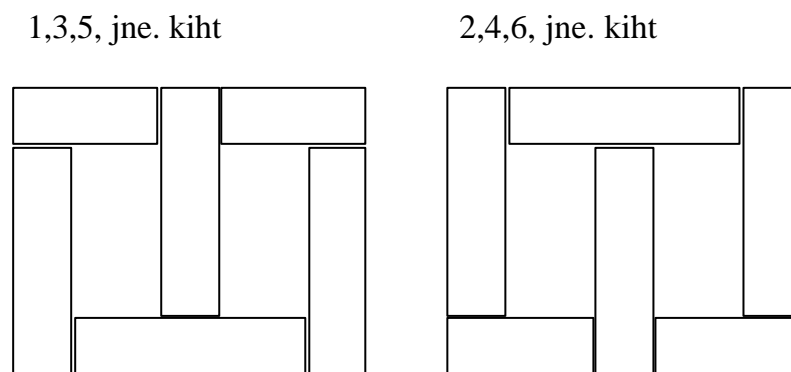
Joonis 3.9. Väiketrafo väljastantsitud terasplekk

Trafopleki omaduste parandamiseks kasutatakse ka **külmvaltsimist**. Külmalt valtsitud pleki omadused on valtsimise suunas paremad kui ristisuunas. Sellepärast valmistatakse trafo magnetahel **teraslindist** kerimise teel. Hiljem keritud magnetahel lõigatakse keskelt pooleks, et mähised saaks peale panna (joonis 3.10). Õhupilu vähendamiseks lihvitakse lõikepind siledaks.



Joonis 3.10. Ühefaasilise sammastrafo teraslindist keritud magnetahel

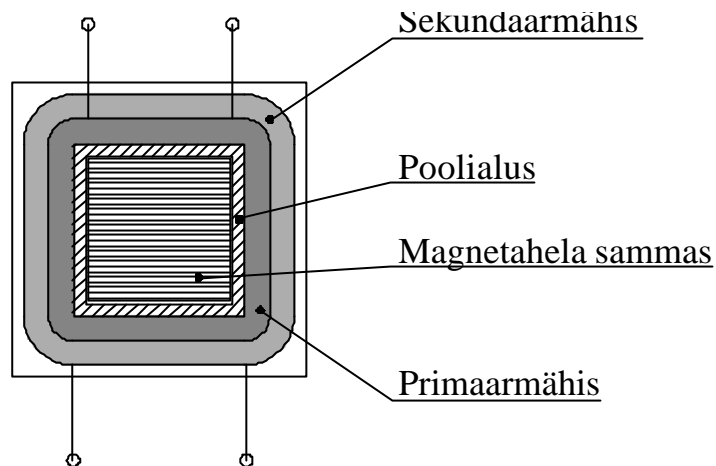
Suurte trafode magnetahel koostatakse ristküliku kujulistest plekitükkidest. Südamikü koostamisel plekitükkidest jäävad magnetvoo kulgemise teega risti asuvatesse ühenduskohtadesse paratamatult väikesed õhupilud. Mida suurem on õhupilu, seda suurem on magnetahela vajalik magneetimisergutus ja trafo tühijooksuvoov. Selle mittesoovitava nähtuse vähendamiseks võib magnetahela koostada nii, et kahe üksteise peal asuva kihi õhupilud on erinevates kohtades (joonis 3.11).



Joonis 3.11. Trafosüdamiku koostamine vaheliti ladumisega

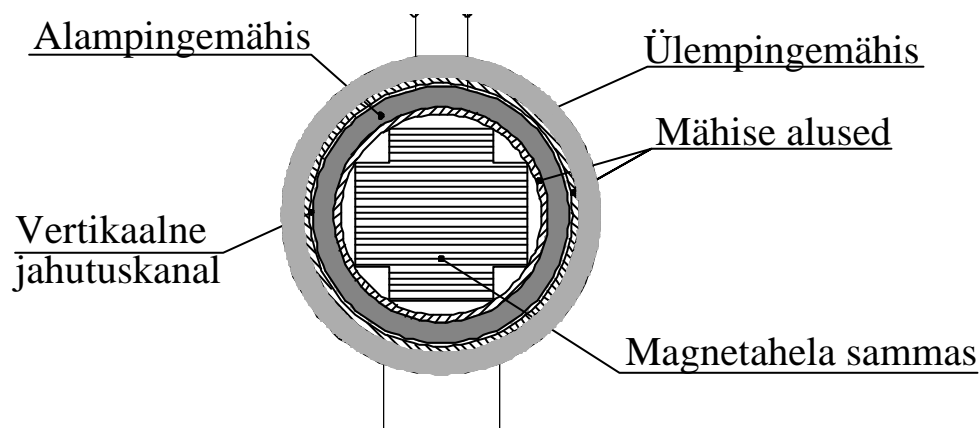
Selliseid südamikke nimetatakse **vaheliti laotud südamikeks**. Lihtsuse huvides kasutatakse ka sellist ladumisviisi, kus õhupilu on kõikides kihtides ühel ja samal kohal. Selliselt koostatud trafosid nimetatakse **põkksüdamikuga** trafodeks.

Väikese võimsusega trafode magnetahela ristlõige on nii sammastel kui ikkel nelinurga ehk ristküliku kujuline. Samuti on nelinurkse ristlõikega isoleermaterjalist poolialus, millele keritakse mähised (joonis 3.12).



Joonis 3.12. Väiketrafo samba ristlõige koos sellel asuva poolialuse ja mähistega

Suuremate trafode mähised pannakse silindrilisele alusele (ristlõige on ringjoone kujuline). Et mähise sees olevat ruumi paremini ära kasutada, selleks tehakse samba ristlõige astmelisena nagu joonisel 3.13. Suurtel trafodel on astmete arv veelgi suurem.



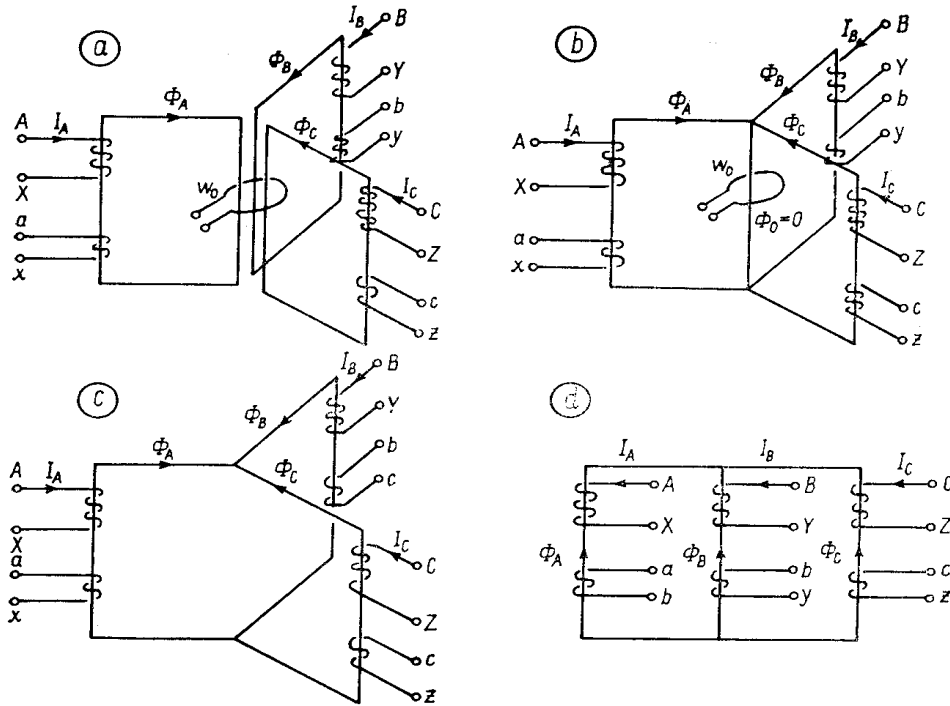
Joonis 3.13. Jõutrafo samba ristlõige koos sellel asuva poolialuse ja mähistega

Ka ike tehakse suurtel trafodel astmeline.

Väiketrafo plekipakki hoiab koos poolialus. Et suurte trafode terassüdamik seisaks koos, selleks on plekkidesse tehtud augud, millest pannakse läbi **poldid** kogu plekipaki kokkutõmbamiseks. Poldid ümbritsetakse isoleerainest hülssidega ning mutrite alla asetatakse isoleerainest seibid, et vältida üksikute plekkide omavahelist elektrilist ühendust ja sellega lühisvoolukontuuride teket.

3.2.2.1. Kolmefaasiliste trafode magnetahelad

Kolmefaasilise voolu transformeerimiseks võib kasutada kolme ühefaasilist trafot. Need kolm trafot moodustavad siis kolmefaasilise trafogrüpi. Kuid sagedamini kasutatakse siiski ühte kolmefaasilist trafot, millel kõigi kolme faasi jaoks on ühine trafosüdamik. Selline võimalus tuleneb kolmefaasilise pingesüsteemi sümmeetrisusest. Kolmefaasilise trafosüdamiku moodustamist on selgitatud joonisel 3.14.



Joonis 3.14. Kolmefaasilise trafõ moodustamine

Igas trafosüdamikus olev magnetvoog F on proportsionaalne selle trafõ primaarmähise pingega. Kui meil on sümmeetrilise kolmefaasilise süsteemi igas faasis üks trafõ, siis pingete sümmeetrilisuse tõttu on eri trafõde vahelduvad magnetvood ajas selliselt nihutatud, et nende magnetvoogude hetkväärtuste summa on igal ajamomendil null (faasordiagrammil annab kolm võrdset ja faasis 120° nihutatud faasorit summaks null). Seda iseloomustab joonis 3.14a, kus kolme ühefaasilise trafõ magnetahelad on lihtsuse huvides näidatud ainult sirgjoonega. Faaside A, B ja C trafõdel on mähised ainult ühel sambal. Kõigi kolme faasi trafõde külgiiked on paigutatud üksteise vastu ja ümber kõigi kolme ikke on mähis w_0 . Mähises w_0 pinget ei teki, sest eri faaside magnetvoogude F_A , F_B ja F_C summa on pidevalt null (ühe faasi magnetvoog on alati võrdne ja vastassuunaline kahe ülejäänud faasi magnetvoogude summaga ehkki kõik magnetvood pidevalt muutuvad). Kui me paneme kolme paralleelse külgiiked asemele ainult ühe külgiiked, mis on ühine kõigile kolmele trafõle (joonis 3.14b), siis on ka selles ühises külgiikedes magnetvoogude summa null. See tähendab, et selles külgiikedes magnetvoogu ei ole ja me võime selle ära jätta (joonis 3.14c). Ühise külgiiked ärajätmisega ei muutu midagi. Lisaks võime me faasi B trafõ iket lühendada nullini ja pöörata faaside A ja C magnetahelad ühte tasapinda. Sellega tekib küll kolmefaasilise magnetahela asümmeetria, sest B faasi magnetahel on lühem, kuid see ei mõjuta oluliselt trafõ tööd. Tekib ainult väheoluline faaside tühihoosuvoolude erinevus, kuid tulemusena saame tasapinnalise magnetahela, mida on lihtne valmistada. Ainult neil juhtudel, kui väga suure võimsuse tõttu tekib probleeme trafõ transpordiga, kasutatakse igas faasis eraldi trafõ.

3.2.3. Trafode mähised

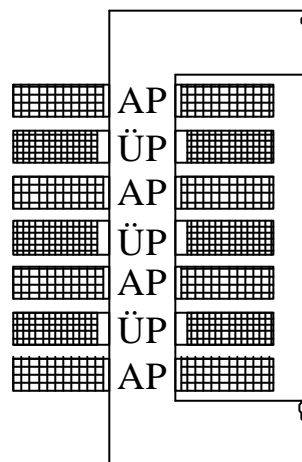
Trafomähise konstruktsioon peab kindlustama nende elektrilise ja mehaanilise tugevuse ning vajaliku temperatuurikindluse. Peale selle peab mähise valmistamise tehnoloogia olema võimalikult lihtne ja odav ning elektriline kadu mähistes ettenähtud piires.

Sõltuvalt mähise nimivoolust ja nimipingest on nende konstruktsioonid väga mitmesugused. Mähised valmistatakse kas vask- või alumiiniumjuhtmest (viimasel ajal ka fooliumist). Voolutihedus vaskmähises on õlitrafo korral 2,0...4,5 MA/m² (ehk A/mm²) ja kuivtrafo korral 1,2...3,0 MA/m². Ülemised piirid on võimsate trafode jaoks. Alumiiniumjuhtmetest mähiste korral on voolutihedused 40...45% väiksemad.

Õlitrafodeks nimetatakse selliseid trafosid, kus nii magnetahel kui mähised on paigutatud õlipaaki. Õli parandab jahutustingimusi ja suurendab isolatsiooni vastupidavust pingele. Enamus elektrivõrgu trafosid on õlitrafod.

Mähised valmistatakse ümarjuhtmest ristlõikega 0,02...10 mm² ja profiiljuhtmetest ristlõikega 6...60 mm². Paljudel juhtudel koostatakse mähise poolid mitmest paralleeljuhtmest. Õlitrafode juhtmed valmistatakse email- ja puuvillisolatsiooniga juhtmetest (ümarjuhe) või kahekordse kaablipaperi- ja puuvillisolatsiooniga juhtmest (profiiljuhe). Kuivtrafo mähistes kasutatakse kuumuskindla klaasisolatsiooniga juhet.

Ülem-(ÜP) ja alampingemähise (AP) paigutusviisilt südamikule ja teineteise suhtes jaotatakse mähised **kontsentristeks** ehk **silindrilisteks** (joonis 3.6) ja **ketasmähisteks** (joonis 3.15).



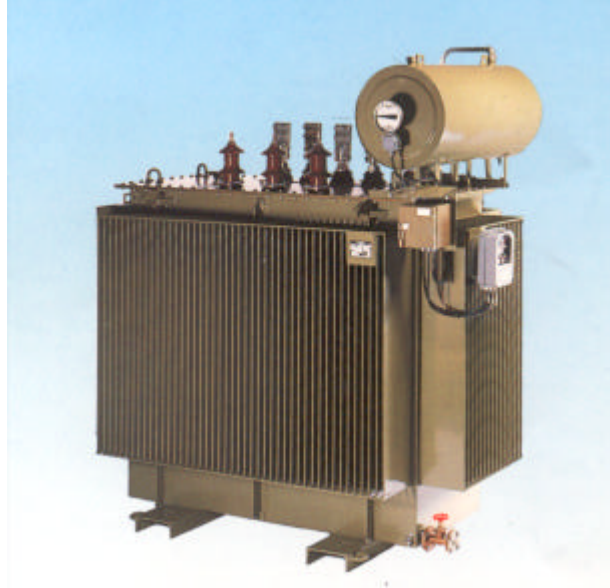
Joonis 3.15. Ketasmähiste paigutus trafosambal

Silindermähised keritakse isoleermaterjalist torudele, kusjuures alampingemähis asetatakse südamikule lähemale. Ülem- 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 kihtidevaheline pinge on kuni 100 V.

Ketasmähise ülempinge ja alampinge kettad paiknevad vaheldumisi piki südamikku (joonis 3.15). Alampingemähiste ketaste sisemine läbimõõt on veidi väiksem kui ülempinge ketastel, mis suurema siseläbimõõdu tõttu on sambast veidi kaugemal. Kõige ülemine ja kõige alumine on alampingeketas. Ketasmähiste teostamine on keerukam, kuid nende paremuseks on väiksem

elektromagnetiline puiste. Puiste vähendamine on oluline väga kõrgetel pingetel (110 kV ja rohkem), kus läbilöögi vältimiseks peab suurendama kaugusi mähiste vahel.

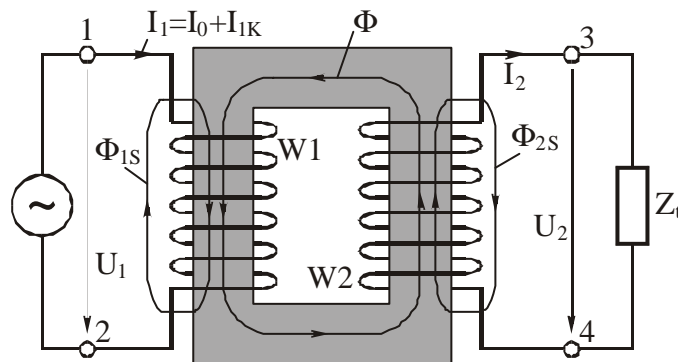
Joonisel 3.16 on näidatud kontsentriliste mähistega kolmefaasilise jõutrafo aktiivosa (magnetahel ja mähised) ja sama trafo valmis kujul. Aktiivosa on paigutatud õlipaaki, millel on jahutusribid. Paagi kaanele on paigutatud ülepinge poole ja alampinge poole **väljaviigud** ja **õlipaisupaak**. Trafo paagi sees puudub õhuruum täielikult. Trafopaak ja paisupaak on toruga ühendatud ja normaalselt on umbes pool paisupaaki õliga täidetud. Väiksematel trafodel võib paisupaak puududa. Harilikult on suuremad jõutrafod varustatud ka nn gaasireleega, mis trafosisese avarii korral tekkivate gaaside survele reageerib ja annab signaali trafo väljalülitamiseks kõrgepinge poolelt võimsuslüliti abil.



Joonis 3.16. Kolmefaasilise jõutrafo aktiivosa koostamine (vasakul) ja valmis trafo (paremal)

3.3. Reaalse trafo parameetrid ja reaalse trafo mudel

Reaalse koormatud trafo skemaatiline kujutis koos põhiliste arvestamist vajavate parameetritega on toodud joonisel 3.17.

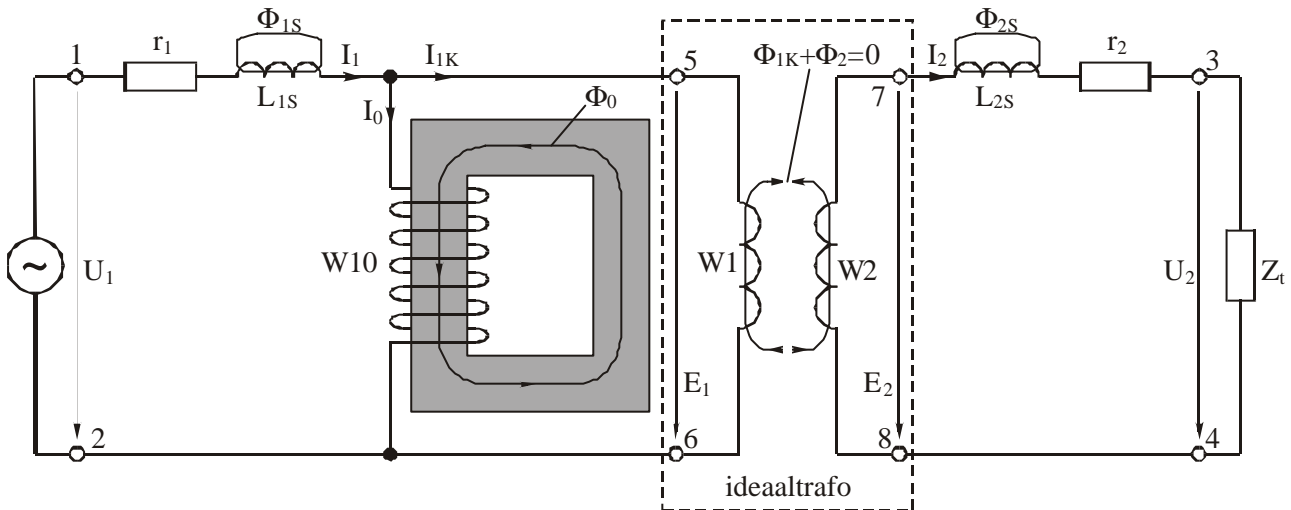


Joonis 3.17. Reaalne trafo ja tema parameetrid

Trafo sisaldab kahte isoleeritud elektri ahelat, mis töötavad eri pingetel. Need ahelad on omavahel seotud ühise magnetvooga F . Peale ühise magnetvoo F on kummalgi mähisel veel oma magnetvoog (F_{1S} ja F_{2S}), mis sulgub läbi õhu ja teise mähisega ei aheldu. Neid voogusid nimetatakse puistevoogudeks. Tegelikult puistevälja jõujoonte asetused ruumis on küll keerukam kui joonisel 3.16, kus on lihtsustatult näidatud ainult üks jõujoon, kuid antud juhul pole see oluline.

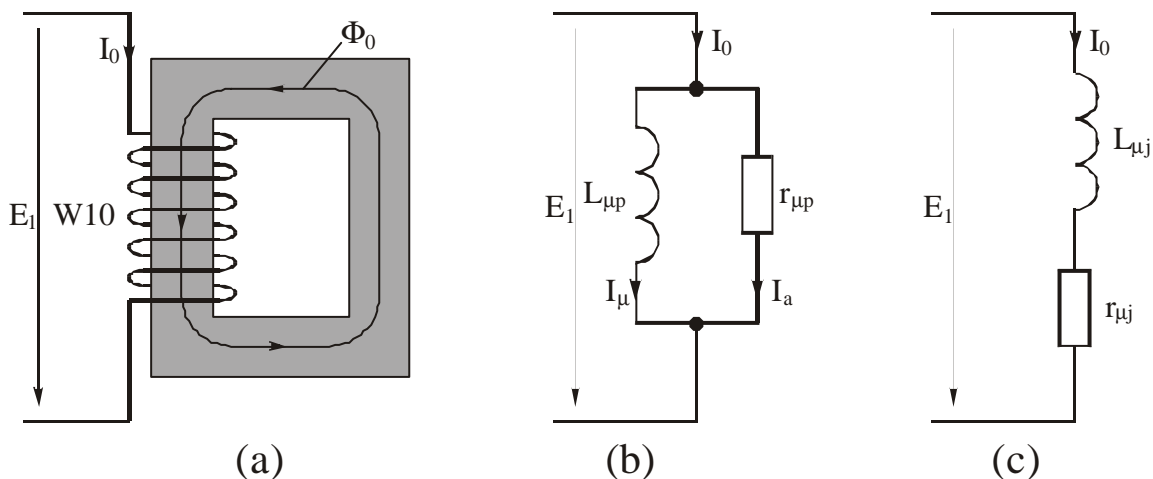
Elektriliste ja magnetiliste suuruste üheskoos arvestamine on tülikas. Asja lihtsustamiseks on kasutusele võetud trafo aseskeem ehk ekvivalentskeem, kus on ainult elektriiahela parameetrid. Ekvivalentskeemi saab vaheastme kaudu, milleks on joonisel 3.16 toodud trafo mudel. Mudeli koostamisel on tehtud järgmised ekvivalentsed teisendused.

- Primaarmähise kaks voolukomponenti, milleks on magneetimisvool I_0 ja koormusvool I_{1K} on viidud eraldi vooluahelatesse. Selleks on primaarmähis jagatud mõtteliselt kaheks paralleelseks osaks, millest üks (W_{10}) asub magnetahelal ja tekitab magnetvoo, teine primaarmähis (W_1) on magnetvälja kaudu ideaalselt sidestatud sekundaarmähisega W_2 .
- Mähiste puistevoog on mähistest lahutatud 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 pingele üle sekundaarklemmidele (7 ja 8). Samal ajal kannab ideaaltrafo sekundaarahelasse tekkiva voolu üle primaarahelasse. Ideaaltrafo pingele ja elektromotoorjõud on alati võrdsed. Koostatud mudelis (joonis 3.18) on ideaaltrafo elektromotoorjõud võrdne reaaltrafo elektromotoorjõuga.



Joonis 3.18. Trafo mudel, kus primaarmähise kaks voolukomponenti on viidud eraldi ahelatesse ja puisteinduktiivsused ja mähiste takistused on mähistest eraldatud

Trafo mudelis oleva magneetimisahela magnetvooga F_0 saab omakorda teisendada elektriiahelaks vastavalt joonisele 3.19b või 3.19c.



Joonis 3.19. Trafo magnetahela (a) asendamine ekvivalentse paralleelse elektriskeemiga (b) ja järjestikuse elektriskeemiga (c)

Resistor $r_{\mu p}$ on siin (joonis 3.19b) valitud sellise suurusega, et temas eralduv võimsus on võrdne südamiku teraseskadudega P_{Fe} , mis on eeldatavalt teada. Joule-Lenzi seaduse põhjal võime leida, et

$$\frac{E_1^2}{r_{\mu p}} = P_{Fe} \quad \text{ja} \quad r_{\mu p} = \frac{E_1^2}{P_{Fe}}. \quad (3.17)$$

Kadudeta induktiivsus $L_{\mu p}$ arvestab trafosüdamiku magnetvälja salvestatud energiat. Induktiivsuse $L_{\mu p}$ saab leida magnetvoo F_0 , magneetimisvoolu I_0 ja primaarmähise keerdude arvu w_1 kaudu. Kasutades 2. peatükis toodud avaldist (2.21), mis seob magnetvoogu F magneetimisergutusega ($F_M = I_0 w_1$) ja magnetilise takistusega ($R_M = F_M / F$) ning induktiivsuse avaldist $L_{\mu} = w_1^2 / R_M$ saame peale teisendust

$$L_{\mu p} = \frac{w_1 \cdot F_0}{I_m},$$

kus magnetvoog F omab efektiivväärtust. Tavaliselt kasutatakse magnetahelate juures magnetvoo amplituudväärtust F_m . Seda arvestades saame

$$L_{\mu p} = \frac{w_1 \cdot F_m}{\sqrt{2} I_m}. \quad (3.18)$$

Vajaduse korral võib kasutada ka aseskeemi, kus kadusid arvestav resistor ja induktiivsus on järjestikku (joonis 3.19c). Järjestikaseskeemi aktiivtakistuse saame leida järgnevalt (jällegi Joule-Lenzi seaduse põhjal)

$$r_{mj} = \frac{P_{Fe}}{I_0^2}. \quad (3.19)$$

Puistevoogusid arvestavate poolide induktiivsused L_{1S} ja L_{2S} on võimalik saada puistevoos teekonna magnetilise takistuse R_{MS} kaudu, kui see takistus trafo konstruktsiooni põhjal leida. Valmishitatud trafo korral on võimalik puisteinduktiivsuste takistusi määrata ka eksperimentaalselt lühisekatsel, mida vaatame edaspidi.

3.4. Ideaaltrafo

3.4.1. Vool, pinge ja võimsus ideaaltrafos

Kuna ideaaltrafos puistevoogu ei ole, siis on sekundaarmähise magnetvoog F_2 täpselt võrdne vastassuunalise primaarmähise magnetvooga F_1 . Selle tõttu peab sekundaarmähise magneetimisergutus ($F_{M2} = I_2 w_2$) olema võrdne primaarmähise magneetimisergutusega ($F_{M1} = I_1 w_1$). Järelikult võime kirjutada

$$I_1 w_1 = I_2 w_2$$

ehk

$$\frac{w_1}{w_2} = \frac{I_2}{I_1}. \quad (3.20)$$

Kuna ideaaltrafol pinge ja elektromotoorjõud on võrdsed, siis eeltoodud avaldiste (3.9) ja (3.10) põhjal

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (3.21)$$

Avaldiste (3.20) ja (3.21) põhjal võime ka saada

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{w_1}{w_2} \quad (3.22)$$

ehk

$$U_1 I_1 = U_2 I_2. \quad (3.23)$$

Avaldis (3.22) näitab, et *sekundaarpinge muutub võrdeliselt* keerdude arvu suhtega ja *sekundaarvool muutub pöördvõrdeliselt* keerdude arvu suhtega. *Pinge langetamisel vool suureneb*. Avaldis (3.23) näitab, et primaarpoole näivvõimsus ($S_1=U_1I_1$) on võrdne sekundaarpoole näivvõimsusega ($S_2=U_2I_2$). Seega ideaaltrafo puhul näivvõimsus ei muutu

$$S_1 = S_2. \quad (3.24)$$

Kadude puudumise tõttu ka aktiivvõimsus ei saa muutuda

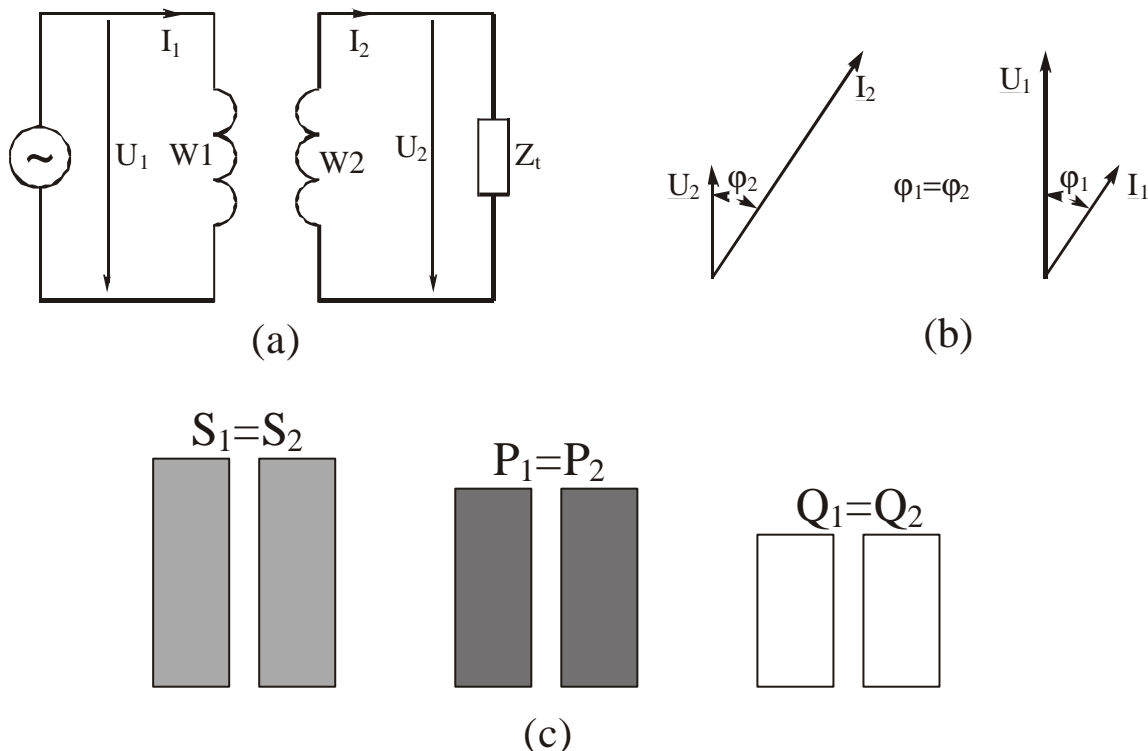
$$P_1 = P_2. \quad (3.25)$$

(3.24) ja (3.25) järeldub, et ka reaktiivvõimsus ei saa muutuda

$$Q_1 = Q_2. \quad (3.26)$$

Voolu ja pinge vahelise faasinihkenurga sekundaarpoolel (f_2) määrab koormuse näivtakistus Z_t .

Sama faasinihkenurk on ka primaarahelas (f_1 joonisel 3.20).



Joonis 3.20. Koormatud ideaaltrafo (a), tema voolude ja pingete faasordiagramm juhule $w_1 > w_2$ (b) ja trafo kaudu ülekantavad võimsused (c)

Kokkuvõttes võib öelda, et ideaaltrafo kannab üle nii aktiiv-, reaktiiv- kui ka näivvõimsust kadudeta. Ülekandmisel muudetakse ainult pinge ja voolu vahetorda. Suur pinge ja väike vool muudetakse väikseks pingeks ja suureks vooluks või vastupidi. Ideaaltrafo tühijooksuvool võrdub nulliga.

Trafo kasutamise mõtteks ongi just pinge ja voolu vahetorda muutmine. Ideaaltrafo täidab seda ülesannet kõige paremini. Kahjuks ei ole võimalik ideaaltrafot valmistada ja tuleb leppida reaalse trafoga. Reaalsel trafol esinevad aktiivkaod ja puistevoogude tõttu tarbivad nad ka reaktiivvõimsust. Selle tõttu reaalfatode puhul võrdused (3.24), (3.25) ja (3.26) ja ka (3.22) täpselt ei kehti. Siiski ei ole erinevused ideaaltrafo ja reaalse trafo vahel väga suured (tavaliselt alla 10%). Selle tõttu võib ligikaudsetes arvutustes reaalsel trafot käsitleda ka ideaalsena. Suuremat täpsust nõudvatel juhtudel (näiteks pingeniivo hoidmine elektrivõrkudes) on vaja arvestada ka kadusid, puistet ja tühijooksuvoolu. Seda tehakse harilikult trafo aseseemi kasutades, mida vaatame allpool.

3.4.2. Impedantsi ehk näivtakistuse muutmine ideaaltrafo abil

Kui mingi näivtakistuslik koormus Z_t on ühendatud toiteallika pingele U_1 (joonis 3.21a), siis tema koormusvool on määratud Ohmi seadusega $I_1 = U_1/Z_t$. Võib juhtuda, et tekkiva voolu suurus I meid millegipärast ei rahulda. Olukorra parandamiseks võime me selle koormuse Z_t ühendada toitepingele läbi trafo. Vaatame ideaaltrafo kasutamist, mille ülekandetegur $k_{12} = w_1/w_2$ (joonis 3.21b). Meid huvitab, kui suur on selle koormuse ja trafo näivtakistus üheskoos. Seda uut näivtakistust ehk impedantsi Z'_t nimetatakse näivaks impedantsiks (apparent impedance). Selle saab leida trafo primaarvoolu ja pinge kaudu.

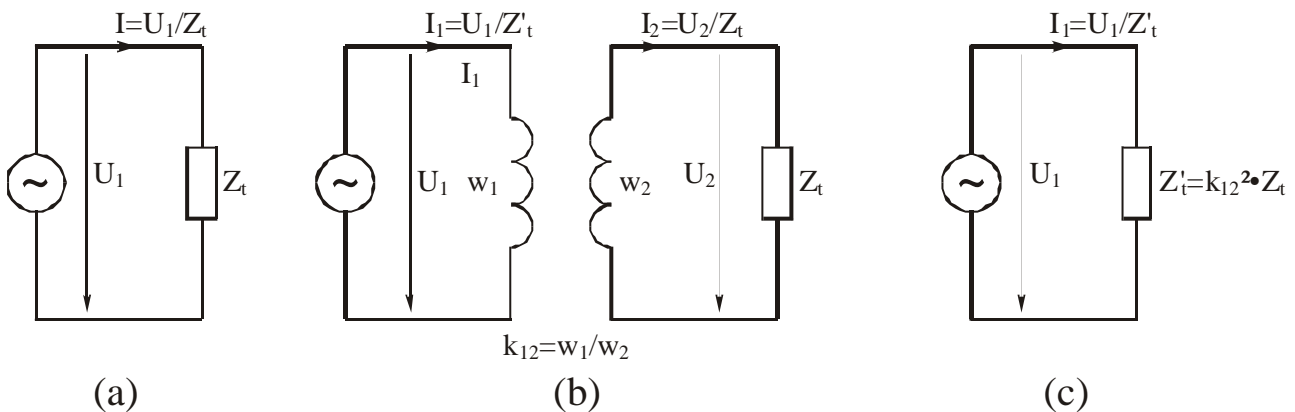
$$Z'_t = \frac{U_1}{I_1} \quad (3.27)$$

Kuna ideaaltrafol $U_1 = k_{12} \cdot U_2$ ja $I_1 = I_2/k_{12}$, siis saame

$$Z'_t = \frac{U_1}{I_1} = \frac{k_{12} U_2}{I_2/k_{12}} = k_{12}^2 \cdot \frac{U_2}{I_2}. \quad (3.28)$$

Kui Ohmi seaduse põhjal $U_2/I_2 = Z_t$, siis saame lõplikult

$$Z'_t = k_{12}^2 Z_t. \quad (3.29)$$

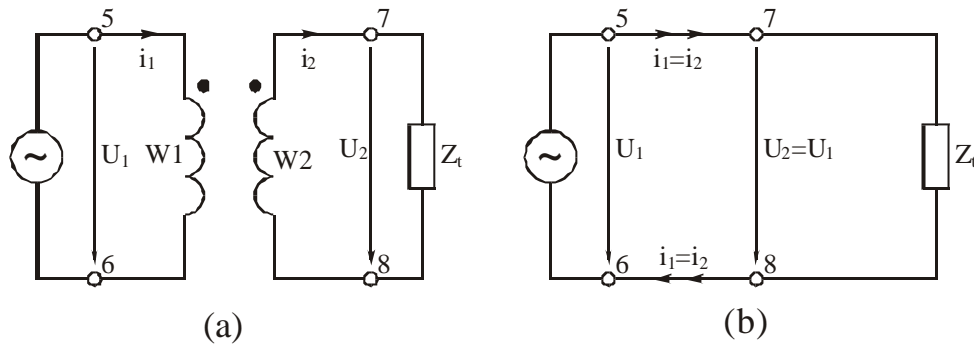


Joonis 3.21. Näivtakistuse ühendamine toiteallikaga otse (a), sellesama näivtakistuse ühendamine läbi trafo (b) ja ekvivalentse näivtakistuse ühendamine otse ilma trafota (c)

Avaldisest (3.29) võime järeldada, et *mingi koormuse ühendamisel läbi ideaaltrafo ülekandeteguriga k_{12} , tema takistus muutub võrdeliselt ülekandeteguri ruuduga*. Koormuse Z_t ühendamine läbi trafo annab sama tulemuse kui ekvivalentse koormuse Z'_t ühendamine otse (joonis 3.21c). Trafo abil saab toiteallika pinget ja koormuse takistust sobitada.

3.4.3. Ideaalset trafot sisaldava ahela arvutus

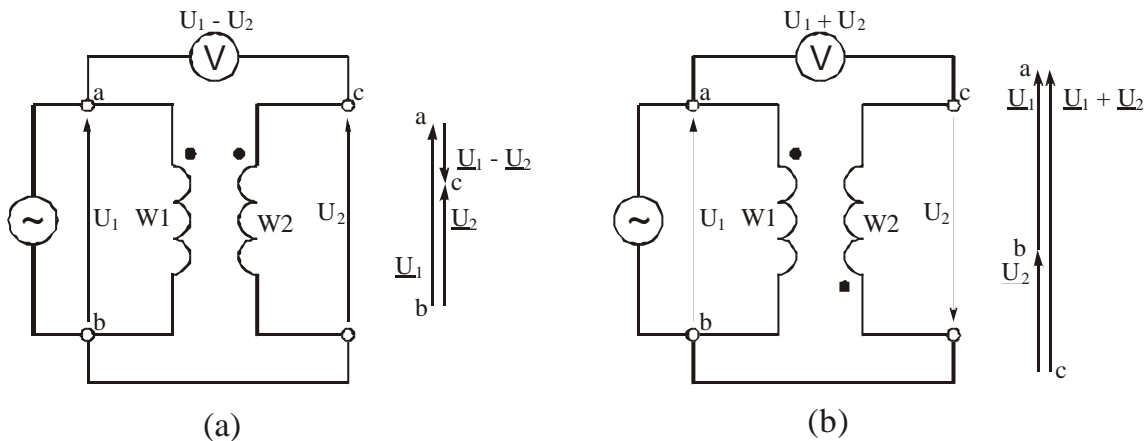
Trafo primaar- ja sekundaarahel on erinevatel pingetel, mis muudab arvutuse tülikaks. Arvutuse lihtsustamiseks asendatakse kas sekundaarahel või primaarahel **ekvivalentse ahelaga** (equivalent circuit) ehk **aseskeemiga**. Sealjuures valitakse ekvivalentskeem selline, et trafo mõlema poole pinged on võrdsed (trafo ülekandesuhe on siis 1:1 ja mähise keerdude arvud on võrdsed). Trafo ühe poole ekvivalentset asendamist nimetatakse ühe trafo poole **taandamiseks** (reflecting or referring) teisele poolele. Ekvivalentsuse säilitamiseks tuleb taandatavas ahelas olevate takistuste väärtusi muuta vastavalt eelmises punktis leitud avaldisele (3.29).



Joonis 3.22. Mähiste võrdse keerdude arvu korral võib ideaaltrafo (a) asendada primaarpoole ja sekundaarpoole vastavate klemmide ühendusega (b)

Ideaaltrafol ülekandeteguriga 1:1 on mõlema poole pinged võrdsed ($u_1=u_2$) ja ka mõlema poole voolud on võrdsed ($i_1=i_2$). Sellise trafo (joonis 3.22a) võib asendada joonisel 3.22b toodud ekvivalentse ahelaga. See ekvivalentne ahel sisaldab ainult kahte ühendust. Kokku on ühendatud primaar- ja sekundaarpoole samanimelised ehk **märgitud** klemmid (klemmid 5 ja 7 joonisel 3.22) ja ka kaks ülejäänud klemmi 6 ja 8. Märkitud klemmid tähistatakse skeemil rasvaste punktidega (joonis 3.22a). Trafo klemmide märkimist teostatakse suhtelise polaarsuse arvesse võtmise eesmärgil. Seda operatsiooni nimetatakse ka trafomähiste faasi määramiseks ehk **faseerimiseks**.

Kui näiteks klemmile 5 (joonis 3.22) on mingil ajamomendil rakendatud positiivne pinge ja magneetivool siseneb selle klemmi kaudu trafo mähisesse, siis tekib küsimus – milline klemm on sellel ajamomendil positiivne sekundaarmähisel, kas klemm 7 või klemm 8. Selle määramiseks kõrvaldamiseks klemmid märgitakse järgnevalt. Ühe mähise (tavaliselt primaarmähise) ühele klemmile pannakse märk *suvaliselt* (näiteks klemm 5 joonisel 3.22a). Teiste mähiste märgitud klemm *leitakse* mõõteriista (ostsillograaf või voltmeeter) abil. Märk pannakse nii, et ühel ja samal vahelduvpinge poolperioodil on kõikide märgitud klemmide polaarsus ühesugune. Trafomähiste faseerimine voltmeetri abil on näidatud joonisel 3.23.



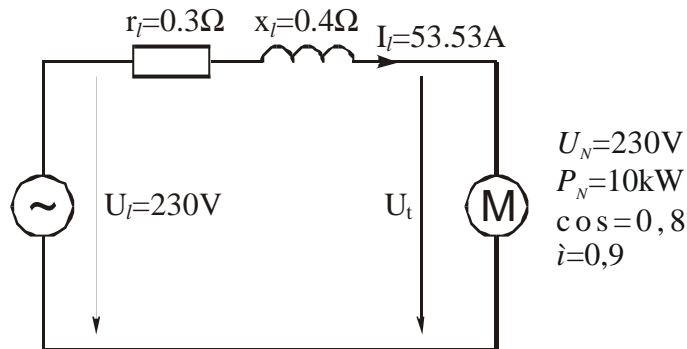
Joonis 3.23. Trafomähiste faasi määramine voltmeetri abil; (a) – voltmeeter on ühendatud samanimeliste klemmide vahele; (b) voltmeeter on ühendatud erinimeliste klemmide vahele

Faseerimisel ühendatakse üks vabalt valitud primaarmähise klemm (klemm b joonisel 3.23) 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, siis näitab voltmeeter primaarpinge U_1 ja sekundaarpinge U_2 vahet (joonis 3.23a). Sel juhul võime me märgitud klemmideks võtta voltmeetriga ühendatud klemmid nagu joonisel 3.23a. Primaar- ja sekundaarpinge vahel ($U_1 - U_2$) tekkimine on näidatud faasordiagrammil. Kui aga juhuslikult valitud klemmide kokkuühendamisel näitab voltmeeter primaar- ja sekundaarpinge summat, siis tulevad klemmid märkida nagu joonisel 3.23b.

Kui võrdse keerdude arvuga ideaaltrafol ühendada kokku mõlema mähise märgitud klemmid (klemmid 5 ja 7 joonisel 3.22a), siis ülejäänud klemmide (6 ja 8) vahel on pinge võrdne nulliga (sest $U_1 - U_2 = 0$). Selle tõttu me võime ka klemmid 6 ja 8 kokku ühendada. Peale selle võime ka veel transformaatoreid eraldada ja saada joonisel 3.22b toodud aseseemi. Trafo sekundaarpoole ja primaarpoole vool ja pinge selle tulemusel ei muutu. Koormustakisti Z_t , mis on sekundaarklemmidele 7 ja 8 ühendatud, võime nüüd ka otse primaarklemmidele 5 ja 6 ühendada ja midagi selle tõttu ei muutu. Vaatame ideaaltrafot sisaldava ahela arvutust ka näite varal.

Näide

Ühefaasilist vahelduvvoolumootorit, mille nimivõimsus $P_N = 10 \text{ kW}$, võimsustegur on 0,8 ja kasutegur on 0,9, toidetakse pingel 230V läbi pika toiteliini. Toiteliini aktiivtakistus $r_l = 0,3 \Omega$ ja induktiivtakistus $x_l = 0,4 \Omega$ (joonis 3.24). Leida pinge mootoril ja võimsuskadu ülekandeliinis.



Joonis 3.24. Elektrimootori toitmine läbi madalpinge elektriliini

Lahendus

Leiame mootori näivvõimsuse S_N ja tarbitava aktiivvõimsuse P_t .

$$S_N = P_N / \cos \phi = 10 / 0,8 = 12,5 \text{ kVA};$$

$$P_t = P_N / \eta = 10 / 0,9 = 11,11 \text{ kW}.$$

Leiame mootori näivtakistuse z_t

$$z_t = U_N^2 / S_N = 230^2 / 12,5 = 4232 \text{ O}.$$

Selle komplekstakistuse nurk on määratud võimsusteguriga, $\phi = \arccos 0,8 = 36,87^\circ$.

Leiame liini koormuseks oleva masina komplekstakistuse reaali- ja imaginaarosa

$$r_t = z_t \cdot \cos \phi = 4232 \cdot 0,8 = 3385,6 \text{ O}.$$

$$x_t = z_t \cdot \sin \phi = 4232 \cdot 0,6 = 2539,2 \text{ O}.$$

Vool liinis on

$$I_l = U_l / (r_l + jx_l + r_t + jx_t) = 230 \angle 0^\circ / (0,3 + j0,4 + 3385,6 + j2539,2) = 230 \angle 0^\circ / (3385,9 + j2539,6) = 230 \angle 0^\circ / 4232 \angle 36,87^\circ = 54,35 \angle -36,87^\circ \text{ A}.$$

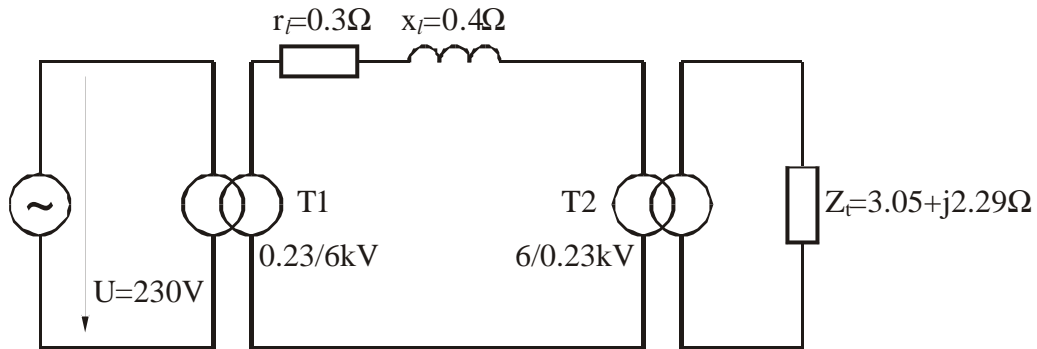
Mootori pinge on

$$U_t = I_l \cdot z_t = 54,35 \angle -36,87^\circ \cdot 4232 \angle 36,87^\circ = 230 \angle 0^\circ \text{ V}.$$

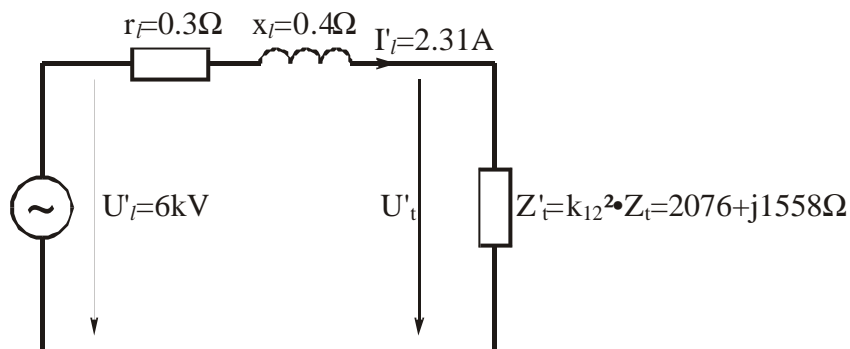
Kadu liinis

$$P_{kadu} = I_l^2 \cdot r_l = 54,35^2 \cdot 0,3 = 886 \text{ W}.$$

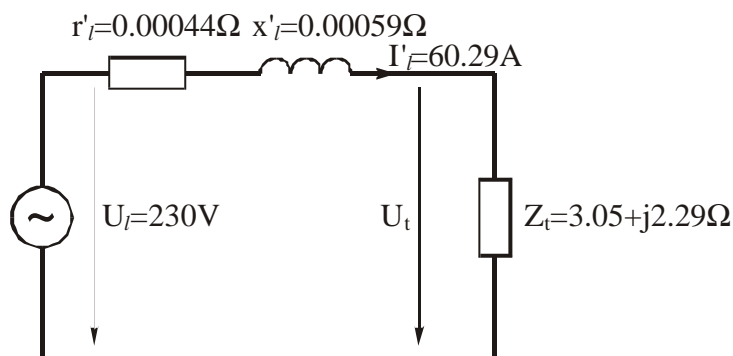
Lubatud minimaalne toitepinge on kehtivate normide järgi tavaliselt 10% alla nimipinge. Seega oleks lubatud minimaalne pinge $230 \cdot 0,9 = 207 \text{ V}$. Liini pingelangu tuleks vähendada. Vaatame liini pingelangu vähendamist transformaatoreid abil, mis on üldlevinud viis. Selleks paneme me liini algusesse trafo T1 (joonis 3.25a), mis tõstab pinge 0,23 kilovoldilt 6 kilovoldile ja liini lõppu paneme teise trafo T2, mis langetab 6 kV pinge tagasi 0,23 kilovoldile. Liini takistus jääb samaks ja trafosid loeme ideaaltrafodeks.



(a)



(b)



(c)

Joonis 3.25. Elektrimootori toitmine läbi 6kV elektriliini (a), 6kV pingeniivoode taandatud aseskeem (b) ja 230V pingeniivoode taandatud aseskeem (c)

Leiame pinget mootoril ja kaod liinis uues olukorras. Arvutamisel kasutame taandatud aseskeemi. Meil on taandamist võimalik teha kahel erineval viisil. Esiteks me võime kogu skeemi viia pingeniivoole 6 kV (joonis 3.25b). Sel juhul liini takistus jääb muutumatuks, sest liin ongi sellel pingel, kuid tarbija takistus tuleb taandada 0,23 kilovoldilt 6 kilovoldile. Kasutades taandamisvalemite (3.29)

$$Z'_t = k_{12}^2 Z_t = \left(\frac{6000}{230} \right)^2 \cdot (3,05 + j2,29) = 2075,6 + j1558,4 \text{ O.}$$

Nüüd leiame voolu liinis

$$\begin{aligned} I_{6kV} &= \frac{U_l \cdot k_{12}}{(r_l + jx_l + r'_t + jx'_t)} = 230 \cdot \frac{6000}{230} / (0,3 + j0,4 + 2075,6 + j1558,4) = \\ &= 6000 / (2075,9 + j2558,8) = 6000 \angle 0^\circ / 2596 \angle 36,9^\circ = 2,31 \angle -36,9^\circ \text{ A.} \end{aligned}$$

Mootori pingeline on 6kV nivool

$$U'_t = I_{16kV} \cdot z'_t = 2,31 \angle -36,90^\circ (2075,6 + j1558,4) = 5995,6 \angle 0^\circ \text{ V}$$

ja 230V nivool

$$U_t = k_{21} \cdot U'_t = \frac{230}{6000} \cdot 5995,6 = 229,8 \text{ V.}$$

Kadu liinis on

$$P_{kadu} = I_{16kV}^2 \cdot r_l = 2,31^2 \cdot 0,3 = 1,6 \text{ W.}$$

Sama arvutuse võime teostada ka nii, et taandame kogu skeemi 230 voldisele pingeniivoole (joonis 3.25c). Sel juhul tarbija takistus ei muutu, sest tarbija ongi sellel pingel, kuid liini takistus on vaja taandada, sest liinipinge on 6kV. Taandada on vaja nüüd trafo T2 primaarpoolelt sekundaarpoolele ja taandamistegur on $k_{21}=230/6000$. Taandamisel on alati kasulik silmas pidada, et liikudes kõrgemalt pingelt madalamale takistus väheneb ja vastupidi liikudes suureneb. Seega 6kV liini takistus 230V nivool

$$r'_l = k_{21}^2 \cdot r_l \left(\frac{230}{6000} \right)^2 \cdot 0,3 = 0,00044 \text{ } \Omega$$

$$x'_l = k_{21}^2 \cdot x_l \left(\frac{230}{6000} \right)^2 \cdot 0,4 = 0,00059 \text{ } \Omega.$$

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 pingeline on

$$U_t = I_l \cdot z_t = 60,29 \angle -36,90^\circ \cdot 3,81 \angle 36,86^\circ = 229,7 \angle -0,04^\circ \text{ V.}$$

Kadu liinis on

$$P_{kadu} = I_l^2 \cdot r'_l = 60,29^2 \cdot 0,00044 = 1,6 \text{ W.}$$

Mõlemad aseskeemid annavad arvutustäpsuse piires sama tulemuse. 230V aseskeemilt (joonis 3.25c) on näha, et liini pingeline tõstmisel tema ekvivalentne takistus väheneb väga palju. Selle tõttu ülekandeliini pingelang ja kaod ülekandeliinis muutuvad väga väikesteks, võrreldes madalpingelise ülekandega. Optimaalseks pingeniivoks loetakse umbes 1 volt meetrile ehk 1000 V kilomeetrile. Näiteks sõiduauto pingeline on 12V, kuid autobussis juba 24V. Tarbetult kõrge pingeline tekitab probleeme isolatsiooni ja elektriõhtusega. Elektrienergia ülekandevõrkudes kasutatakse mitmesuguseid pingeniivoosid, mille vahel on trafod. Eestis kasutatakse järgmisi võrgupingeid.

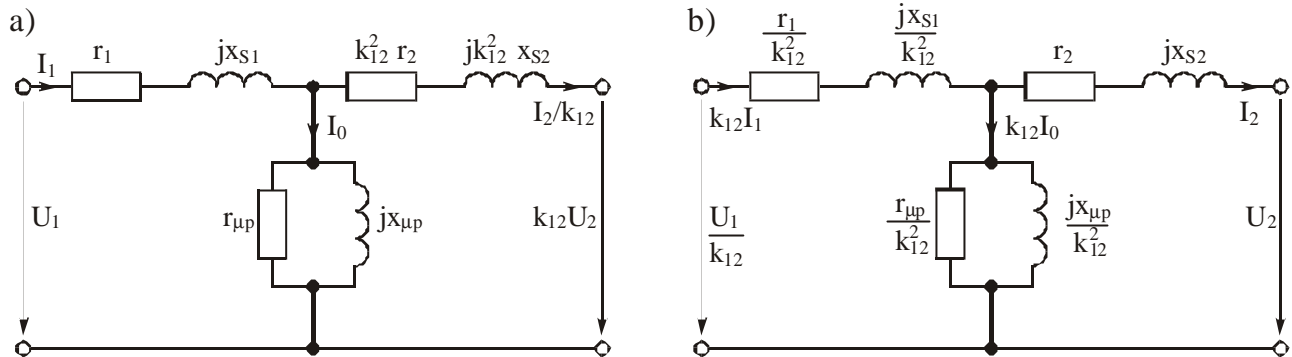
Kõrgepingeline (high voltage – HV)	110, 220 ja 330 kV
Keskpingeline (middle voltage – MV)	6, 10, 20 ja 36 kV
Madalpingeline (low voltage – LV)	230/400 V
	(NLiidu aegne 220/380 V)

Mõningatel tarbijatel (kantav valgustus, käsitööriistad) kasutatakse ka madalamaid pingeline, mille standardsed väärtused ja nimetused on.

Väikepingeline (extra low voltage – ELV)	36 V
Ohutu väikepingeline (safety extra low voltage – SELV)	12 V

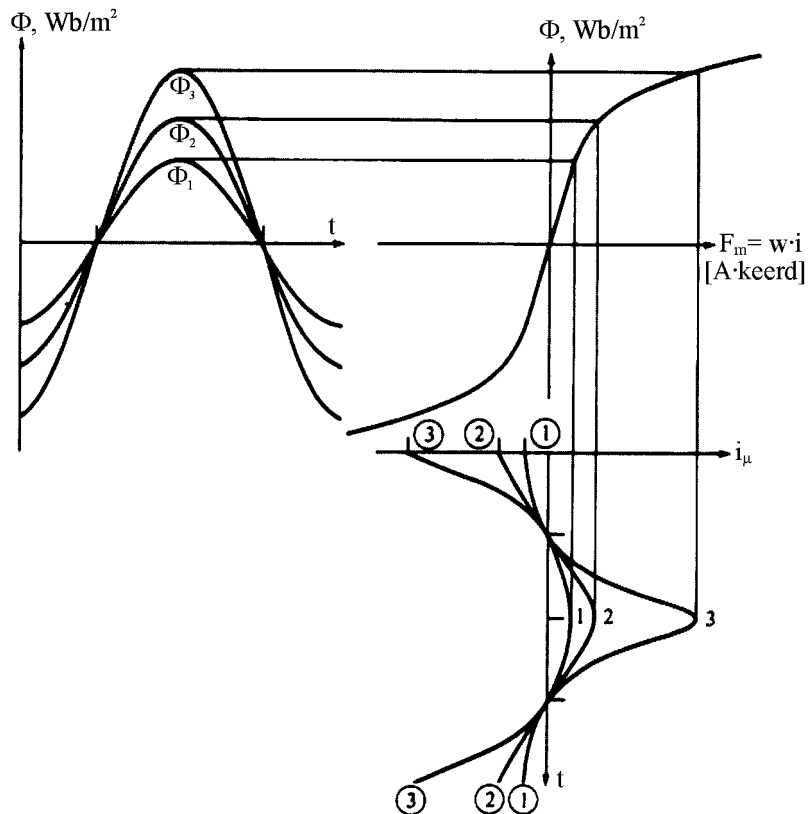
3.5. Trafo aseskeem

Trafo aseskeem kirjeldab kõiki reaalse trafo olulisi parameetreid ja nende seoseid elektriskeemi abil. Kahemähiselise trafo jaoks saab koostada kaks aseskeemi, ühe aseskeemi primaarpinge nivool (joonis 3.26a) ja teise sekundaarpinge nivool (joonis 3.26b).



Joonis 3.26. Primaarpinge nivoolle taandatud trafo aseskeem (a) ja sekundaarpinge nivoolle taandatud trafo aseskeem (b)

Need aseskeemid on koostatud joonisel 3.18 toodud trafo mudeli alusel. Tehtud on järgmised muudatused. Magnetahel on asendatud ekvivalentse paralleelse elektriskeemiga, sekundaarmähise takistused on taandatud primaarpoolle (joonis 3.26a) või primaarmähise ja magnetimisahela takistused on taandatud sekundaarpoolle (joonis 3.26b) ning ideaaltrafo (mille ülekandesuhe on taandamise tõttu 1:1) on asendatud klemmide 5 ja 7 ning 6 ja 8 vaheliste ühendustega. Aseskeemis on induktiivsused asendatud induktiivtakistusega. Sellega on kaudselt arvesse võetud toitepinge sagedus.

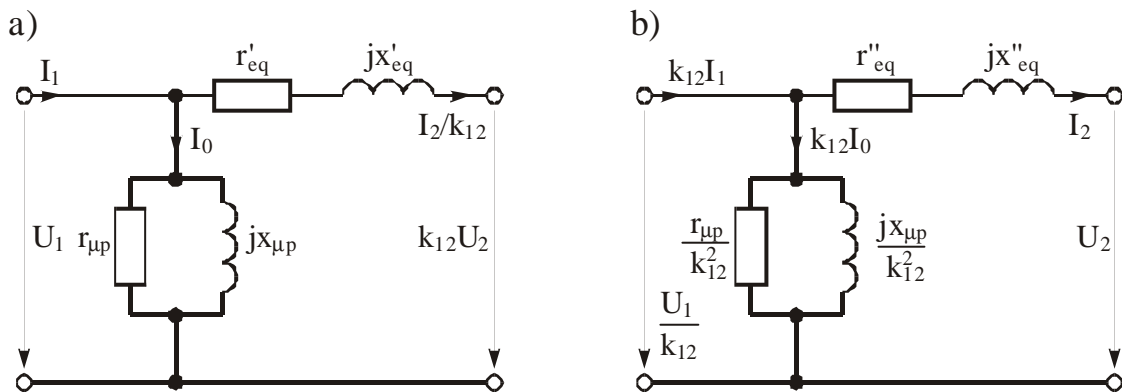


Joonis 3.27. Trafosüdamiku magnetvoo amplituudväärtuse mõju magnetimisvoolule

Taandamist primaarpoolele on sobiv teha siis, kui uuritakse protsesse toitevõrgus. Taandamist sekundaarpoolele on sobiv teha siis, kui uuritakse protsesse koormusahelas. Näiteks on võimalik uurida koormusvoolu I_2 suurusest tingitud sekundaarpinge U_2 muutumist. Aseskeem kirjeldab piisavalt täpselt mähiste aktiivtakistuse ja puisteinduktiivtakistuse mõju, samuti ka südamik rauaskadude mõju. Kõige ebatäpsemalt kirjeldab aseskeem magneetimisharu voolu I_0 , sest magnetahela mittelineaarsust ignoreeritakse. Aseskeemis oleva induktiivtakistuse vool on siinuseline ja proportsionaalne pingega. Tegelikult magneetimisvool ei ole siinuseline ja kasvab nimipingest suurematel pingetel vägagi järsult. See on tingitud südamikuna kasutatava elektrotehnilise terase mittelineaarsest magneetimiskõverast ja seda selgitab joonisel 3.27 toodud graafiline konstruktsioon.

Kui magnetvoo amplituud on väike, siis tööpunkt liigub magneetimiskõvera ligikaudu lineaarsel osal ja magneetimisvool on ligikaudu siinuseline (1. joonisel 3.27). Magnetvoo amplituudi kasvamisel läheb tööpunkt kõvera põlve piirkonda ja üle selle (2. ja 3.). Sellega magneetimisvool kasvab kiiresti ja muutub oluliselt mittesiinuseliseks. Magnetvoog muutub proportsionaalselt pingega. Juba 20 protsendine pinge tõus üle nimipinge võib trafo primaarmähise magneetimisvooluga üle koormata. Aseskeem aga seda ei kajasta, sest seal on lineaarne induktiivsus. Normaalsel pingel ja sellest madalamal on aseskeem siiski piisavalt korrektne.

Magneetimisvool I_0 on koormusvooluga võrreldes suhteliselt väike (orienteeruvalt 10%). Selle voolu poolt põhjustatud pingelang aseskeemi elementidel r_1 ja jx_{S1} on väga väike (tavaliselt alla 1% nimipingest) ja enamasti võib seda ignoreerida.



Joonis 3.28. Trafo lihtsustatud aseskeemid, kus primaar- ja sekundaarmähise aktiiv- ja puisteinduktiivtakistused on liidetud; (a) – primaarpoolele taandatud; (b) – sekundaarpoolele taandatud

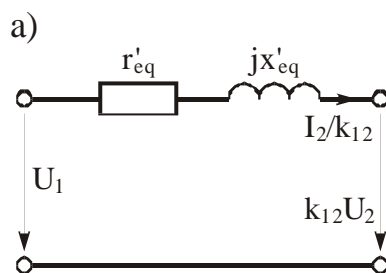
Selle tõttu võib kasutada joonisel 3.28 toodud lihtsustatud aseskeemi, kus primaar- ja sekundaarmähise aktiiv- ja puisteinduktiivtakistused on taandamistegurit arvestades kokku liidetud ja saadud ekvivalentsed takistused r_{eq} ja x_{eq} . Primaarmähisele taandamisel

$$\begin{aligned} r'_{eq} &= r_1 + k_{12}^2 \cdot r_2, \\ x'_{eq} &= x_{S1} + k_{12}^2 \cdot x_{S2} \end{aligned} \quad (3.30)$$

Sekundaarmähisele taandamisel

$$\begin{aligned} r''_{eq} &= r_1 / k_{12}^2 + r_2, \\ x''_{eq} &= x_{S1} / k_{12}^2 + x_{S2} \end{aligned} \quad (3.31)$$

Mõningatel juhtudel võib ka magneetimisvoolu ja koos sellega magneetimisharu aseskeemil (joonis 3.28) ignoreerida. Sel juhul saame veelgi lihtsama aseskeemi (joonis 3.29).



Joonis 3.29. Trafo lihtsustatud aseskeemid, kus magneetimisharu on ignoreeritud; (a) – primaarpoolele taandatud; (b) – sekundaarpoolele taandatud

3.6. Suhteliste ühikute süsteemi kasutamine trafode juures

Kui me tahame teha arvutusi elektriabelas, kus on üks kahemähiseline trafo, siis me peame valima, kas me taandame kogu skeemi kas ülempinge või alampinge tasemele. Suurema arvu trafomähiste või trafode korral tuleb valida mingi ühe mähise pinge, millele taandada kõik ülejäänud. Mõnedel juhtudel saab sellist tülikat ja aeganõudvat tööd vältida, kui kasutada suhteliste ühikute süsteemi. Suhteliste ühikute süsteemi korral kasutatakse tegelike pingete, voolude ja takistuste asemel nende tegelike suuruste suhet baasväärtusesse. Baaspinge, baasvool, baasimpedants ja baasnäivvõimsus moodustavad baasväärtuste süsteemi. Baasväärtuste süsteemi loomisel tuleb valida kaks baasväärtust, milleks trafode juures sobivad mingi mähise nimipinge U_N ja trafo nimivõimsus S_N . Ülejäänud kaks on siis tuletatud baasväärtused. Need on nimivool

$$I_N = \frac{S_N}{U_N} \quad (3.32)$$

ja nimiimpedants

$$Z_N = \frac{U_N}{I_N} = \frac{U_N^2}{S_N}. \quad (3.33)$$

Nimiimpedantsi nimetatakse vahel ka lihtsustatult nimitakistuseks.

Tegelike väärtuste ja baasväärtuste kaudu leitakse suhtelised väärtused pingele, voolule, võimsusele ja impedantsile. Eestis levinud traditsiooni kohaselt tähistatakse suhtelisi suurusi väiketähtedega, millel on ülaindeksiks tärn.

Suhteline pinge

$$u^* = \frac{U}{U_N}. \quad (3.34)$$

Suhteline impedants ehk näivtakistus

$$z^* = \frac{z}{Z_N}. \quad (3.35)$$

Suhteline aktiivtakistus

$$r^* = \frac{r}{Z_N}. \quad (3.36)$$

Suhteline induktiivtakistus

$$x^* = \frac{x}{Z_N}. \quad (3.37)$$

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 nimivõimsus suhtelistes ühikutes võrdub trafo juures ühega $S_{pu}=S_N/S_N=1$ sü ja

aktiiv-, reaktiiv- ja näivtakistuse väärtused suhtelistes ühikutes ei sõltu sellest, milline oli valitud baaspinge. Küll aga sõltub baaspinge väärtusest baasimpedants ehk baastakistus.

Näide

Meil on 230/12 V trafo (primaarpinge on 230 V ja sekundaarpinge 12 V), mille nimivõimsus on 400 VA ja mida koormatakse aktiivtakistusega $r_k=1 \text{ O}$.

Valime baaspingeks $U_{1N}=230 \text{ V}$. Baastakistus primaarpingel on

$$Z'_N = \frac{U_{1N}}{I_N} = \frac{U_{1N}^2}{S_N} = \frac{230^2}{400} = 132,3 \text{ O}.$$

Kui valime baaspingeks sekundaarpinge $U_{2N}=12 \text{ V}$, siis on baastakistus

$$Z''_N = \frac{U_{2N}^2}{S_N} = \frac{12^2}{400} = 0,36 \text{ O}.$$

Sekundaarpoolel oleva 1 oomise takistuse väärtus suhtelistes ühikutes on

$$r_k^* = \frac{r_k}{Z''_N} = \frac{1}{0,36} = 2,78 \text{ sü}.$$

Kui me näiteks muudame seda koormustakistust nii, et $r_k^* = 1 \text{ sü}$, siis sellele vastav tegelik takistus oomides sekundaarpoolel on

$$r_k = r_k^* \cdot Z_N^{+1} = 1 \cdot 0,36 = 0,36 \text{ O}.$$

Sellel uuel takistil eralduv võimsus 12 V pingel on

$$P = U^2 / r_k = 12^2 / 0,36 = 400 \text{ W}.$$

Kui meil on ka primaarpoolel koormustakisti, mille suurus suhtelistes ühikutes $r_k^* = 1 \text{ sü}$, siis selle koormustakisti takistus oomides on

$$r_k = r_k^* \cdot Z'_N = 1 \cdot 132,3 = 132,3 \text{ O}$$

ja sellel takistil eralduv võimsus 230 V pingel on

$$P = 230^2 / 132,3 = 400 \text{ W}.$$

Sellest näitest järeldub, et kui takistus on suhtelistes ühikutes, siis sellel takistusel eralduv võimsus ei sõltu pinge nivoost (sekundaar- või primaarpinge). Küll aga sõltub sellel takistil eralduv võimsus baasnäivvõimsusest, mis on tavaliselt selle trafo niminäivvõimsus. Kui ükskõik millise võimsusega trafo ükskõik millise mähise klemmidele on ühendatud koormustakistus $r_k^* = 1 \text{ sü}$, siis eraldub sellel koormustakistusel trafo nimivõimsusega võrdne võimsus. Selle tõttu saab suhteliste ühikute kasutamisel võrrelda ka erineva võimsusega trafode aktiiv- ja induktiivtakistusi, kadusid ja muud sarnast.

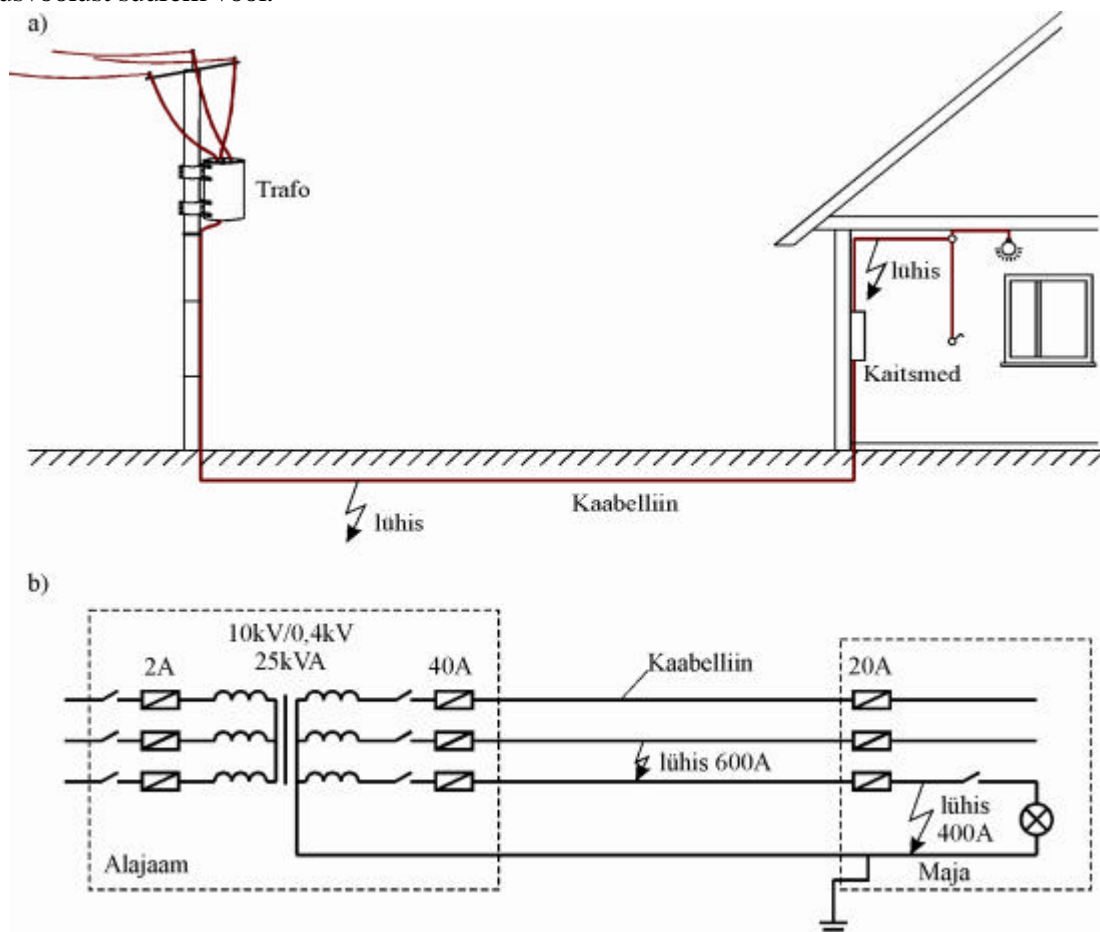
3.7. Trafo lühis ja lühisekatse

3.7.1. Miks on vaja uurida trafo lühisalitlust?

Tänapäeval on enamus maju varustatud elektriga. Elektrijuhtmed on peaaegu igas ruumis. Kui elektrijuhtmete isolatsioon saab vigastada, siis tekib nn lühis. Paljad elektrijuhtmed puutuvad üksteise vastu ja kahe pingestatud juhtme vaheline takistus muutub väga väikeseks (nulli lähedaseks). Ohmi seadus ütleb, et kui takistus muutub nulliks, siis muutub vool lõpmatult suureks. Tegelikult ei muutu vool lõpmata suureks, kuid normaalsest voolust ikkagi väga palju suuremaks. Suur vool on ohtlik. Juhtmed kuumenevad ja kergesti võib tekkida tulekahju.

Ehkki juhtmete isolatsiooni vigastusi ei esine just igapäev, on siiski rangelt nõutud, et kõik elektripaigaldised oleks 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 kaitsetüliti või sulavkaitsmete abil. Nii

kaitselülitid kui ka sulavkaitsmed ei suuda välja lülitada lõpmatult suurt voolu. Elektrivõrgus tekkida võiva lühisvoolu suurust on vaja teada ja vastavalt sellele tuleb valida kaitse. Kaitse ei tohi rakenduda normaalsel töövoolul, kuid lühise korral peab kaitse rakenduma. Kaitsmete rakendusvoolud on teada ja me peame olema veendunud, et lühise korral tekib kaitsme rakendusvoolust suurem vool.

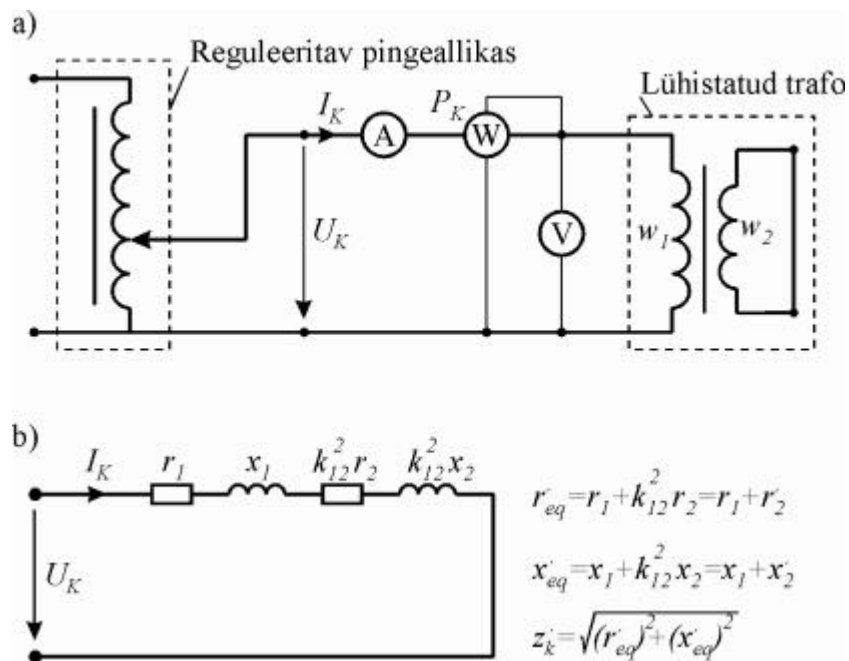
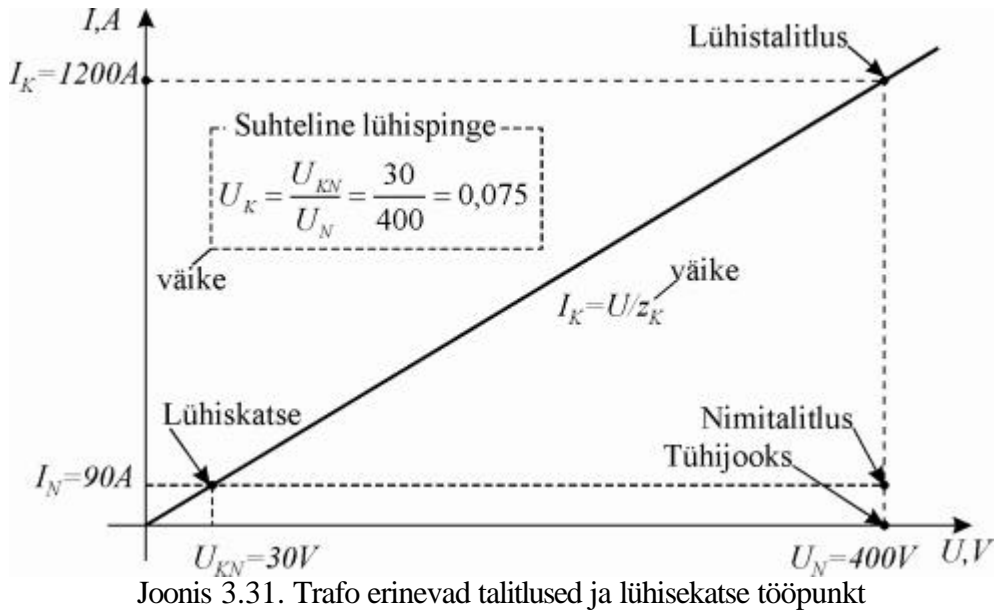


Joonis 3.30. Maja varustamine elektriga – (a) ja elektrivarustuse skeem, kus on näidatud võimalike lühisvoolude suurus – (b)

Joonisel 3.30 on näidatud üks osa maja elektrivarustusest ja sellele vastav elektriskeem. Elektriskeemil on toodud ka mõned lühisvoolude suurused (juhtudeks kui lühis tekib kaabelliinis ja maja sees). Lühisel ei lähe voolud kunagi lõpmatult suureks, sest liinidel ja transformatoritel on nii aktiivne kui ka induktiivne takistus. Lühisvoolu piiramisel on oluline just transformaatori takistus, sest see on küllalt suur ja püsiv. Lühis võib tekkida kohe liini alguses, kus liinijuhtmete pikkus ja sellega liini takistus on veel tühised. Transformaatori näivtakistus lühisel ja selle näivtakistuse aktiiv- ja reaktiivkomponent leitakse arvutuslikult ja ka eksperimentaalselt. Seda eksperimenti nimetatakse lühisekatseks. Kui lühis tekib trafo nimipingel, siis on tekkivad lühisvoolud umbes 20 korda suuremad kui trafo arvutuslik nimivool. Selline olukord ei sobi eksperimendi jaoks, sest sellise voolu peab kaitse otsekohe välja lülitama ja mõõtmisi ei saa teha. Selleks, et mõõtmisi teha saaks, kasutatakse lühisekatse juures 10...20 korda väiksemat pinget, kui nimipinget.

3.7.2. Lühisekatse teostamine

Joonisel 3.31 on näidatud lühisekatse, lühistalitluse, nimitalitluse ja tühijooksu tööpunktid trafo jaoks, mille nimipinge $U_N=400$ V, nimivool $I_N=90$ A ja lühise näivtakistus $z_K=0,33$ O. Joonisel 3.32 on näidatud ühefaasilise trafo lühisekatse skeem ja lühistatud trafo aseskeem.



Katsetatava trafo sekundaarmähis on lühistatud, primaarmähisega paralleelselt on ühendatud voltmeeter ja vattmeetri pingemähis ning primaarmähisega järjestikku on ühendatud ampermeeter ja vattmeetri voolumähis (joonis 3.32a). Primaarmähis saab pinge läbi ampermeetri ja vattmeetri mähiste reguleeritavast pingeline, milleks antud juhul on autotransformaator. Katse teostamise algul on reguleeritava pingeline pinge nullis ja seda hakatakse tõstma jälgides samaaegselt ampermeetri näitu. Teatud vaheaegade järel registreeritakse mõõteriistade näidud, et hiljem konstrueerida lühiskarakteristikud funktsioonina pingest. Pinget tõstetakse, kuni ampermeeter näitab primaarmähise nimivoolu. Sellega on katsetatav trafo viidud lühisekatse nimitööpunkt. Joonisel 3.31 on lühisekatse nimitööpunkt näidatud ühe konkreetse trafo jaoks. Sellel trafol on nimivoolu 90 A juures primaarmähisele antav pinge $U_N=30$ V. Lühistalitlusele vastavaid suursi 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 voolu 90 A. Kui aga sellel nimipingel tekib trafo sekundaarahelas lühis, siis suureneb primaarpoole vool väärtuseni $I_K=1200$ A (joonis 3.31). See

voolu väärtus ei ole mõõdetud vaid on arvatud lühistakistuse z_K kaudu. Lühistakistus z_K määratakse aga lühisekatsel, kus vastavalt eeltoodule on voolud ja pinged oluliselt väiksemad. Niiviisi on lahendatud lühisel tekkivate suurte ja ohtlike voolude katselise määramise probleem.

Lühise askeemil joonisel 3.32b 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 umbes kaks korda väiksem kui nimipinge, sest suur vool tekitab primaarmähisel suure pingelangu. Selle tõttu magneetimisvool on mitu korda väiksem kui nimitaliluses (magneetimisharu vahelduvvoolutakistus on mittelineaarne). Lõppkokkuvõttes on ka tegelikul lühisel magneetimisvoolu osatähtsus lühisvoolus väga väike ja seda pole vaja arvestada.

3.7.3. Lühisekatsel saadud andmete kasutamine

Trafo lühisekatsel registreeritakse ampermeetri, vattmeetri ja voltmeetri näit. Nende näitude põhjal arvutatakse lühise näivtakistus z_K , reaktiivtakistus x_K ja aktiivtakistus r_K . Ühefaasilise trafo korral on arvutusvalemid järgmised:

$$z_K = \frac{U_K}{I_N}; \quad r_K = \frac{P_K}{I_N^2}; \quad x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2}. \quad (3.38)$$

Mõõtmistulemuste järgi arvutatud aktiivtakistus r_K vastab joonisel 3.32b oleva lühise askeemi ekvivalentsele aktiivtakistusele r'_{eq} . Lühise aktiivtakistus on seotud eelpool punktis 3.5 toodud askeemi takistustega järgnevalt:

$$r_K = r_1 + r'_2. \quad (3.39)$$

Analoogiliselt ka reaktiivtakistus

$$x_K = x_1 + x'_2 \quad (3.40)$$

ja ka näivtakistus

$$z_K = z_1 + z'_2. \quad (3.41)$$

Seega on lühisekatse põhjal leitavad takistused primaarpoole ja sekundaarpoole takistuste summad, kusjuures sekundaarpoole takistused on taandatud primaarpoolele. Lühisekatse ei võimalda määrata primaarmähise ja sekundaarmähise takistusi eraldi. Juhul, kui on siiski vaja ligikaudu teada neid takistusi eraldi, siis võib näiteks aktiivtakistuse jaoks lugeda, et

$$r_1 \approx r'_2 \approx 0,5r_K. \quad (3.42)$$

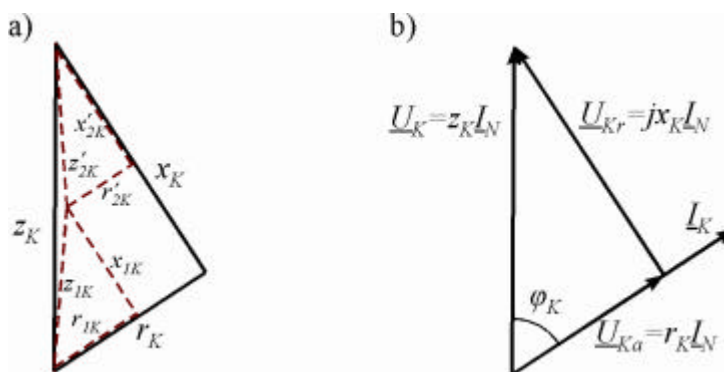
Kolmefaasiliste trafode korral mõõdetakse voolud ja pinged kõikides faasides ja seejärel määratakse liinivoolu I_{NI} ja lühisekatse liinipinge U_{KI} keskmised väärtused. Võimsus määratakse kõigi kolme faasi summaarse lühisvõimsusena P_K .

Primaarmähise tähtühenduse korral arvutatakse faasi lühisparameetrid järgnevalt

$$z_K = \frac{U_{KI}}{\sqrt{3}I_{NI}}; \quad r_K = \frac{P_K}{3I_{NI}^2}; \quad x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2} \quad (3.43)$$

ja

$$z_K = \frac{\sqrt{3}U_{KI}}{I_{NI}}; \quad r_K = \frac{P_K}{I_{NI}^2}; \quad x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2}. \quad (3.44)$$



Joonis 3.33. Trafo lühise takistuste kolmnurk (a) ja trafo lühisekatse faasordiagramm (b)

Katsetulemuste põhjal leitud lühise takistuste z_K , x_K ja r_K põhjal saab joonestada lühise takistuste kolmnurga (joonis 3.33a). Lühise takistuste korrutamine nimivooluga annab lühispinge ($U_K = z_K I_N$), lühispinge reaktiivkomponendi ($U_{Kr} = x_K I_N$) ja lühispinge aktiivkomponendi ($U_{Ka} = r_K I_N$). Nende pingete järgi saab koostada lühisekatse faasordiagrammi (joonis 3.33b). Nurk φ_K lühispinge faasori \underline{U}_K ja voolu faasori \underline{I}_N vahel on lühise faasinihkenurk. Lühise takistuste kolmnurga sees saab näidata ka veel eraldi primaarmähise ja sekundaarmähise takistuste kolmnurgad (joonis 3.33a). Lühisekatset kasutatud suurused 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 lühispinge u_K^* avaldub siis järgnevalt

$$u_K^* = \frac{U_K}{U_{KN}}. \quad (3.45)$$

Saab näidata, et suhteline lühispinge u_K^* on võrdne suhtelise lühise näivtakistusega

$$u_K^* = \frac{U_{KN}}{U_N} = \frac{z_K I_N}{U_N} = \frac{z_K}{Z_N} = z_K^*. \quad (3.46)$$

Suhteline lühispinge antakse praktikas tihti ka protsentides

$$u_{K\%} = \frac{U_{KN}}{U_N} \cdot 100 = 100 u_K^*. \quad (3.47)$$

Kasutatakse ka suhtelist lühise aktiivtakistust r_K^* ja reaktiivtakistust x_K^*

$$r_K^* = \frac{r_K}{Z_N}; \quad x_K^* = \frac{x_K}{Z_N}. \quad (3.48)$$

Saab ka näidata, et suhteline lühispinge aktiivkomponent u_{Ka}^* on võrdne suhtelise aktiivtakistusega r_K^* ja analoogiline seos on ka lühispinge reaktiivkomponendi ja reaktiivtakistuse vahel

$$u_{Ka}^* = r_K^*; \quad u_{Kr}^* = x_K^*. \quad (3.49)$$

Lühispinge on oluline trafo parameeter. Suhteline lühispinge protsentides tuuakse trafo nimisildil. Jõutrafo del $u_{K\%} = 5 \dots 15\%$. Suurem lühispinge on kõrgema pingega trafodel, mille mähised on üksteisest kaugemal ja puistevoos suuremad. Paljudel juhtudel tuuakse trafo nimisildil ka suhtelise lühispinge aktiivkomponent $u_{Ka\%}$ ja reaktiivkomponent $u_{Kr\%}$.

Trafo lühisekatset on pinge umbes 20 korda väiksem nimipingest. Selle tõttu on ka magnetvootihedus väike ja trafosüdamikus tekkivad teraskaod on mitusada korda väiksemad kui nimitalitluses. Need on tähtsusetult väikesed. Lühise aktiivvõimsus P_K läheb põhiliselt mähiste vaseskao katmiseks. Palju väiksem, kuid siiski märkimisväärne osa võimsusest P_K läheb mööda trafo paaki ja kinnitusdetalle kulgevate puistevoogude tõttu tekkivateks hüsteresi- ja pöörivoolukadudeks. Need puistevoos on lühisekatset sama suured kui nimitalitluses, sest voolud

on nimivooludega võrdsed. Lühisvõimsuse P_K põhjal arvatud lühistakistus 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 lühispinge aktiiv- ja reaktiivkomponent on teada (näiteks trafo sildiandmete põhjal) ja me tahame teada trafo vaseskao ja puistevoogude kadude summat p_{cu} mingil koormusvoolu väärtusel I , siis saab selle leida lühistakistuse r_k kaudu

$$p_{cu} = r_k I^2. \quad (3.50)$$

Näide

Ühefaasilise trafo kohta on teada järgmised andmed. Nimipinge $U_{1N}=230V$, nimivõimsus $S_N=630 VA$ ja lühispinge aktiivkomponent $u_{ka}=7\%$. Leida trafo vaseskao võimsus poolel nimikoormusel.

Leiame trafo nimiimpedantsi primaarpoolel

$$Z'_N = \frac{U_{1N}^2}{S_N} = \frac{230^2}{630} = 83,97 \text{ O.}$$

Leiame primaarpoole lühistakistuse

$$r'_k = u_{ka}^* \cdot Z'_N = 0,07 \cdot 83,97 = 5,88 \text{ O.}$$

Leiame primaarpoole nimivoolu

$$I_N = S_N / U_{1N} = 630 / 230 = 2,74 \text{ A.}$$

Vaseskao võimsus poolel nimikoormusel on

$$p_{cu} = r'_k \cdot (0,5I_{1N})^2 = 5,88 \cdot 0,5^2 \cdot 2,74^2 = 11 \text{ W.}$$

Trafo nimisildil oleva suhtelise lühispinge ja teiste nimiaandmete kaudu saab leida selle trafo lühisvoolud. Kui lühis on nimiprimaarpingel, siis lühisvool primaarpoolel

$$I_{K1} = \frac{U_{N1}}{z'_K}, \quad (3.51)$$

kus I_{K1} – primaarmähise lühisvool;

U_{N1} – primaarmähise nimipinge;

z'_K – primaarpoolele taandatud lühise näivtakistus.

Avaldise (3.51) võib kirjutada ka suhtelistes suurustes

$$I_K^* = \frac{1}{z_K^*} = \frac{1}{u_K^*}. \quad (3.52)$$

Suhteliselt lühisvoolult I_K^* saab üle minna tegelikule lühisvoolule

$$I_K = I_K^* \cdot I_N = \frac{I_N}{u_K^*}. \quad (3.53)$$

Näide

Ühefaasilise trafo primaarpoole nimipinge on 400 V ja nimivool 6A. Sekundaarpinge tühijooksul on 36 V. Trafo suhteline lühispinge $u_{K\%}=7\%$. Kui suur on trafo primaarvool ja sekundaarvool, kui sekundaarahelas tekib juhuslikult lühis.

Primaarpoole lühisvool 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

$$I_{2N} = \frac{U_1 \cdot I_{1N}}{U_2} = \frac{400 \cdot 6}{36} = 66,67 \text{ A.}$$

Sekundaarpoole lühisvool 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 lühispinge aktiivkomponent ja reaktiivkomponent, siis saab nende andmete põhjal määrata ka trafo sekundaarpinge koormuse all ja koormusest tingitud sekundaarpinge muutuse.

Näide

Ühefaasilise trafo nimiparameetrid on järgmised: $U_{1N}=400 \text{ V}$; $S_N=2 \text{ kVA}$. Sekundaarmähise nimitühijooksupinge $U_{20}=115 \text{ V}$. Selle trafo lühispinge aktiivkomponent $u_{Ka\%}=7\%$ ja reaktiivkomponent $u_{Kr\%}=5\%$. Trafo sekundaarahelasse on lülitatud aktiivtakistus $r=10 \text{ O}$ ja trafo on lülitatud pingele 400 V . Leida trafo sekundaarvool, sekundaarpinge koormuse all ja sekundaarpinge muutus.

Leiame trafo nimiimpedantsi sekundaarpoolele vastavalt avaldisele (3.33)

$$Z_N'' = \frac{U_{20}^2}{S_N} = \frac{115^2}{2000} = 6,6125 \text{ O.}$$

Leiame lühise aktiivtakistuse ja reaktiivtakistuse, mis on sekundaarpoolele taandatud (kasutades ka (3.49) ja võttes arvesse, et $u_{Ka}^* = 0,01u_{Ka\%}$ ja $u_{Kr}^* = 0,01u_{Kr\%}$)

$$r_K'' = u_{Ka}^* \cdot Z_N'' = 0,07 \cdot 6,6125 = 0,4629 \text{ O,}$$

$$x_K'' = u_{Kr}^* \cdot Z_N'' = 0,05 \cdot 6,6125 = 0,3306 \text{ O.}$$

Kasutades sekundaarpoole jaoks koostatud aseskeemi (joonis 3.34) leiame sekundaarvoolu I''

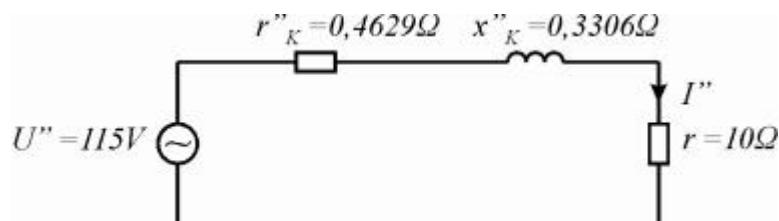
$$I'' = \frac{U''}{\sqrt{(r_K'' + r)^2 + (x_K'')^2}} = \frac{115}{\sqrt{(0,4629 + 10)^2 + 0,3306^2}} = 10,99 \text{ A.}$$

Leiame pinge koormustakistil r , mis on trafo sekundaarpinge koormuse all

$$U_2 = I'' \cdot r = 10,99 \cdot 10 = 109,9 \text{ v.}$$

Trafo sekundaarpinge muutus koormuse all on

$$\Delta U = U_{20} - U_2 = 115 - 109,9 = 5,1 \text{ v.}$$



Joonis 3.34. Sekundaarpoolele taandatud trafo aseskeem sekundaarpinge muutuse leidmise ülesande juurde

3.8. Trafo tühijooksukatse

Trafo lühiskatse annab ühe osa trafo aseskeemi parameetritest, kuid puudu jäävad aseskeemi magneetimisharu parameetrid. Need saab määrata tühijooksukatsest. Tühijooksukatsest saab määrata ka trafo ülekandesuhte ja tühijooksukaod.

Joonis 3.35.

Tühijooksukatse teostamiseks koostatakse joonisel 3.35 toodud skeem. Primaarpoolele on lülitatud ampermeeter, vattmeeter ja voltmeeter, sekundaarpoolele on ainult voltmeeter. Primaarpinget tõstetakse nullist kuni 1,1 kordse nimipingeni ja teatud sammuga registreeritakse primaarpinge U_{10} , sekundaarpinge U_{20} , vool I_{10} ja võimsus P_0 . Mõõtetulemuste põhjal konstrueeritakse tühijooksukarakteristikud funktsioonina primaarpingest.

Nimipingel (kui $U_{10}=U_{1N}$) registreeritud mõõteriistade näitude alusel arvutatakse tühijooksu näivtakistus z_0 , aktiivtakistus r_0 ja induktiivtakistus x_0 (tühijooksu suurusel kasutatakse indeksit 0), mis vastavad trafo aseseemi magneetimisharu takistustele (r_0 ja x_0 on järjestikku)

$$z_0 = \frac{U_{10}}{I_{10}}; \quad r_0 = \frac{P_0}{I_{10}^2}; \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}. \quad (3.55)$$

Samuti leitakse ülekanadesuhe

$$k_{12} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_{10}}{U_{20}},$$

võimsustegur

$$\cos \mathbf{j}_0 = \frac{P_0}{U_{10} I_{10}} \quad (3.56)$$

ja suhteline tühijooksuvoov i_0^*

$$i_0^* = \frac{I_{10}}{I_{1N}}.$$

Suhteline tühijooksuvoov 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 $\cos \mathbf{j}_0=0,1$. Tühijooksukadu P_0 kujutab endast praktiliselt teraseskadu trafosüdamikus P_{Fe} (hüsteresikao ja pöörivoolukao summa)

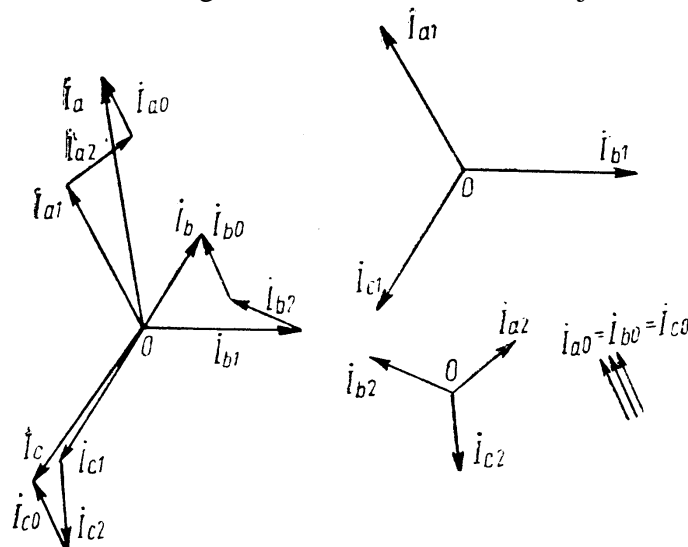
$$P_0 = I_0^2 \cdot r_0 \approx P_{Fe}, \quad (3.57)$$

sest tühijooksul on väga väike vaseskadu ainult primaarmähises.

Tühijooksukadu ehk teraseskadu esineb igasugusel trafo koormusvoolul. Tema suurus ei sõltu trafo koormusvoolust. Küll aga sõltub tühijooksukadu pingest. Kui näiteks pinge on 10% üle nimipinge, siis on tühijooksukadu umbes 30% suurem. Seevastu eelpoolvaadeldud vaseskadu, mis määrati lühisekatsest on koormusvoolust tugevasti sõltuv. Trafo kaovõimsus on teraseskaovõimsuse ja vaseskaovõimsuse summa.

3.9. Mittesümmeetriline koormus ja kolmefaasiliste trafomähiste ühendusskeem

Ühefaasilised tarbijad (näiteks valgustus) võivad põhjustada mittesümmeetrilise koormuse kolmefaasilisele trafole. Siinuseelise mittesümmeetrilise koormuse mõju analüüsimiseks kasutatakse sümmeetriliste komponentide meetodit. Igasuguse mittesümmeetrilise kolmefaasilise voolusüsteemi (või pingesüsteemi) saab põhimõtteliselt asendada kolme sümmeetrilise süsteemiga, mis kokku on ekvivalentsed esialgse mittesümmeetriliselega. Selline asendus on näidatud joonisel 3.30.



Joonis 3.30. Mittesümmeetrilise kolmefaasilise voolu esitamine sümmeetriliste komponentide kujul

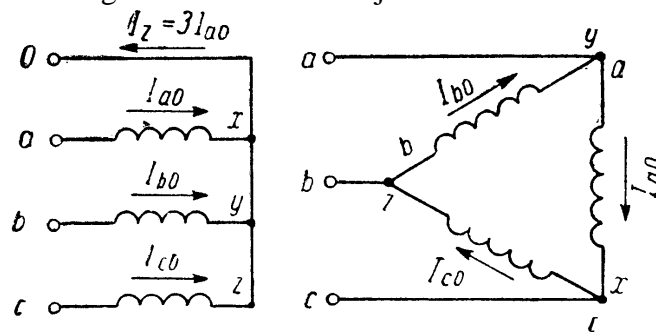
Iga kolmefaasilise voolusüsteemi faasor \underline{I}_a , \underline{I}_b ja \underline{I}_c koosneb kolmest komponentfaasorist

$$\underline{I}_a = \underline{I}_{a1} + \underline{I}_{a2} + \underline{I}_{a3};$$

$$\underline{I}_b = \underline{I}_{b1} + \underline{I}_{b2} + \underline{I}_{b3};$$

$$\underline{I}_c = \underline{I}_{c1} + \underline{I}_{c2} + \underline{I}_{c3}.$$

Sealjuures on komponendid valitud nii, et \underline{I}_{a1} , \underline{I}_{b1} ja \underline{I}_{c1} moodustavad kolmefaasilise pärijärgnevussüsteemi. Teisena toodud komponendid moodustavad vastujärgnevussüsteemi \underline{I}_{a2} , \underline{I}_{c2} ja \underline{I}_{b2} , kus faasorite järjekorrad on muudetud. Kolmandana toodud komponendid moodustavad nulljärgnevussüsteemi, mille faasorid on kõik ühes ja samas faasis. Päri- ja vastujärgnevusega komponendid läbivad kolmefaasilist trafot ilma oluliste erinevusteta. Probleemid võivad tekkida nulljärgnevusvooludega, mis on kõigis kolmes trafo mähises ühes ja samas faasis Joonisel 3.31 on näidatud nulljärgnevusvoolud nulliga tähtühenduse korral ja kolmnurkühenduse korral.



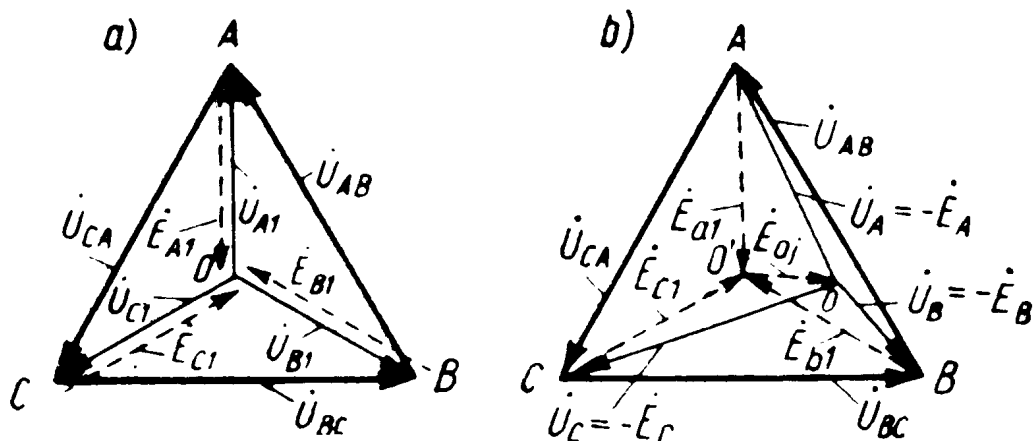
Joonis 3.30. Trafomähiste nulljärgnevusvoolud nulljuhtmega tähtühenduse ja kolmnurkühenduse korral

Tähtühenduse korral on nulljuhtme vool kolm korda suurem ühe mähise voolust. Kolmnurkühenduse korral võivad nulljärgnevusvoolud olla kolme mähise poolt moodustatud suletud kontuuris, kui need on sinna indutseeritud trafo teisest mähisest, mis on tähes. Liinijuhtmetes ei saa kolmnurkühenduse korral nulljärgnevusvoolu esineda, sest pole võimalik voolu üheaegne sisenemine klemmide a, b ja c kaudu. Samal põhjusel ei saa ilma nullita tähtühenduses nulljärgnevusvoolusid olla.

Nulljärgnevusvoolud võivad olla kas 50 Hz sagedusega, kui nad on tingitud faasivoolude mittesümmeetriast või sagedusega 150 Hz (kolmas harmooniline) ja 450 Hz (üheksas harmooniline) kui faasivoolud on küll sümmeetrilised, kuid voolukõvera kuju on moonutatud.

Kui üks trafo mähisest on lülitatud kolmnurka või sikk-sakk ühendusse (näiteks Δ , Y , Δ/Δ , Y/Δ) siis nulljärgnevuskomponent trafot ei läbi, vaid see komponent kompenseeritakse trafo sees. Sealjuures erilisi trafo pinget moonutusi ei ole.

Ühenduse Y_0/Y_0 läbib nulljärgnevuskomponent trafot ja samuti pinget moonutusi ei teki. Ühendusel Y/Y_0 nulljärgnevuskomponent ei saa trafot läbida ja ta ka ei kompenseeru trafo sees. Sel juhul hakkavad siinused nulljärgnevusvoolud magnetima magnetahelat ja tekitavad pinget mittesümmeetria (joonis 3.32).



Joonis 3.32. Faasipingete süsteemi moondumine nulljärgnevusvoolude esinemisel Y/Y_0 lülituses

Kui trafo on kolmesambaline, siis sulgub nulljärgnevusvoolude magnetvoog läbi õhuvahemiku ja trafo paagi. Selle teekonna magnetiline takistus on suur ja selle tõttu tekkiv pinge mittesümmeetria ei ole eriti suur. Külgiketega trafosid aga ei saa kasutada lülituses Y/Y_0 muidu, kui trafotele paigutatakse kolmas mähis, mis on lülitatud kolmnurka ($Y/Y_0/?$). Siis saavad nulljärgnevusvoolud kompenseeruda ja pinge mittesümmeetriat ei tekitata.

Kui nulljärgnevusvooludeks on kõrgemad harmoonilised, siis tekib Y/Y_0 lülituses ka oluline pingekõvera moonutus. Kuna ühendusskeem Y/Y_0 on puudustega, siis kasutatakse tema asemel ka sikk-sakk skeemi Y/Z_0 , mille puhul on trafo aga veidi kallim.

Trafomähiste ühendusskeemi valikul peab arvestama ka asjaoluga, et kolmeafaasilise trafo primaar- ja sekundaarpinge suhe sõltub ka ühendusskeemist. Ühenduste puhul $??$ või Y/Y on primaar- ja sekundaarpoole liinipingete suhe tühijooksul võrdne trafomähiste keerdude arvu suhtega

$$\frac{U_{1l}}{U_{2l}} = \frac{w_1}{w_2},$$

kuid ühendusel $?/Y$

$$\frac{U_{1l}}{U_{2l}} = \frac{w_1}{\sqrt{3}w_2}$$

ja ühendusel $.Y/?$