

TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

Elektroenergeetika instituut

ALAJAAMAD

II

AEK3025

5,0 AP 6 4-1-1 E K

(eeldusaine AES3045 "Elektrivõrgud")

TALLINN

2009

SISUKORD**1. Sissejuhatus****2. Alajaama struktuur ja side elektrivõrguga**

2.1. Alajaama põhitüübid ja seadmete üldiseloostus

2.2. Alajaamade talitlustingimused

2.3. Elektriyaamade sidumine elektrivõrguga.

3. Alajaama põhiseadmed

3.1. Trafo ja autotrafo

3.1.1. Trafode ja autotrafode kasutamine elektrisüsteemis

3.1.2. Trafo soojuslik talitus

3.1.3. Trafo isolatsiooni kulumine ja koormusvõime

3.1.4. Trafole lubatavad ülekoormused

3.1.5. Elektrivõrgu neutraali ühendamine maaga

3.1.5.1. Isoleeritud neutraaliga elektrivõrk

3.1.5.2. Resonantsmaandatud elektrivõrk

3.1.5.3. Jäikmaandatud neutraaliga elektrivõrk

3.2. Kondensaatorpatarei

4. Alajaama kommutatsiooniseadmed

4.1. Võimsuslüliti

4.1.1. Elektrihaar ja elektrihaare kustutamine

4.1.2. Võimsuslülitite põhitüübid

4.1.3. Võimsuslülitite valik

4.2. Koormuslüliti

4.3. Kaarekustutuskambrita kommutatsiooniparaadid

4.4. Sulavkaitse

4.4.1. Sulavkaitsme tööpõhimõte

4.4.2. Sulavkaitsmete tüübid

4.4.3. Radiaalvõrgu selektiivne kaitse sulavkaitsmetega

5. Alajaama elektriskeemid

5.1. Jaotlate elektriskeemi koostamise üldpõhimõtted

5.1.1. Üldist

5.1.2. Ühekordsete ja kahekordsete kogumislattidega skeemid

5.1.3. Rõngasskeemid

5.2. Alampinge- ja ülempingejaotlate elektriskeemid

5.3. Ülempingejaotlate lihtsustatud elektriskeemid

5.4. Sõlmalajaamade elektriskeemid

5.5. Elektriyaamade jaotlate elektriskeemid

6. Voolujuhtivate osade arvutus

6.1. Voolujuht kestval voolul

6.1.1. Voolujuhi kuumenemine kestval voolul

6.1.2. Voolujuhi valik kestva voolu järgi

6.2. Voolujuht lühisel

6.2.1. Voolujuhi temperatuuri tõus lühisel

6.2.2. Lühisvoolu Joule'i integraal

6.2.2.1. Joule'i integraali definitsioon

6.2.2.2. Lühisvoolu perioodilise komponendi Joule'i integraal

6.2.2.3. Lühisvoolu aperioidilise komponendi Joule'i integraal

6.2.2.4. Lühisvoolu Joule'i integraali lihtsustatud arvutus

6.2.2.5. Aparaatide termilise taluvuse kontroll

6.3. Lühisvoolu elektrodünaamiline toime

6.3.1. Elektrodünaamilised jõud voolujuhtivate osade vahel

6.3.2. Elektrodünaamilised jõud kolmefaasilises voolujuhtide süsteemis

6.3.3. Lattide elektrodünaamilise taluvuse kontroll

6.3.4. Isolaatorite elektrodünaamilise taluvuse kontroll

7. Lühisvoolu piiramine

7.1. Lühisvoolu piiramine võtetega elektriskeemi koostamisel

7.2. Voolupiiravate reaktorite konstruktsioon ja kasutamine

7.3. Voolupiiravate reaktorite valik

8. Elektriseadmete maandamine

8.1. Maandustakistus

8.2. Puute- ja sammupinge

8.3. Potentsiaali ühtlustamine

8.4. Maandusseadme konstruktsioon ja arvutus

9. Jaotlate konstruktsioon

- 9.1. Elektriohutust ja talitluskindlust tagavad nõuded
- 9.2. Ohutusvahemikud
- 9.3. Lahtised ja kinnised jaotlad
- 9.4. Kohapeal koostatavad ja komplektjaotlad
- 9.5. Lahtiste jaotlate konstruktiivsed iseärasused
- 9.6. Alajaamade piksekaitse

10. Alajaamade omatarve

11. Elektrimõõtmised. Juhtimine, kontroll ja signalisatsioon

4. Alajaama kommutatsiooniseadmed

4.1. Võimsuslülitid

4.1.1. Elektrihaar ja elektrihaare kustutamine

Võimsuslülitid on kommutatsiooniparaadid, mis on ette nähtud lühisvoolude, koormusvoolude ja liinide ning tühijooksus trafode sisse- ja väljalülitamiseks.

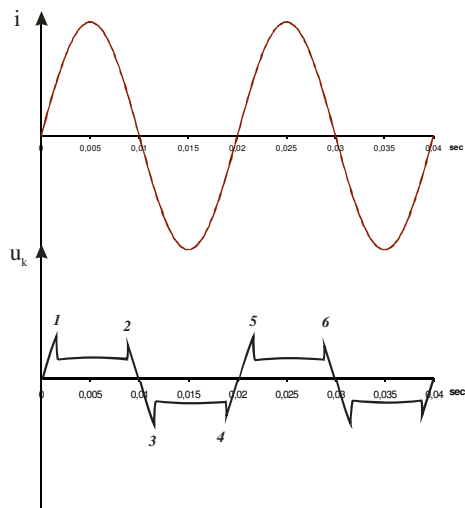
Vooluga elektrihaela katkestamisel tekib vastavalt elektromagnetilise induktsiooni reeglitele katkestuskohal alati pinget, mille väärtus sõltub ahela induktiivsusest ja voolu muutumiskiirusest. Kui elektrihaelas on piisava võimsusega toiteallikas, läheb sädelahendus seejärel üle elektrihaarlahenduseks e lühemalt elektrihaareks.

Elektrihaar on sõltumatu elektrilahendus, mida iseloomustab lahenduskanali suhteliselt suur läbimõõt (ulatub mitme sentimeetrini), tugev valguskiirus peamiselt spektri punases ja kollases osas, väike pingelang kaare pikkusühiku kohta, ajaline püsivus, kõrge temperatuur ja vaba lahenduskanali kaardumine üles läbi kaare ülespoole liikuvate kuumenenud gaaside tõttu. Kui elektrihaar läbib vool tugevusega üle paarisaja ampri, võib see vabas õhus elektroodide eemaldumisel teineteisest enne katkemist venida isegi 10 või enama meetri pikkuseks. Kuna lülitusseadmete kontaktide lahutamine sellistele vahekaugustele on praktikas võimatu, siis ei ole näiteks alalisvoolu elektrihaare katkestamine kõrgepingetel võimalik. Alalisvoolulülitid saavad toimida näiteks nii, et suurendatakse elektrihaare takistust ja sellega vähendatakse vool kunstlikult nullini¹.

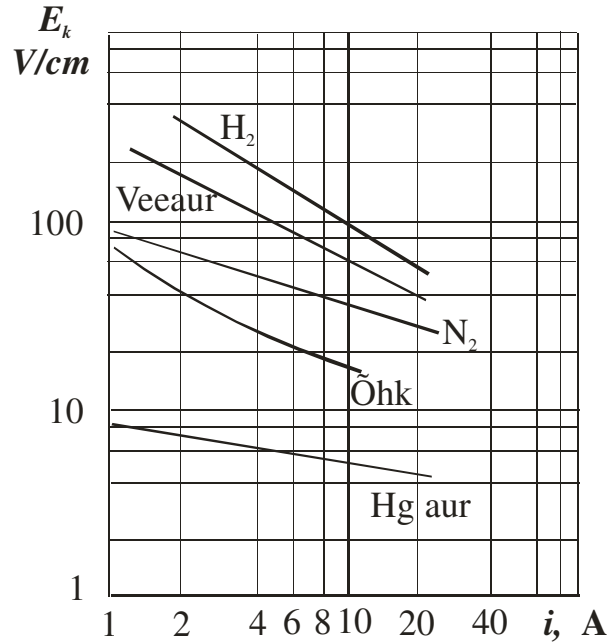
Elektrihaar vahelduvvooluahelas seevastu kustub voolu igal nullist läbimisel ja süttib voolu taastumisel uuesti. Elektrihaare selline omadus võimaldab luua lülitusseadmeid, mis suudavad lahutada suure vooluga kõrgepingeahelaid. Selleks tuleb takistada kaarlahenduse taassüttimist pärast kustumist voolu nulli läbimisel. Protsessi nimetatakse lühidalt kaare kustutamiseks. Kaare taolisel viisil kustutamisel avaldub ka kaare positiivne mõju elektrihaelate kommuteerimisele – elektrivool ahelas katkeb alati voolu nulli läbimise hetkel ja elektriseadmete põikiisolatsioonile maa suhtes ei teki ohtlikult suuri liigpingeid.

4.1.1.1. Elektrihaare omadused

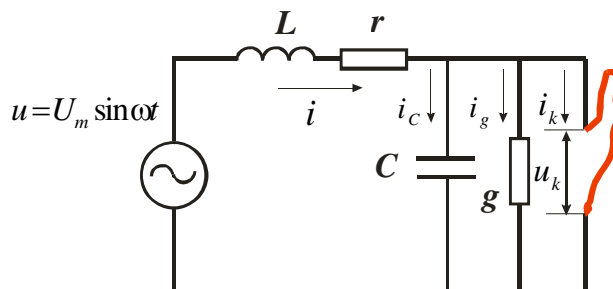
¹ Kahjuks pole taoline meetod rakendatav kõrgetel pingetel ja neid lüliteid käesoleva kursuse raames ei vaadelda.



Joonis 4.1.
Pinge- ja voolukõver elektrikaarel



Joonis 4.2
Pingelang kaare pikkusühiku kohta



Joonis 4.3
Elektrikaarega elektrivõrgu aseskeem

4.1.2. Võimsuslülitite põhitüübid



Joonis
Elegaasüliti (esiplaanil voolutrafo)

4.1.3. Võimsuslülitite valik

4.2. Koormuslülitid

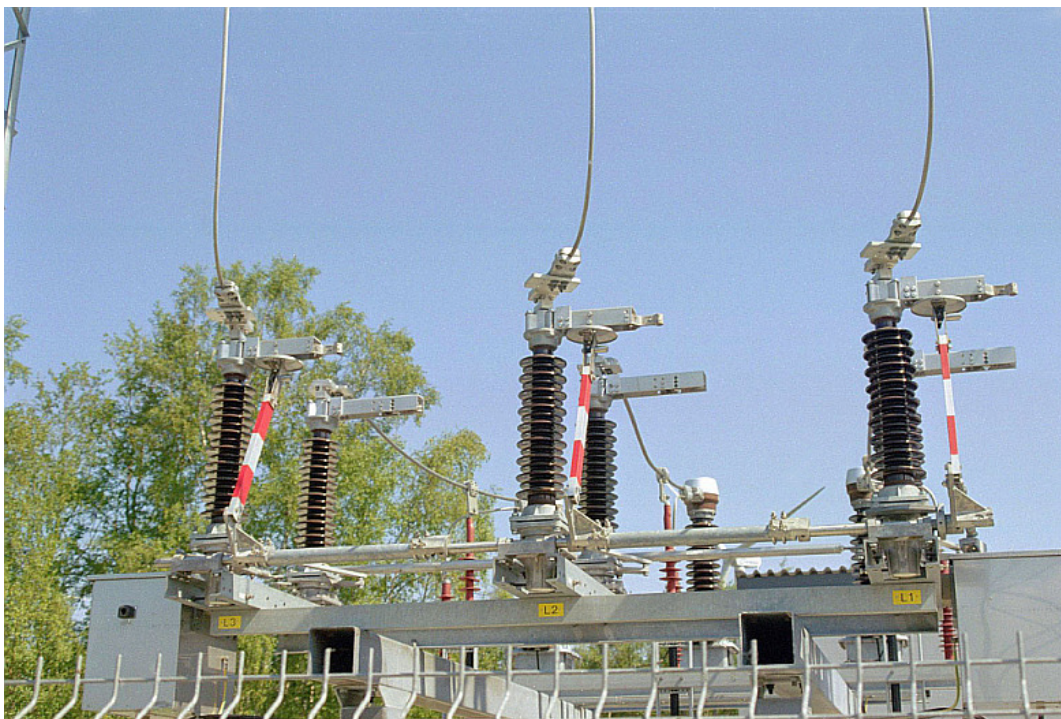


Joonis
Koormuslülitid koos sulavkaitsmega

4.3. Kaarekustutuskambrita kommutatsiooniaparaadid



Joonis 4.ccc
Horisontaalpinnas pöörduvate nugaodega kahesambaline lahküliti
Nimipinge 110 kV, nimivool 1200 A



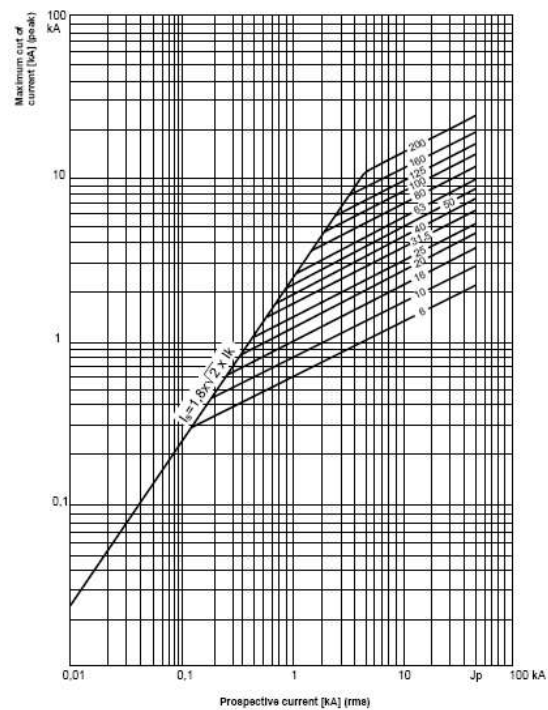
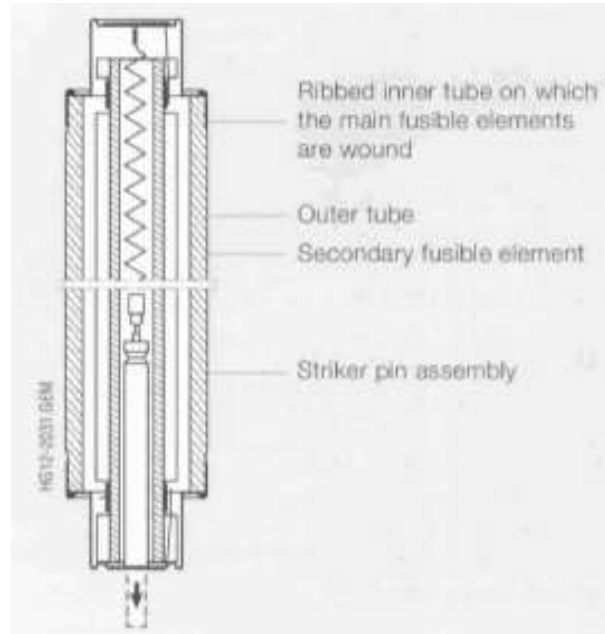
Joonis 4.ccc
Horisontaalpinnas pöörduvate nugaodega kahesambaline lahklüliti



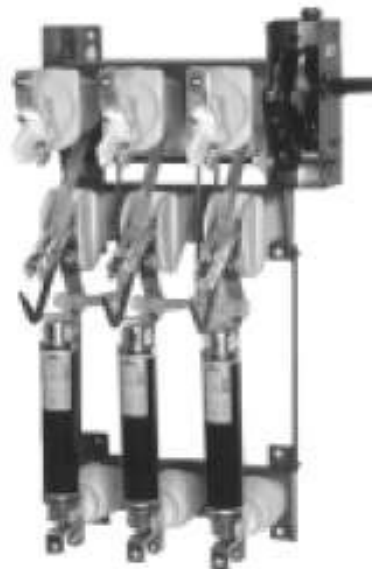
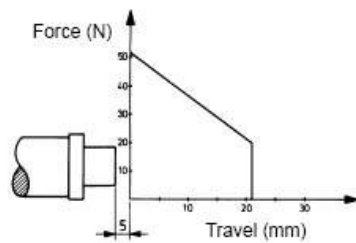
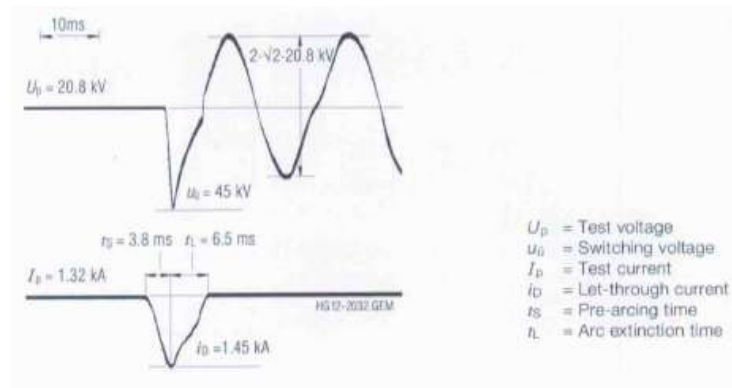
Joonis 4.ssss
Pantograaf-lahklüiti

4.4. Sulavkaitse

4.4.1. Sulavkaitsme tööpõhimõte



4.4.2. Sulavkaitsmete tüübid



4.4.3. Radiaalvõrgu selektiivne kaitse sulavkaitsmetega

5. Alajaama elektriskeemid

5.1. Jaotlate elektriskeemi koostamise üldpõhimõtted

5.1.1. Üldist

Elektrijaamade ja –alajaamade primaar- e jõuahelate kommutatsiooniparaadid, mõõtetrafod, liigpingete piiramiseadmed, kõrgsagedusside vahendid ja kogumislattid koondatakse kompaktsesse tervikutesse – jaotusseadmetesse e jaotlatesse. Jaotlas võetakse elektrienergia vastu toitefiidri(te)lt, milleks võivad olla õhu- ja kaabelliinide ning jõutrafode kesk- ja alampingemähiste ühendused, ning suunatakse edasi väljuvatesse liinidesse. Jaotlad koos alajaama põhiseadmetega (trafod, reaktorid jms) moodustavad nn primaarkommutatsiooniskeemi.

Kõige levinumat tüüpi alajaamas on kaks jaotlat (kõrge- ja keskpingele, või siis kesk- ja madalpingele), kuid elektrivõrgu sõlmedes ja suuremate tarbimispiirkondade toitmiseks kasutatakse ühes alajaamas isegi kuni viit eripingelist jaotlat. Suuremate elektrijaamade juures võib jaama sidumiseks ülekandevõrguga kasutada ka ühepingelist alajaama.

Jaotlaid eristatakse peamiselt kogumislattide arvu, möödaviiklattide olemasolu ja kommutatsiooniseadmete arvu ning kasutusviisi alusel. Enamikel juhtudel kasutatakse kas ühe- või kahekordseid kogumislatt^{*)}, kusjuures peetakse silmas, et latt kujutab endast kolme faasilist konstruktsiooni, mida lihtsuse mõttes kujutatakse primaarkommutatsiooniskeemidel ühejoonelistena. Millist skeemi igal konkreetselt juhtumil kasutada, sõltub nõuetest elektri edastuse töökindlusele, see aga omakorda alajaama tähtsusest elektrisüsteemis, vajadusest elektrivõrku teatud olukordades sektsioneerida ja lühisvoolude suurusel. Silmas tuleb pidada personali ohutust, seadmete hoolduse ja isolatsiooni puhastamise võimalusi ning võimalusi laiendusteks elektrisüsteemi arengu jooksul.

Kõrgpingejaotlad on seotuse tõttu ülekandevõrguga üldjuhul keerukama primaarskeemiga, keskpingejaotlatele esitatavad nõuded on nõrgemad, eriti kui on tegemist piiratud ulatusega tarbijarühmade toimisega keskpinge/madalpinge (*ingl.* MV/LV) alajaamadest.

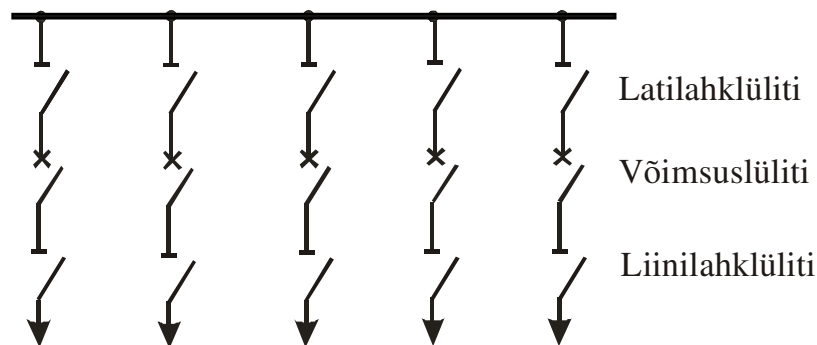
Elektrisüsteemis tuleb alati arvestada seadmete tõrkevõimalustega. Elektrijaamades, elektriliinidel ja jaotlates võivad tekkida lühised, kommutatsiooniseadmete ajamid võivad olla riknenud, võimsuslülitite kaarekustutuskeskkond on hävinud jne. Kuna suurimate voolude tekitajaks on lühised ja nende kaotamiseks tuleb võrgu riknenud element võimsuslülitite(te)ga välja lülitada, siis eriti suurt töökindlust nõudvates võrguosades arvestatakse olukorraga, kus võrgu normaaltalitluse ajal toimuva võimsuslülitite hoolduse jooksul oleks lüliti siiski vaja. Taolises olukorras saab lahenduseks olla vaid mingi fiidri ühendamine jaotlaga läbi kahe rööbitise võimsuslülitite. Selline võimalus tekib nn rõngasskeemide kasutamisega.

Lihtsamatel juhtudel piisab ahela kaitseks ühest võimsuslülitist. Kasutada võib ühe- ja kahekordseid kogumislattide.

^{*)} Harvem kasutatakse mõisteid üks või kaks kogumislatti ja ühe- või kahekordseid kogumislattide süsteeme.

5.1.2. Ühekordsete ja kahekordsete kogumislattidega skeemid

Lihtsaim ja ühtlasi odavam on ühekordsete kogumislattidega jaotla, milles iga ühendus seotakse kogumislattidega võimsuslülitiga, latilahklüliti ja liinilahklüliti abil (vt jn 5.1).

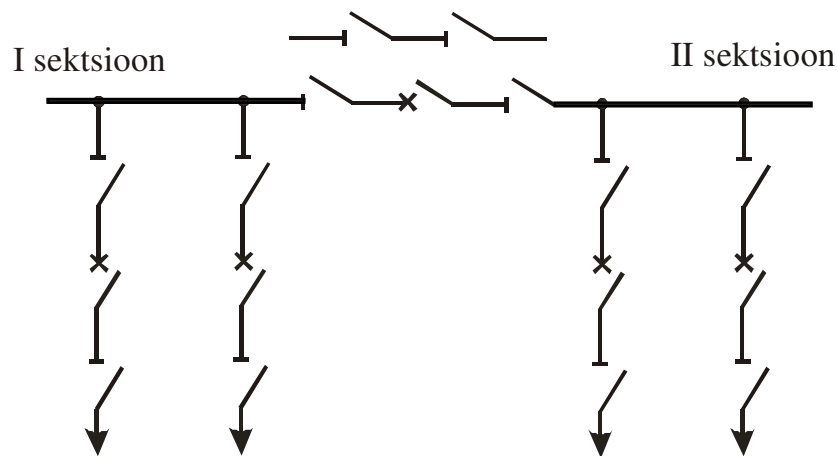


Joonis 5.1.

Ühekordsete kogumislattidega jaotla skeem

Skeemi puuduseks on jaotla väljalülitumine lühise korral kogumislattidel ja latilahklülitis. Lühis võimsuslülitis tekitab sama olukorra.

Mõnevõrra saab ühekordsete kogumislattidega jaotla töökindlust tõsta lattide sekteerimisega. (vt jn 5.2).



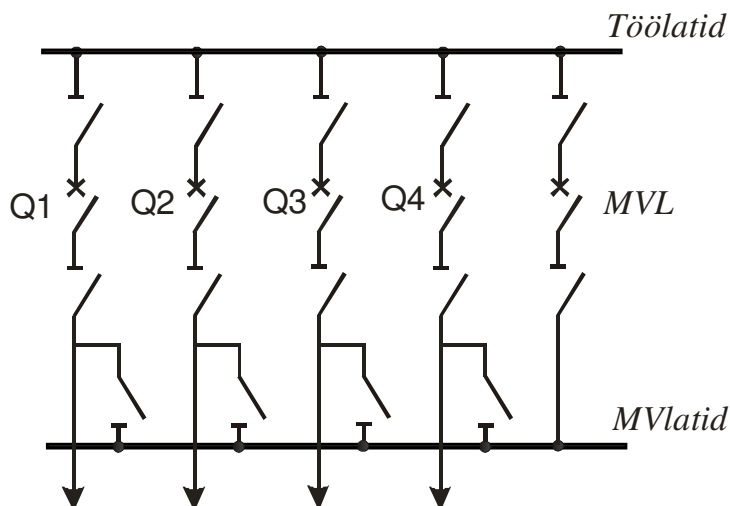
Joonis 5.2.

Ühekordsete kogumislattidega sekteeritud jaotla skeem

Sektsioonide arv valitakse võrdseks trafode või väiksemates elektrijaamades elektrivõrgu nimipingega võrdse nimipingega generaatorite arvuga. Sektsioneerimiseks kasutatakse võimsuslülitit või lahklüliteid. Esimesel juhul tekib ühelt latisektsioonilt toite kadumisel reservi automaatse lülitamise (RLA) võimalus, teisel juhul see võimalus puudub. Kaht jadamisi lahklüliti kasutatakse siis, kui on vaja tagada nende isolatsiooni puhastamist latisektsiooni hoolduse ja remondi ajal.

Sektsioonide arv jaotlas võib olla suurem kui kaks, kuid nelja või enama sektsiooni korral kasvab oht elektrivõrgu jagunemiseks kahte teineteisest sõltumatusse ossa.

Kõige mahukamateks töödeks jaotlas on tavaliselt võimsuslülitite hooldus ja remont. Ühekordsete kogumislattidega jaotla korral jääb sel ajal toiteta ka vastav fiider. Toitekatkestuse vältimiseks kasutatakse mõnikord möödaviiklatte (vt jn 5.3).

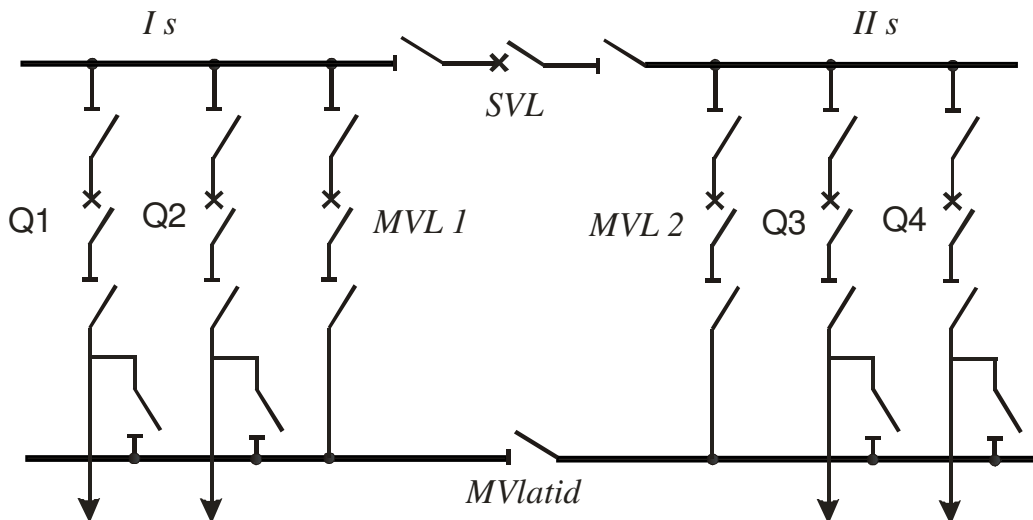


Joonis 5.3.

Ühekordsete kogumislattidega ja möödaviiklattidega jaotla skeem

Möödaviiklatid MVL koos möödaviiklülitiga Q5 ja möödaviik-lahklülititega võimaldavad toidet katkestamata ükshaaval remontida võimsuslülitid Q1 kuni Q4, või puhastada nende isolatsiooni.

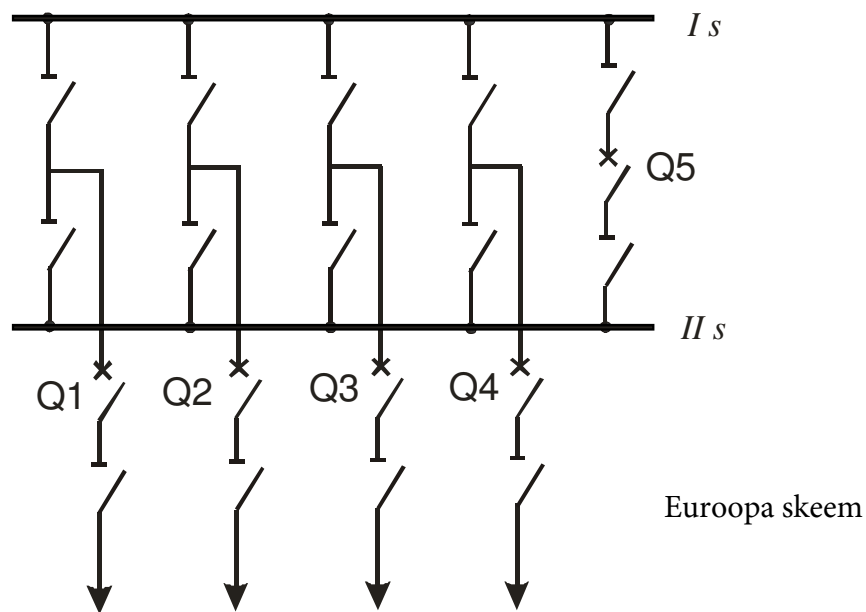
Mõeldav on nii kogumislattide kui möödaviiklattide seksioneerimine. Joonisel 5.4 on kujutatud üks selline võimalus. Hooldustööde paindlikumaks muutmiseks võib täiendavalt kasutada möödaviiklattide seksioneerimist lahklülitiga.



Joonis 5.4.

Ühekordsete seksioneeritud kogumislattidega ja möödaviiklattidega jaotla skeem

Seoses võimsuslülitite töökindluse kasvuga ja hooldusväljade pikenedamisega on ühekordsete kogumislattidega ning möödaviiklattidega jaotla skeem oma tähtsust kaotamas.



Joonis 5.5.
Kahekordsete kogumislattidega jaotla skeem

Suuremates jaotlates leiab kasutamist kahekordsete kogumislattidega jaotla skeem (vt jn 5.5).

Selles jaotlas on võimalikud erinevad kasutusvariandid:

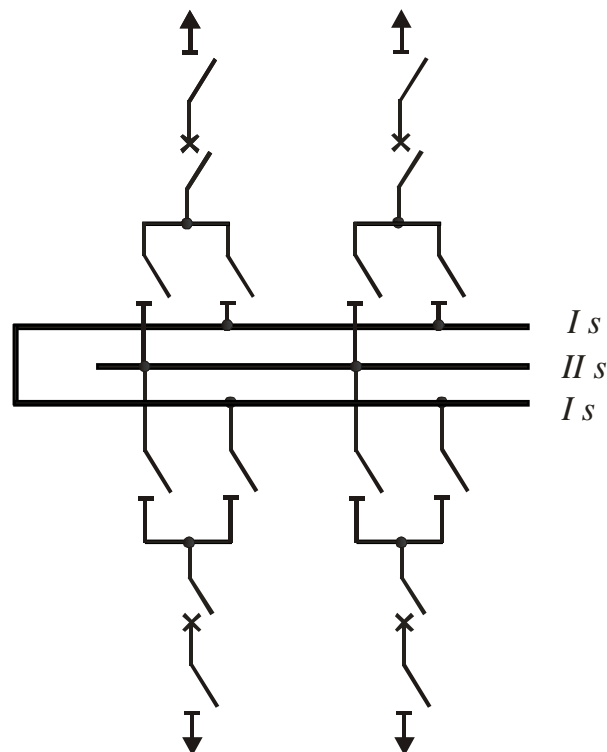
- Kõik fiidrid on ühendatud ühele kogumislattide süsteemile – I s või II s. Lattidevaheline võimsuslülitite Q5 võib olla sisse lülitatud ja koormust mitte kandev latisüsteem on pingestatud ning toimub pidev isolatsiooni kontroll. Koormatud latisüsteemi lühise korral on võimalik fiidrid üle viia teisele latisüsteemile.
- Fiidrid on latilahklülitite abil jaotatud võimalikult võrdse koormuse alusel süsteemide vahel nii, et lülitit Q5 läbiv vool oleks minimaalne. Seda kasutusviisi nimetatakse fikseeritud ühendustega skeemiks. Skeem meenutab ühekordsete seksioneeritud kogumislattidega jaotla skeemi, milles seksioonilülitite rolli täidab Q5. Vajadusel võib fiidrid üle viia ühele latisüsteemile ja remontida tarbijatele elektrikatkestust tekitamata teist latisüsteemi ja puhastada selle isolatsiooni (NB! Latilahklülitite remont on keelatud. Eluohulik!).

Kahekordsete kogumislattidega jaotla puuduseks on ümberlülituste keerukus, sest lahkliititega koormatud ahelaid kommuteerida ei tohi, tekib avatud elektrikaar. Samuti ei ole võimalik remontida võimsuslülititeid fiidreid välja lülitamata. Viimasest olukorrast aitab välja pääseda möödaviiklattide süsteem.

Kahekordsete kogumislattidega ja ühekordsete kogumislattide ning möödaviiklattidega jaotlate eelpoolkirjeldatud juhtudel on puuduseks ühenduste tülikas suunamine jaotlast

vastassuundadesse. Kui liinide ühendamise peab toimuma vastassuundadest, on kaks võimalust:

- võimsuslülitid paigutatakse ühte ritta ühele poole kogumislattide vastavalt joonisele 5.5. Sel juhul on liine ja trafosid mugav ühendada ühes suunas väljuvatena, kuid vastassuunas väljumiseks tuleb ühendus teha üle kogumislattide,
- võimsuslülitid paigutatakse kahte ritta kahele poole kogumislattide. Ühed kogumislattid võib ehitada U-kujuliselt ümber teiste lattide (vt jn 5.6).



Joonis 5.6.

Kahekordsete kogumislattidega kahes suunas avaneva jaotla skeem

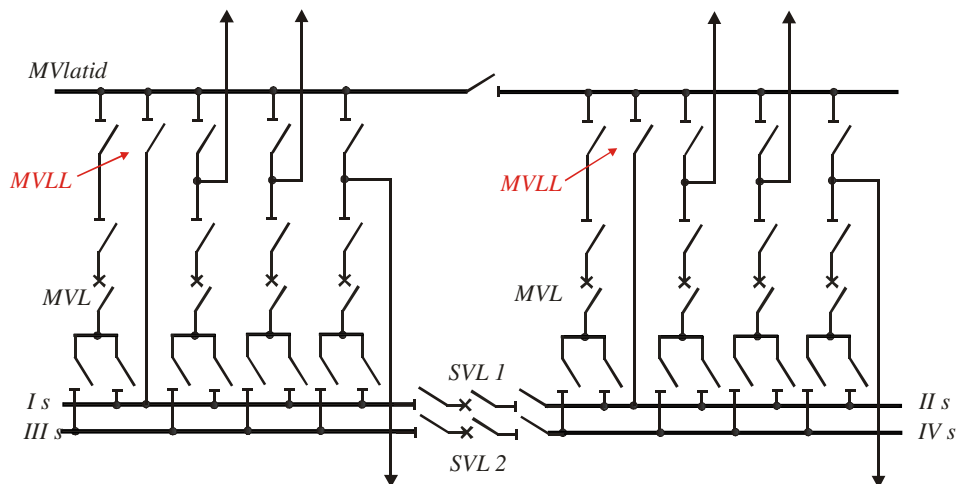
Kahekordsete kogumislattidega jaotlas on samuti võimalik kasutada möödaviiklattu, mis võimaldab ühendust katkestamata hooldada ja asendada ühenduse võimsuslülitit.

Jaotlaid saab iseloomustada kahe olulise näitajaga. Esiteks on selleks töökindlus. Teiseks on jaotlate ökonoomsuse näitaja võimsuslülitite arv ühe ühenduse (fiidri) kohta N_f . Suur võimsuslülitite arv näitab jaotlale tehtavate investeeringute mahtu ja ka hoolduskulusid. See võimsuslülitite erikulu N_f ei tohiks olla liig suur.

Joonisel 5.1 kujutatud skeemile $N_f = 1$ VL/fiider. Sektsioonidevahelise lüliti kasutamisega saame erikuluks (jn 5.2)

$$N_f = \frac{\text{Fiidrite arv} + 1}{\text{Fiidrite arv}}.$$

Sama N_f väärtus saadakse möödaviiklüliti kasutamisel (jn 5.3).



Joonis 5.7

Seksioneeritud kahekordsete kogumislattidega ja möödaviiklattidega jaotla skeem

Seksioneerimise ja möödaviiklattide kasutamisega suureneb võimsuslülitite erikulu veelgi. Joonise 5.4 skeemile saame

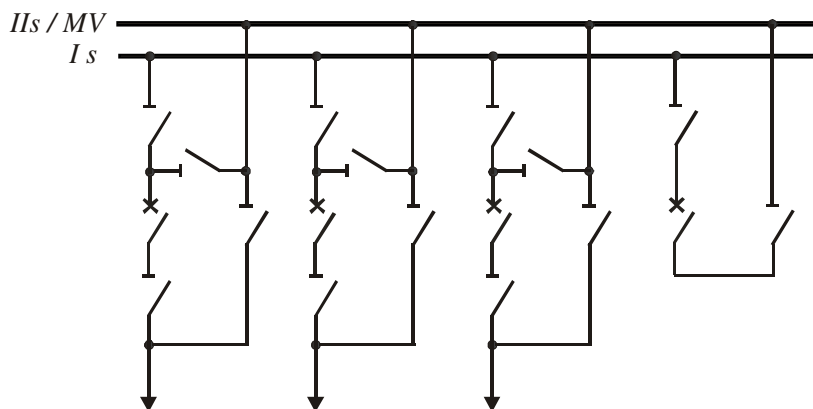
$$N_f = \frac{\text{Fiidrite arv} + 3}{\text{Fiidrite arv}}.$$

Võimsuslülitite suur erikulu sunnib otsima lihtsustusi. Sellega seoses on joonisel 5.7 kujutatud jaotlas ühitatud lattidevahelise ja möödaviiklülitite funktsioon ja skeemi on lisatud odavam möödaviik-lahklülitite *MVLL*. Võimsuslülitite erikuluks saame

$$N_f = \frac{\text{Fiidrite arv} + 4}{\text{Fiidrite arv}}.$$

Edasiseks lihtsustamiseks võib loobuda ühe kogumislatti seksioneerimisest ja koguni kasutada ühtainsat möödaviiklülitit. Kahjuks suurendavad kõik sellised võtted käidu ebamugavust ja vähendavad jaotla töökindlust.

Oululiselt lihtsamaks kujuneb kombineeritud skeem, milles üht kogumislatti võib kasutada nii töölatina kui ka möödaviiklatina (jn. 5.8).



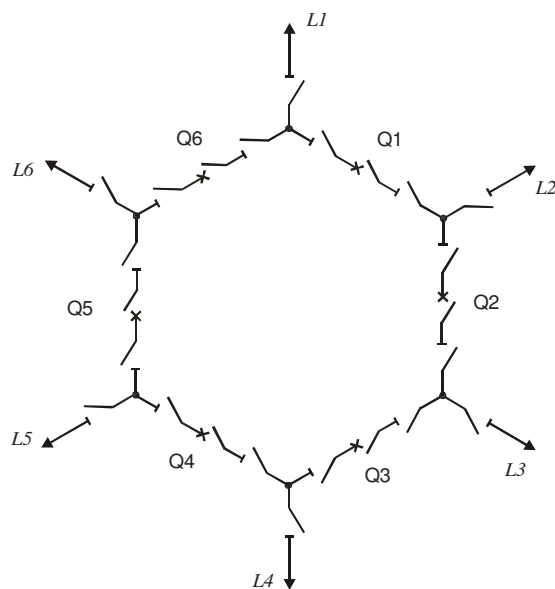
Joonis 5.8

Kahekordsete lattidega kombineeritud töö- ja möödaviiklattidega skeem

5.1.3. Rõngasskeemid

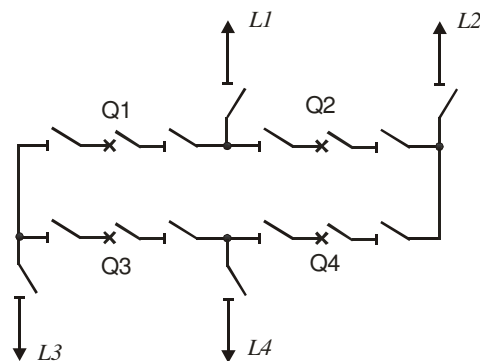
Elektrivarustuse töökindluse tõstmiseks kasutatakse jaotlates ühe fiidri kaitseks kaht võimsuslülitit. Sellise jaotla kõige odavamaks variandiks on nn hulknurkskeem.

Joonisel 5.9 on kujutatud kuusnurkskeem, milles võimsuslülitid $Q1 \dots Q6$ on ühendatud kuusnurgaks ja fiidrid $F1 \dots F6$ väljuvad kuusnurga tippudest. Normaaltalitusel on kõik võimsuslülitid sisselülitatud asendis ja kõik lahklülitid on samuti suletud. Lühise korral mistahes fiidris lülituvad välja selle fiidriga vahetult külgnevad võimsuslülitid ja kuusnurk katkeb. Selles seisneb hulknurkskeemide peamine puudus, kuna mingi võimsuslülitid hoolduse ajal võib lühis mõnes fiidris lahutada hulknurga osadeks (näiteks lülitid $Q1$ hooldusel jätab lühis fiidris $F5$ omavahel ühendatuks ühelt poolt ainult fiidrid $F1$ ja $F6$ ning teiselt poolt fiidrid $F2$, $F3$ ja $F4$). Ülekandevõrgus võiks selline olukord tekitada mõne võrguosa saartalitluse.



Joonis 5.9
Kuusnurkskeem

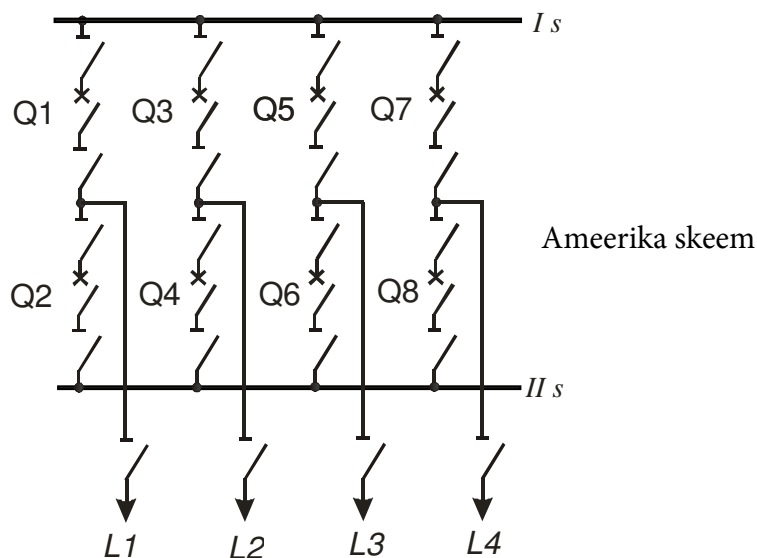
Ülalkirjeldatud põhjusel ei kasutata neljast suurema nurkade arvuga hulknurkskeeme.



Joonis 5.10
Nelinurkskeem

Enim on nt 330 kV võrkudes levinud kolmnurkskeemid, sest siis ei ole enam süsteemi osadeks lagunemine võimalik. On võimalik kogu jaotla väljalülitumine, kuid jaotla elementide väikese arvu tõttu on see vähetõenäone.

Suurima töökindluse tagavad kahekordsete lattidega kahe võimsuslülitiga ahela kaitseks jaotlad (jn. 5.11). Jaotla kõik võimsuslülitid on sisse lülitatud ja neid lülitatakse välja ainult lüliti või kogumislattide hoolduseks (isolatsiooni puhastus, lüliti ülevaatus) ja lühiste korral fiidrites või lattidel. Joonisel ülemise või alumise rea võimsuslülitite väljalülitamine ei tekita jaotla fiidrite üksteisest eraldumist.



Joonis 5.11

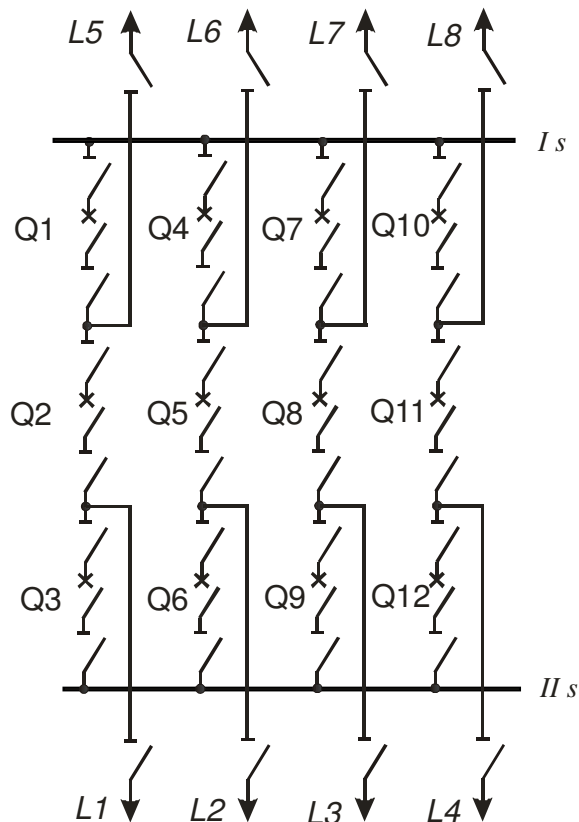
Kahekordsete lattidega ja kahe võimsuslülitiga fiidri kohta jaotla skeem

Selles jaotlas võimsuslülitite erikulu on

$$N_f = \frac{\text{Fiidrite arv} * 2}{\text{Fiidrite arv}} = 2.$$

Kuna N_f on ülemäära suur ja jaotlad osutuvad väga kalliks, siis kasutatakse lihtsustatud variante, kus võimsuslülitite arv on oluliselt väiksem ja töökindluse kadu ei samal ajal liig suur. Sellistest jaotla skeemidest on sagedamini kasutatav nn 3/2-skeem (nimetatakse veel poolteistskeemiks, vt jn 5.12). Ka selle skeemi korral hoitakse kõiki võimsuslülititeid sisselülitatud asendis. Välja lülitatakse neid ainult lühiste puhul või hoolduseks. Võrreldes kahe lüliti skeemiga tekib võimalus mõne ühenduse katkemiseks lüliti hoolduse ajal. Näiteks lüliti Q1 hoolduse ajal toimuv lühis liinil L1 jätab ühenduseta ka liini L5.

Jaotlates lüliti arvu edasiseks vähendamiseks leiab harvemini kasutamist veel nn 4/3-skeem (1,33-skeem), milles lattide vahele ühendatakse nelja võimsuslülitiga ahelad kolme fiidriga selles ahelas.



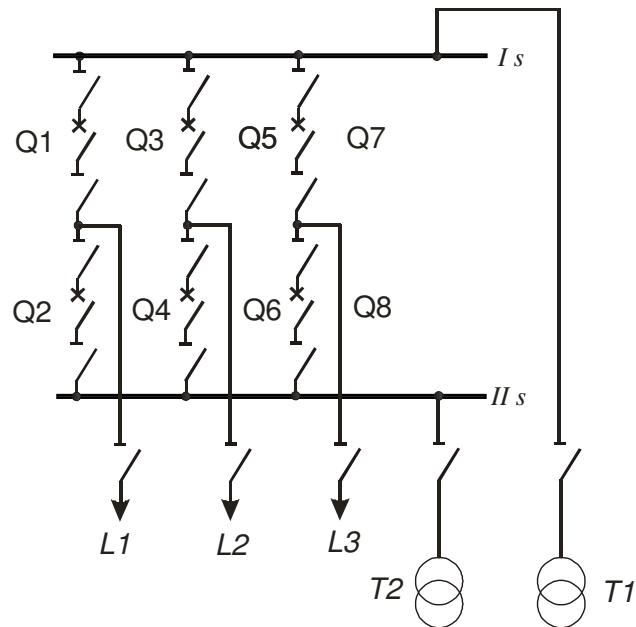
Joonis 5.12
3/2-skeem (poolteistskeem)

5.2. Ülempingejaotlate elektriskeemid

Jaotises 5.1 esitatud jaotlate primaarskeemide kasutamine sõltub alajaama tüübist (sõlm-, läbiv-, väljavõttel või lõppalajaam), toitepiirkonna suurusest, alajaama tähtsusest elektrisüsteemis jms. Oluline on ka alajaama paiknemine kas linnaruumis või maapiirkonnas. Erinevad on jaotlate skeemid ülem-, kesk- ja alampingel.

Suurimad nõuded töökindlusele esitatakse sõlmalajaamade ülempingejaotlatele pingega 110 kV ja enam. 330 kV jaotlates kasutatakse skeeme kahe võimsuslülitiga ahela kaitseks. Suure maksumuse tõttu jn 5.12 skeem kasutamist ei leia (võimsuslülitite arv fiidri kohta on liig suur). Enamat kasutamist leiab 3/2-skeem, seda eriti näiteks suuremate elektrijaamade juures, kus plokkide “generaator-pinget tõstev trafo” arv võib olla suurem kui kolm.

Juhul, kui alajaama ülempingelisse jaotlasse on ühendatud kaks pinget alandavat trafot, leiavad kasutamist nn latid-trafo plokkiskeemid, kus loobutakse trafoühenduste võimsuslülititest (vt jn 5.13). Skeemi koostamisel lähtutakse trafode oluliselt suuremast töökindlusest võrreldes õhuliinidega.

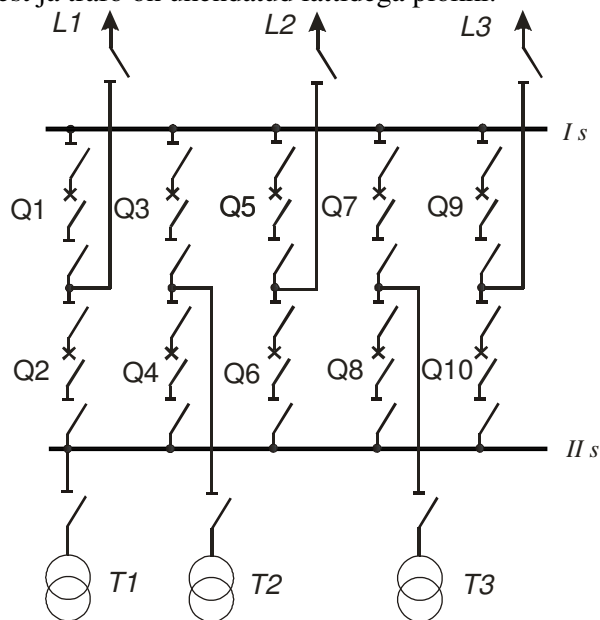


Joonis 5.13

Skeem "latid-trafod" kahe võimsuslülitiga väljuva liini kohta

Juhul, kui õhuliinide arv on suurem, võib jn 5.13 kujutatud skeemis liinide ühendused asendada 3/2-skeemi põhimõttel loodud skeemiosadega.

Eriti oluliste sõlmalajaamade ülepingejaotlate skeemid koostatakse mõnikord ka ühtainsat konkreetset alajaama silmas pidades. Joonisel 5.14 on esitatud üks võimalik ülepingejaotla skeem kolme trafo ja kolme õhuliiniga. Selles on loobutud ühe trafo ($T1$) fiidri võimsuslülititest ja trafo on ühendatud lattidega plokki.



Joonis 5.14

Sõlmalajaama ülepingejaotla skeem

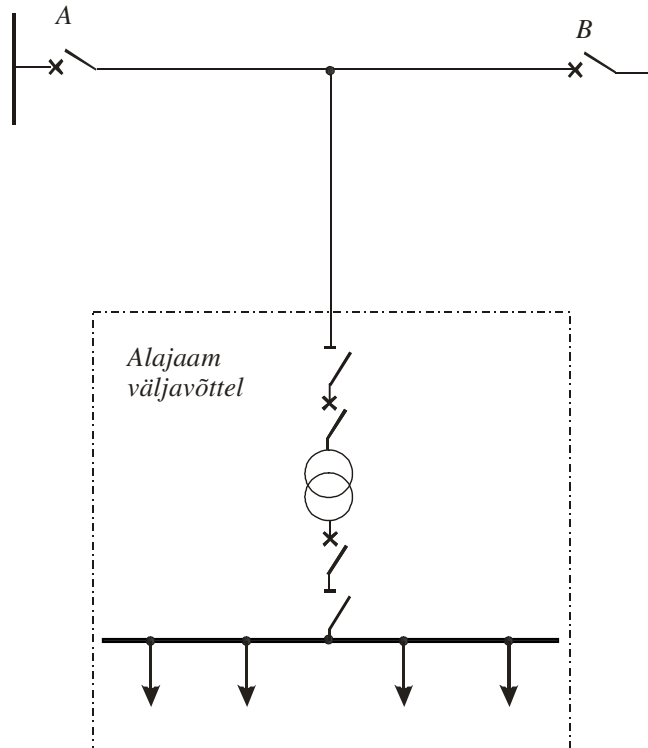
5.3. Keskpinge- ja alampingejaotlate elektriskeemid

Käesolevas jaotises peetakse keskpingejaotlatena silmas enama kui kahe pingeastmega alajaama keskmise (või keskmiste, kui on mitu) pingega jaotlaid ja alampingejaotlatena kõige madalama, kuid 35 kV mitte ületava pingega jaotlaid. Näiteks nelja pingeastmega 330/110/35/10 kV alajaamas loeme keskpingejaotlateks 110 kV ja 35 kV jaotlaid ning alampingejaotlaks 10 kV jaotlat. Samal ajal 110 kV pingeklassi loetakse pinge väärtuse alusel kõrgepingeks ja 35 kV pingeklassi keskpingeks.

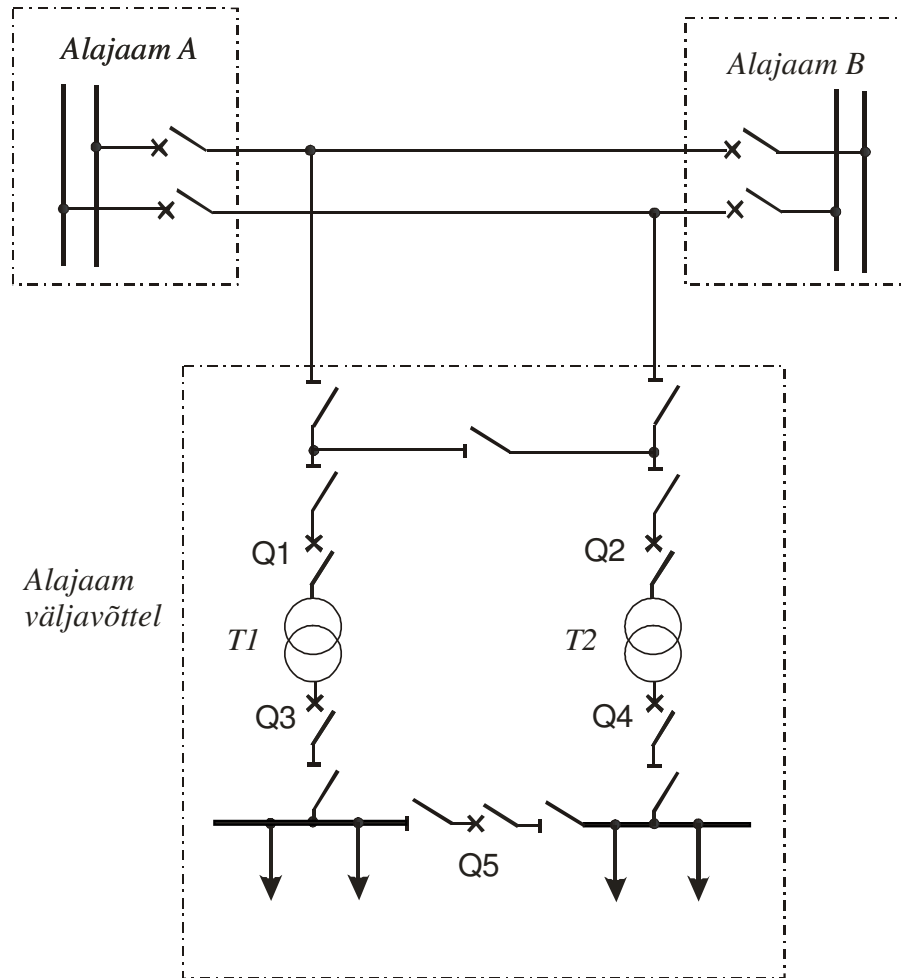
Keskpingejaotlate elektriskeemi määrab jaotla kaudu toidetava elektrivõrgu tähtsus süsteemis. Kui pinge on 110 kV kõrgepinge, siis sellel pingel elektrivõrk on reeglina silmusvõrk, mis on ette nähtud suurema piirkonna ülekandevõrguks. Rikked jaotlas toovad kaasa suuri kahjumeid nii tarbijatele, aga ka elektrivõrgule müümata jäänud energia ning võimalike kahjude kompenseerimistaotlust rahuldamise tõttu. Sellise keskpingejaotla töökindlus peab olema suur ja enamikel juhtudel kasutatakse kahekordsete lattide ja ühe võimsuslülitiga ahela kaitseks skeeme. Eriti olulistel juhtudel on lisaks veel kasutatud möödaviiklatte.

Alampingejaotlad toidavad piiratud ulatusega piirkondade radiaalvõrke ja nende arv võrreldes kõrgema pingega jaotlate arvuga on suur. Esmatähtsaks muutuvad investeeringute suurus ja lisaks töökindlus.

5.4. Ülempingejaotlate lihtsustatud elektriskeemid



Joonis 5.
Väljavõttel, ühe siseneva liiniga alajaam



Joonis 5.
Väljavõttel kahe trafo alajaam

6. Voolujuhtivate osade arvutus

6.1. Voolujuht kestval voolul

6.1.1. Voolujuhi kuumenemine kestval voolul

Vooluga juhi kuumenemist põhjustavad kaod juhti läbivast voolust, pöörivoolukaod, ümbermagneetimiskaod ja dielektrikaod. Dielektrikaod võivad olla olulised kaablites ja läbiviikisolaatorites, kuid nad ei põhjusta tavaliselt juhtide temperatuuri olulist tõusu. Ümbermagneetimiskaod on väga olulised magnetmaterjalidest elektrivoolu kandvates ahelates (maanduselektroodid, terassõrestikud jms.), pöörivoolukaod võivad tõsta juhte ümbritsevate kaitsekatete temperatuuri ja sellega kaudselt ka juhi temperatuuri. Jaotlate põhielementideks on isoleerimata paljasjuhid ja neile on peamiseks kadude allikaks läbiv vool.

Voolujuhtide temperatuuritõusu tuleb piirata kolmel põhjusel:

- isolatsiooni majandusliku eluea tagamiseks,
- elektrikontaktide töökindluse tagamiseks ja
- metallide mehaanilise tugevuse märgatava vähenemise ärahoidmiseks.

Mainitud eesmärkide saavutamiseks tuleb kehtestada juhtidele püsitalitluse ja siirdeolukordade suurimad lubatavad temperatuurid. Esimesena tuleb vaadelda voolujuhtide temperatuuritõusu lubatud piire püsitalitluses.

Isolatsiooni majandusliku eluea tagamise aluseks on temperatuurikindluse klassid, mis näitavad, millisel temperatuuril võib isolatsioon talitleda vähemalt 20000 tundi. Temperatuurikindluse klasside alusel leitakse temperatuurid, millel isolatsioon võib püsivalt talitleda ettenähtud eluea kestel, milleks tavaliselt loetakse 20 kuni 30 aastat.

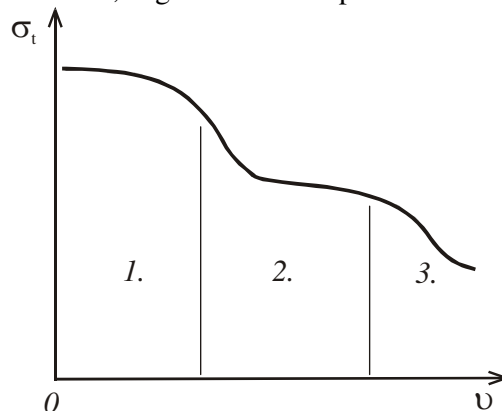
Põhilised temperatuurikindluse klassid on järgmised:

Temperatuurikindluse klassi tähis	Y	A	E	B	F	H	C
Temperatuur, °C	90	105	120	130	155	180	üle 180

Elektrikontaktide töökindluse hindamisel tuleb arvestada sellega, et kontakti näivpindala (kontakti mõõtmetele vastav pindala) on pinnakareduse tõttu oluliselt suurem kontakti voolujuhtivast pindalast. Voolu ülemineku kohas ühest kontakti poolest teise tekkivad nn ahenemispirkonnad, milles voolutihedus on suur ja nende piirkondade temperatuur on muudest kontakti osadest kõrgem. Kõrgemal temperatuuril võivad kontakti pooled seetõttu oksüdeeruda, nende vahele võib tekkida isegi sädelus ja temperatuuri edasine tõus, mille tagajärjeks on kontaktipoolte keevitumine või vastupidi elektrijuhtivuse kadumine.

Kontaktide lubatud kestevtemperatuur sõltuv juhi materjalist, ning on vasele ja alumiiniumile +70 °C. Hõbetamisega või hõbedasulamite kasutamisega saab lubatud temperatuuri tõsta.

Metallide mehaanilise tugevuse vähenemine on peamiselt seotud kristallvõre struktuuri muutustega - ümberkristalliseerumisega. See on eriti täheldatav madalama sulamistemperatuuriga metallide, nagu alumiinium puhul.



Jooni 6.1

Metalli tõmbetugevuse sõltuvus temperatuurist

Jn 6.1 kujutatud tõmbetugevuse vähenemine võib viia elektrit juhtivate konstruktsioonide lagunemiseni vibratsioonide ja elektrodünaamilise jõu löökide mõjul.

Ülalkirjeldatud kolmest mõjutegurist on kestval kuumenemisel kõige olulisem teine, s.t kontaktidele lubatud temperatuur ja seetõttu lubatakse ka voolujuhtivatele lattidele jaotlates suurimaks püsitemperatuuriks

$$\vartheta_{lub} = +70^{\circ}\text{C} \quad (6.1)$$

Isoleerimata lati temperatuuri arvutamiseks lähtume soojustasakaalu võrrandist

$$I^2 r_a dt = cG d\vartheta + (Q_{ko} + Q_{ki}) dt, \quad (6.2)$$

kus I - latti läbiva siinuselise vahelduvvoolu efektiivväärtus, A,

r_a - 1 m pikkuse lati aktiivtakistus, Ω/m ,

c - lati materjali erisoojus, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$,

G - 1 m pikkuse lati mass, kg/m ,

Q_{ko} - konvektiivne soojusülekanne 1 m pikkuselt latilt, W/m ,

Q_{ki} - kiirgussoojusülekanne 1 m pikkuselt latilt, W/m .

Eeldame, et latt on muutumatu ristlõikepindalaga ja homogensest materjalist. Püsitalitluse arvutamisel lähtume sellest, et võrrandi parema poole esimene liidetav on kestval muutumatul voolul null ($d\vartheta = 0$, s.t temperatuur on muutumatu). Nendel tingimustel võrrand (6.2) lihtsustub kujule

$$I^2 r_a = Q_{ko} + Q_{ki}. \quad (6.3)$$

Võrrandis (6.3) on r_a lati takistus vahelduvvoolule. See takistus on sama lati alalisvoolutakistusest suurem pinnaefekti ja lähedusefekti tõttu. Esimene neist on seotud voolu koondumisega vahelduvvoolul juhi pinna lähedusse ja teine voolu koondumisega

kahe rööbitise juhi lähimatesse või kaugeimatesse kihtidesse sõltuvalt sellest, kas voolud neis juhtides on samasuunalised või vastasuunalised. Teine efekt on kõrgepingeseadmetes väheoluline, kuna isolatsiooninõuetest lähtuvalt on juhtide vahekaugus piisavalt suur.

Vahelduvvoolu korral sõltub voolu koondumine juhi pinnakihtidesse elektromagnetlainete metalli tungimise sügavusest Z . Sügavusel Z on laine nõrgenenud e korda.

$$Z = \sqrt{\frac{2}{\omega\gamma\mu}}, \quad (6.4)$$

kus ω - vahelduvvoolu ringsagedus, 1/s,

γ - lati materjali elektrierijuhtivus, S/m,

μ - lati materjali absoluutne magnetiline läbitavus, H/m.

Pinnaefekti mõju juhi takistusele arvestatakse pinnaefektiteguri k_p abil:

$$r_a = k_p r. \quad (6.5)$$

Pinnaefektiteguri määramisel võetakse valemi (6.4) põhjal argumendiks $\sqrt{f/r}$, kus f on sagedus Hz ja r on 1000 m pikkuse lati alalisvoolutakistus Ω :

$$r = \frac{\rho l}{S}, \quad (6.6)$$

kus ρ – lati materjali eritakistus, Ωm

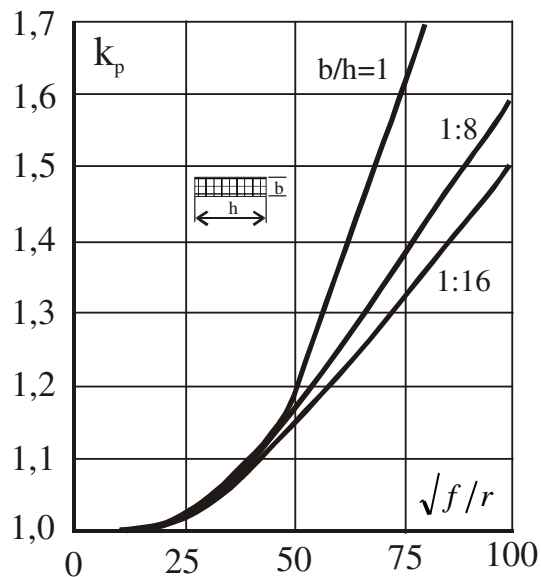
$l = 1000$ m – lati pikkus,

S – lati ristlõikepindala, m^2 .

Kuna pinnaefekti tõttu on voolujuhi pinnakihtides voolutihedus suurem, on eelistatud lapikud täismetallist latid või õõneslatid.

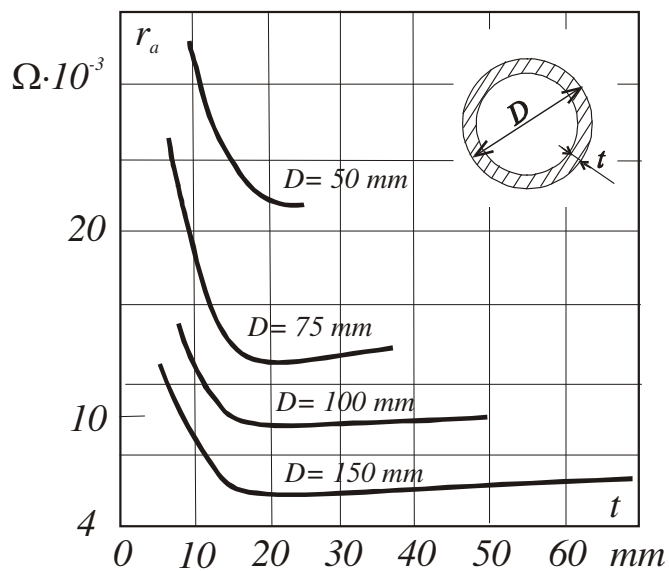
Joonisel 6.2 on toodud ristkülikukujulise ristlõikepinnaga täismetallist lati pinnaefektiteguri sõltuvus argumendist $\sqrt{f/r}$ lati erinevate küljepikkuste suhte korral. Jooniselt on näha, et suurim pinnaefektitegur ja seega ka aktiivtakistus on ruudukujulise ristlõikepinnaga latil.

Õõneslattidel tuleb arvestada sellega, et lati igale välisläbimõõdule vastab optimaalne seinapaksus (vt jn 6.3).



Joonis 6.2

Ristkülikukujulisele lati pinnaefektiteguri sõltuvus argumendist $\sqrt{f/r}$ lati külgede erinevate suhete korral.



Joonis 6.3

Õõneslati seinapaksuse mõju lati aktiivtakistusele.

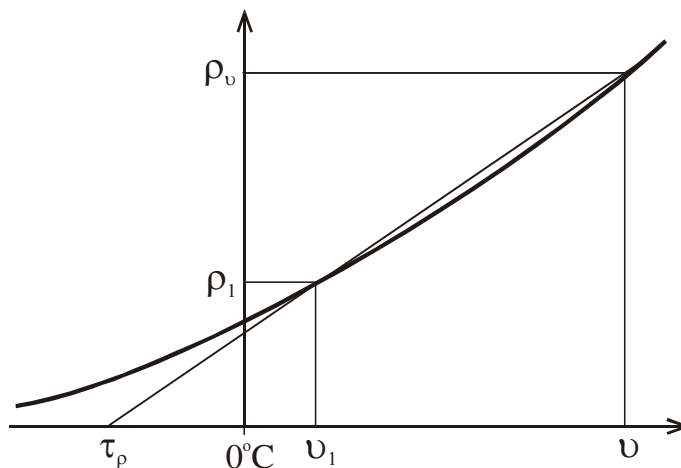
Alumiiniumlatt, pikkus 1000 m, sagedus 50 Hz.

Võrrandi (6.3) lahendamisel on lisaks pinnaefektile vaja arvestada ka lati alalisvoolutakistuse sõltuvust temperatuurist. Selleks võib tegeliku eksponentsiaalse sõltuvuse piisava täpsusega asendada lineaarsega (vt jn 6.4).

Kui temperatuuril ϑ_1 on teada juhimaterjali eritakistus ρ_1 , siis avaldub takistuse sõltuvus temperatuurist

$$r_{\vartheta} = r_1 \frac{\tau_{\rho} + \vartheta}{\tau_{\rho} + \vartheta_1} = \frac{\rho_1 l}{S} \frac{\tau_{\rho} + \vartheta}{\tau_{\rho} + \vartheta_1} \quad (6.7)$$

Avaldises (6.7) on Celsiuse nullkraadist vasakule jääva argumendilõigu väärtused vasele $\tau_{\rho} = 234 \dots 242^{\circ}\text{C}$ ja alumiiniumile $\tau_{\rho} = 236^{\circ}\text{C}$.



Joonis 6.4

Elektrijuhi takistuse sõltuvus temperatuurist lihtsustatult.

Avaldises (6.3) esitatud Q_{ko} arvutatakse lähtuvalt konvektiivse soojusülekanne seaduspärasustest.

Vertikaalse pinna konvektiivse soojusülekanne saab arvutada, teades keha ülemtemperatuuri õhu suhtes Θ $^{\circ}\text{C}$ ja jahutatava pinna suurust m^2

$$Q_{ko} = 1,81 a S \Theta^{1,25} \quad (6.8)$$

Tegur a avaldises (6.8) sõltub jahutatava pinna mõõtmetest. Kui pinna kõrgus on 30 cm, on $a = 1$. Ainult 5 cm kõrguse pinna puhul on teguri väärtuseks 2,7.

Kiirgussoojusülekanne Q_{ki} leitakse kahe võrdse suurusega pinna vahel Stefan-Boltzmann'i seaduse alusel.

$$Q_{ki} = 5,6697 \cdot 10^{-8} \varepsilon S (T_1^4 - T_2^4), \quad (6.9)$$

kus T_1 - keha pinnatemperatuur, K

T_2 - ümbruse temperatuur, K,

ε - pinna mustsus.

Temperatuuril alla 200 °C on pinna mustsuse ε tüüpilised väärtused:

Oksüdeeritud Al	0,5
Haljas Al	0,04
Oksüdeeritud Cu	0,6
Haljas Cu	0,05
Värvid	0,8 – 0,95
Pliimennik	0,9

Lati lubatud voolutugevuse leidmiseks tuleb selle alalisvoolutakistus ja soojusülekanne leida lati temperatuuril +70 °C ja ümbruse temperatuuril +25 °C.

$$I_{lub} = \sqrt{\frac{Q_{ko} + Q_{ki}}{r_a}} \quad (6.10)$$

Siseruumidesse paigaldatud lattide korral kasutatakse ka lati lubatud temperatuuri +65 °C ja ümbruse temperatuuri +35 °C.

Tabelis 6.1 on näitena toodud lubatud voolutugevused vaskõõneslatile võrgusagedusega vahelduvvoolul, kui latt asub kas siseruumis või väljas ja kas latt on värvitud või värvimata (oksiidikihiga kaetud).

Tabel 6.1 Vasklati lubatud voolutugevused

Copper conductors of annular cross-section, ambient temperature 35 °C, conductor temperature 65 °C, with alternating current, phase centre-line distance $\cong 2.5 \times$ outside diameter

D mm	Wall- thick- ness a mm	Cross- section mm ²	Weight ¹⁾ kg/m	Material ²⁾	Continuous in A DC and AC up to 60 Hz			
					indoor painted	bare	outdoor painted	bare
20	2	113	1.01	E-Cu F 37	384	329	460	449
	3	160	1.43	E-Cu F 37	457	392	548	535
	4	201	1.79	E-Cu F 30	512	438	613	599
	5	236	2.10	E-Cu F 30	554	475	664	648
	6	264	2.35	E-Cu F 25	591	506	708	691
32	2	188	1.68	E-Cu F 37	602	508	679	660
	3	273	2.44	E-Cu F 37	725	611	818	794
	4	352	3.14	E-Cu F 30	821	693	927	900
	5	424	3.78	E-Cu F 30	900	760	1 020	987
	6	490	4.37	E-Cu F 25	973	821	1 100	1 070
40	2	239	2.13	E-Cu F 37	744	624	816	790
	3	349	3.11	E-Cu F 37	899	753	986	955
	4	452	4.04	E-Cu F 30	1 020	857	1 120	1 090
	5	550	4.90	E-Cu F 30	1 130	944	1 240	1 200
	6	641	5.72	E-Cu F 25	1 220	1 020	1 340	1 300
50	3	443	3.95	E-Cu F 37	1 120	928	1 190	1 150
	4	578	5.16	E-Cu F 30	1 270	1 060	1 360	1 310
	5	707	6.31	E-Cu F 30	1 410	1 170	1 500	1 450
	6	829	7.40	E-Cu F 25	1 530	1 270	1 630	1 570
	8	1 060	9.42	E-Cu F 25	1 700	1 420	1 820	1 750
63	3	565	5.04	E-Cu F 30	1 390	1 150	1 440	1 390
	4	741	6.61	E-Cu F 30	1 590	1 320	1 650	1 590
	5	911	8.13	E-Cu F 30	1 760	1 460	1 820	1 750
	6	1 070	9.58	E-Cu F 25	1 920	1 590	1 990	1 910
	8	1 380	12.3	E-Cu F 25	2 150	1 780	2 230	2 140
80	3	726	6.47	E-Cu F 30	1 750	1 440	1 760	1 690
	4	955	8.52	E-Cu F 30	2 010	1 650	2 020	1 930
	5	1 180	10.5	E-Cu F 30	2 230	1 820	2 230	2 140
	6	1 400	12.4	E-Cu F 25	2 430	1 990	2 440	2 340
	8	1 810	16.1	E-Cu F 25	2 730	2 240	2 740	2 630
100	3	914	8.15	E-Cu F 30	2 170	1 770	2 120	2 020
	4	1 210	10.8	E-Cu F 30	2 490	2 030	2 430	2 320
	5	1 490	13.3	E-Cu F 30	2 760	2 250	2 700	2 580
	6	1 770	15.8	E-Cu F 25	3 020	2 460	2 950	2 820
	8	2 310	20.6	E-Cu F 25	3 410	2 780	3 330	3 180

¹⁾ Calculated for a density of 8.9 kg/dm³. Preferred outside diameters in heavy type.

²⁾ Material: E-Cu or other material to DIN 40500 Part 2; preferably semi-finished material to be used tube to DIN 1754.

6.1.2. Voolujuhi valik kestva voolu järgi

Voolujuhi valikul tuleb lähtuda suurimast kestevoolust, mis võib voolujuhti läbida. Kestevooluks loetakse voolusid, mis läbivad latti kauem kui 10...15 minutit, sest selle ajaga jõuab latti kuumeneda püsitemperatuurini.

Arvutusliku voolutugevuse leidmisel peab hindama elektrivõrgus esineda võivaid erakorralisi olukordi, nt ühe trafo väljalülitumist ja koormuse ülekandmist teistele alajaama trafodel, ülekandeliinide avariilistel väljalülitumistel talitlusse jäänud liinide koormuse kasvu jms. Nendest hinnangutest peab selguma nn forsseeritud talitus, mis on aluseks lati edasisele valikule.

Kuna lattidele antakse nende kestevoolu taluvusvõime standardsetel lati ja ümbruse nimitemperatuuridel, peab hindama tegelikus käidus esineda võivaid kõrvalekaldeid neist nimitemperatuuridest. Näiteks võib mõnes piirkonnas välistemperatuur oluliselt erineda nimitemperatuurist $\vartheta_{0N} = +25^\circ\text{C}$ või $\vartheta_{0N} = +35^\circ\text{C}$. Kuna lati lubatud temperatuuri kehtvalt ületada ei tohi, siis tuleb sisse viia parandus valitud lati lubatud voolutugevusse.

Paranduse tegemisel lähtutakse asjaolust, et lati ületemperatuur on ligikaudu võrdeline seda läbiva vooluga teises astmes. Seega $\Theta \equiv I^2$ ja $\Theta_{lub} \equiv I_{lub}^2$, millest järgneb parandusega voolutugevuse I_{par} avaldis

$$I_{par} = I_{lub} \sqrt{\frac{\Theta}{\Theta_{lub}}} = I_{lub} \sqrt{\frac{\vartheta_{lub} - \vartheta_0}{\vartheta_{lub} - \vartheta_{0N}}} \quad (6.11)$$

6.2. Voolujuht lühisel

6.2.1. Voolujuhi temperatuuri tõus lühisel

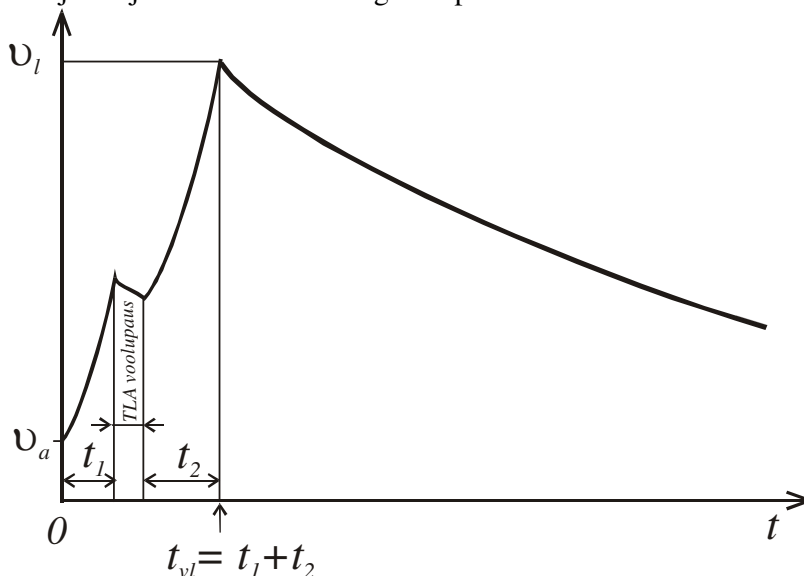
Lühisvool ületab normaaltalitusvoolu tunduvalt, kuid on lühiajaline. Vastavalt on palju suurem ka kaovõimsus latis. Juhi temperatuuri tõus toimub aja alla 1 s jooksul (releekaitse rakendumise ja lüliti toimimise aeg) ja soojusülekannet ümbrusesse selle jooksul praktiliselt ei toimu.

Elektrivõrkudes kasutatakse tavaliselt rikkega võrguelementide (peamiselt elektriliinide) automaatset taaslülitust (TLA), kuna see aitab oluliselt parandada elektrivarustuse töökindlust. Automaatse taaslülituse korral on lühistunud ahela esimesele väljalülitusele järgnev voolupaus tavaliselt lühem kui 1 sekund. Voolupausi jooksul eriti suurt soojusülekannet väliskeskkonda toimuda ei jõua ja lati temperatuur märgatavalt ei vähene. Voolupausile järgneval lülitamisel lühisele (TLA oli ebaedukas) toimub lati edasine kuumenemine ja seetõttu võib lühise kestuseks lugeda kahe teineteisele järgneva lühise kogukestust t_{vl} (vt jn 6.4).

Et voolujuhi kuumenemist võib vaadelda adiabaatilisena ja avaldisest (6.2) võib ära jätta parema poole teise liidetava, siis võtab avaldis kuju

$$i^2 r_g dt = cGd\vartheta \quad (6.12)$$

Lati adiabaatiline kuumenemine võiks toimuda praktiliselt lineaarselt selle temperatuurilt enne lühist (algtemperatuurilt) ϑ_a kuni lõpptemperatuurini ϑ_l , kuid arvestada tuleb juhi elektritakistuse ja soojusmahtuvuse kasvuga temperatuuri tõustes.



Joonis 6.4

Juhi temperatuuri sõltuvus ajast lühisel

Tehes temperatuuritõusuga kaasnevad takistuse ja soojusmahtuvuse suurenemist arvestavad asendused, saame võrrandi (6.12) ümber kirjutada kujul

$$\frac{1}{S} i^2 \rho_1 \frac{\tau_\rho + \vartheta}{\tau_\rho + \vartheta_1} dt = c_1 \gamma S l \frac{\tau_c + \vartheta}{\tau_c + \vartheta_1} d\vartheta, \quad (6.13)$$

kus S – lati ristlõikepindala,

c_1 – lati materjali erisoojus,

τ_c – lati materjali erisoojuse muutumist arvestav konstant (eritakistuse muutumist arvestava konstandi analoog).

Diferentsiaalvõrrandi integreerime rajades lühise algthetkest $t = 0$ ahela väljalülitamiseni hetkel t_{vl} ja lühise algtemperatuurist lühisel ϑ_a kuni selle lõpptemperatuurini ϑ_l

$$\frac{1}{S^2} \int_0^{t_{vl}} i^2 dt = \frac{c_1 \gamma}{\rho_1} \frac{\tau_\rho + \vartheta_1}{\tau_c + \vartheta_1} \int_{\vartheta_a}^{\vartheta_l} \frac{\tau_c + \vartheta}{\tau_\rho + \vartheta} d\vartheta. \quad (6.14)$$

Võrrandis (6.14) teeme asenduse

$$B_k = \int_0^{t_{vl}} i^2 dt. \quad (6.15)$$

Suurust B_k nimetatakse lühisvoolu Joule'i integraaliks ja selle mõõtühik on A^2s .

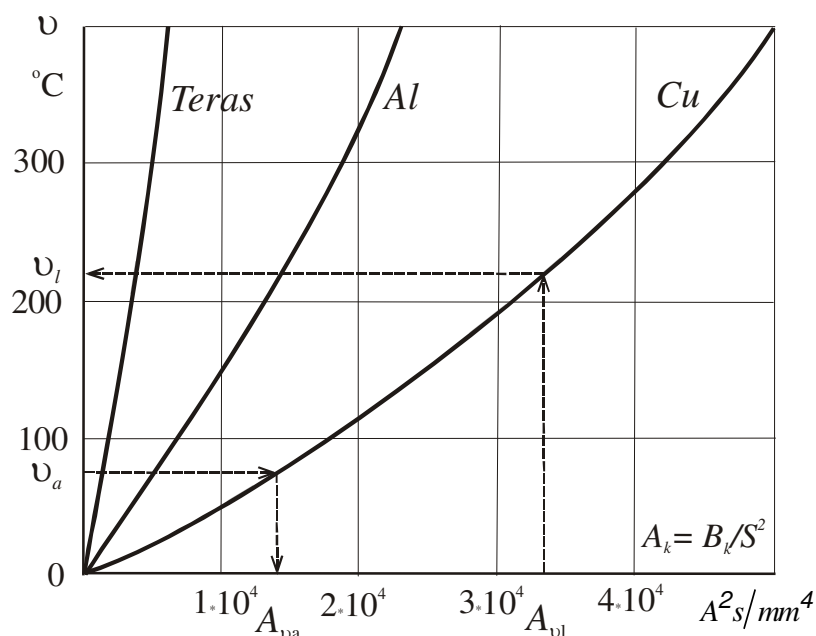
Võrrandi lahendiks on

$$\frac{B_k}{S^2} = \frac{c_l \gamma}{\rho_l} \frac{\tau_\rho + \vartheta_l}{\tau_c + \vartheta_l} \left[(\vartheta_l - \vartheta_a) + (\tau_c - \tau_\rho) \ln \frac{\tau_\rho + \vartheta_l}{\tau_\rho + \vartheta_a} \right]. \quad (6.16)$$

Kahjuks on lati otsitav lõpptemperatuur lühisel ϑ_l lahendis ilmutamata kujul ja selle leidmiseks on otstarbekas kasutada nomogrammi. Selleks tähistame võrrandis (6.16)

$$A_k = \frac{B_k}{S^2}. \quad (6.17)$$

Kui eeldada lati algtemperatuuriks lühisel $\vartheta_a = 0^\circ\text{C}$, siis on kolmele erinevale elektriseadmetes kasutatavale juhtivmaterjalile võrrandi (6.16) alusel koostatud nomogramm esitatud joonisel 6.5.



Joonis 6.5

Lühise lõpptemperatuuri leidmise nomogrammid kolmele juhtivmaterjalile.

Kui lati tegelik algtemperatuur on suurem kui 0°C , siis saab nomogrammi kasutada tegelikule algtemperatuurile vastava fiktiivse Joule'i integraali A_{k1} leidmiseks, mis oleks lati temperatuuri sellele temperatuurile tõstnud.

Liites fiktiivse Joule'i integraali tegelikuga, saame lõpptemperatuurile vastava Joule'i integraali väärtuse:

$$A_{k2} = A_{k1} + \frac{B_k}{S^2}. \quad (6.18)$$

Leitud lõpptemperatuuri võrreldakse lati materjalile lubatava temperatuuriga lühisel, mis on kestval kuumenemisel lubatavast temperatuurist oluliselt kõrgem. Näiteks lubatakse vasklatile lõpptemperatuuri $\vartheta_{lub} = 300\text{ °C}$ ja alumiiniumlatile 200 °C .

Kui on täidetud tingimus $\vartheta_l \leq \vartheta_{lub}$, on latt lühist termiliselt taluv.

Elektriseadmete projekteerimisel ja talitluse hindamisel on sageli vaja eelneva alusel leida ka "pööratud" lahendeid.

Näiteks võib osutada vajalikuks leida suurim Joule'i integraal, millele latt on veel taluv

$$B_{k\max} = (A_{k\max} - A_{k1})S^2, \quad (6.19)$$

kus $A_{k\max}$ on lati materjalile lubatav suurim Joule'i integraali väärtus.

Teise sageli kasutatava arvutuse kohaselt leitakse minimaalne lati ristlõikepindala, mis tagab antud Joule'i integraali korral lati termilise taluvuse:

$$S_{\min} = \sqrt{\frac{B_k}{A_{k\max} - A_{k1}}}. \quad (6.20)$$

Kui lähtutakse lati algtemperatuurist, milleks on kestva kuumenemise lõpptemperatuur, siis on võimalik erinevatele juhtivmaterjalidele anda ette väärtused

$$C = \sqrt{A_{k\max} - A_{k1}} \quad (6.21)$$

ja võrrand (6.20) saab lihtsa kuju

$$S_{\min} = \frac{\sqrt{B_k}}{C}. \quad (6.22)$$

6.2.2. Lühisvoolu Joule'i integraal

6.2.2.1. Joule'i integraali definitsioon

Valemi (6.15) alusel määratletakse lühisvoolu Joule'i integraal lühisel kogukestusega t_{vl}

$$B_k = \int_0^{t_{vl}} i^2 dt.$$

Avaldise võrdlemine Joule'i seadusega näitab, et lühisvoolu Joule'i integraal on lühise kestusel t_{vl} takistuses $1\ \Omega$ eralduv soojushulk.

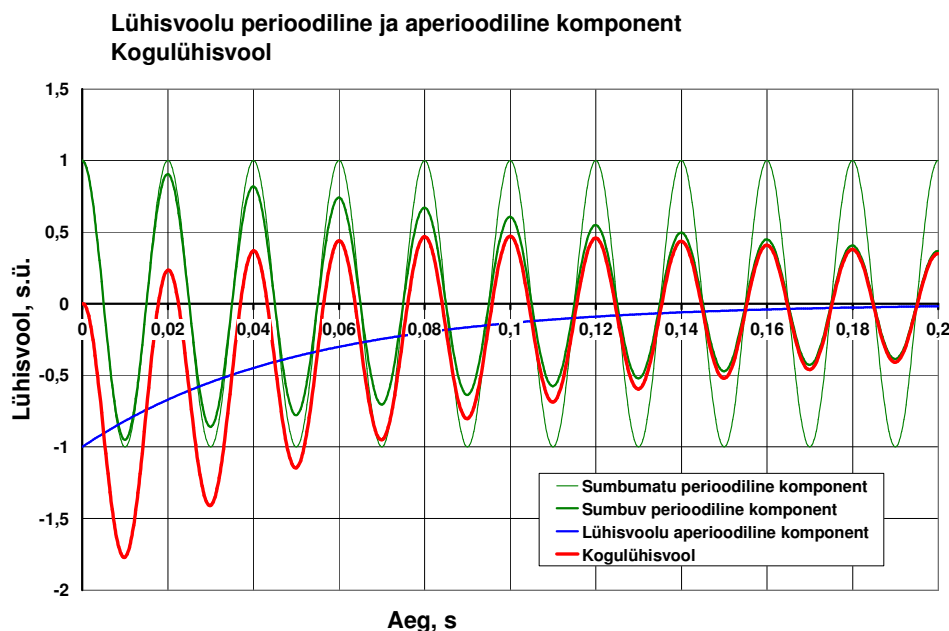
Lühisvool koosneb perioodilisest i_p ja aperioidilisest i_a komponendist ning me võime kirjutada

$$B_k = \int_0^t i^2 dt = \int_0^t (i_p + i_a)^2 dt = \int_0^t (i_p^2 + i_a^2 + 2i_p i_a) dt. \quad (6.23)$$

Märkus. Valemis on lihtsuse eesmärgil aja t_{vl} asemel kirjutatud t .

Aperioodiline lühisvool on ajakonstandiga T_a ajas sumbuv alalisvool. Perioodiline lühisvool on võrgusageduslik vool, mis olenevalt lühise paiknemisest elektrivõrgus võib olla teatud piirides sumbuv või mittesumbuv. Oma mõju on ka automaatsetel ergutusregulaatoritel (vt Ü. Treufeldt. Lühised elektrisüsteemides. TTÜ. Tallinn. 2002).

Joonisel 6.6 on kujutatud kogulühisvoolu ja selle komponentide muutumine ajas. Perioodiline komponent on joonisel esitatud nii ajas muutumatu kui ka ajas sumbuva amplituudväärtusega. Joule'i integraali arvutamisel automaatse ergutusregulaatori mõjuga tavaliselt ei arvestata ja lähtutakse generaatorite perioodilise ülimööduva ja mööduva voolukomponendi keskmisest ajalisest sumbuvusest ajakonstandiga T . Joonisel 6.6 esitatud kõveratel on aperioodilise voolu ajakonstandiks võetud $T_a = 0,05$ s ja perioodilise voolukomponendi sumbuvuse ajakonstandiks $T = 0,3$ s.

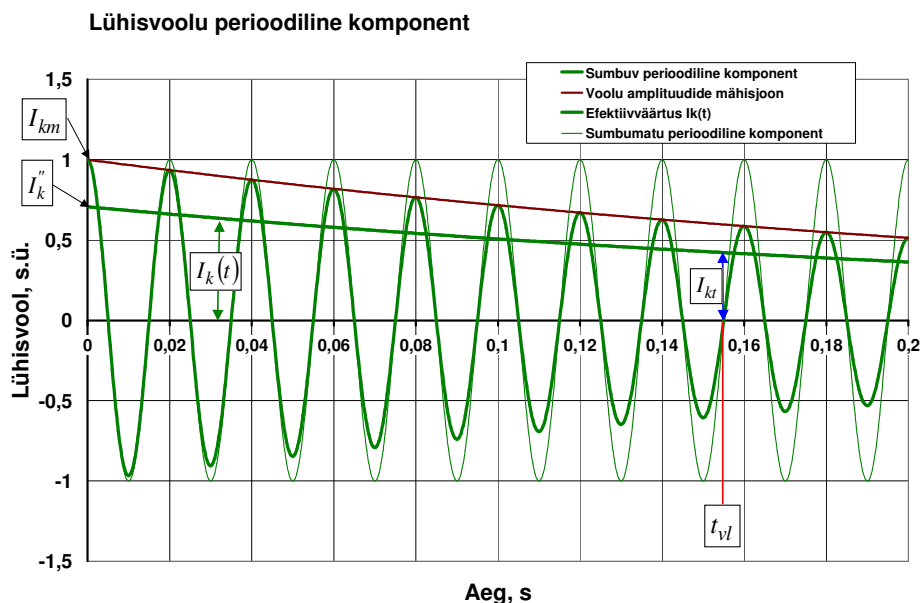


Joonis 6.6
Lühisvoolu komponendid

Lühisvoolu perioodilist komponenti esitatakse tavaliselt selle efektiivväärtuse kaudu. Efektiivväärtus $I_k(t)$ leitakse lihtsustatult nii, et võetakse perioodilise voolu amplituudide mähisjoon, mis jagatakse siinuskõvera kujuteguriga $\sqrt{2}$ (vt jn 6.7). Selliselt leitud lühisvoolu perioodilise komponendi efektiivväärtus lühise alghetkel on ülimööduv lühisvool I_k'' ja amplituudväärtus on $I_{km} = \sqrt{2}I_k''$. Kui lühis kestab elektrikaare kustumise hetkeni t_{vl} sekundit, siis lühisvoolu perioodilise komponendi efektiivväärtus on sel hetkel I_{kt} .

Eeltoodut arvestades võib lühisvoolu komponentide avaldised kirjutada kujul

$$\begin{aligned} i_p &= I_{km} e^{-t/T} \cos \omega t \\ i_a &= I_{km} e^{-t/T_a} \end{aligned} \quad (6.24)$$



Joonis 6.7

Lühisvoolu perioodiline komponent ja selle määratlused

Avaldis (6.23) võtab kuju

$$B_k = \int_0^t \left[I_{km} \cdot e^{-t/T} \cdot \cos \omega t \right]^2 dt + \int_0^t \left[I_{km} \cdot e^{-t/T_a} \right]^2 dt + 2I_{km}^2 \int_0^t \cos \omega t \cdot e^{-t/T} \cdot e^{-t/T_a} dt \quad (6.25)$$

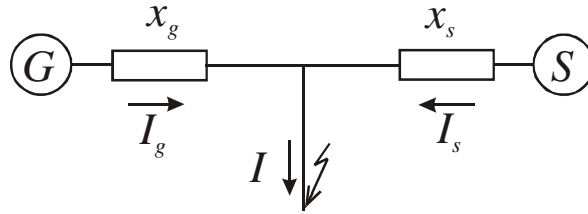
Valemis (6.25) on parema poole viimane liidetav kõrgemat järku lõpmata väike suurus ja läheneb kiiresti nullile ning seega võime kirjutada

$$B_k \approx \int_0^t i_p^2 dt + \int_0^t i_a^2 dt = B_{kp} + B_{ka} . \quad (6.26)$$

Avaldisest (6.26) nähtub, et Joule'i integraali arvutamiseks võib teineteisest lahus arutada lühisvoolu perioodilise ja aperioidilise komponendi Joule'i integraali.

Keeruka kujuga elektrisüsteemis on Joule'i integraali täpne arvutamine väga keerukas, kuna lühisekoha suhtes asuvad erinevate elektrijaamade generaatorid erinevatel (elektrilistel) kaugustel. Kaugusest sõltub generaatorite lühise perioodilise voolukomponendi reaktsioon voolu äkkmootustele. Elektriliselt kaugete lühiste korral on perioodilise komponendi efektiivväärtuse muutumine vähemärgatav, samas aga elektrijaamade lähedal on sõltuvus suur. Sellises olukorras on sobiv teisendada tegelik elektrisüsteem ekvivalentseks kaheharuliseks, milles ühte harusse on koondatud elektriliselt lähedal asuvad suured elektrijaamad ja teise lühisest elektriliselt kauged elektrijaamad. Esimeste reaktsioon lühisvoolu suurenemisele on tugev, teisi võime vaadelda nn süsteemiharuna, mille perioodilise voolukomponendi efektiivväärtust võib vaadelda konstandina.

Joonisel 6.8 on kujutatud eelöeldule vastav elektrisüsteemi kaheharuline aseseem.



Joonis 6.8

Elektrisüsteemi ekvivalentne kaheharuline aseseem

Selles aseseemis on süsteemiharu perioodilise voolukomponendi efektiivväärtus ajas muutumatu ($I_{ks}'' = I_{ks} = const$) ja generaatoriharu vastav voolukomponent ajas muutuv ($I_{kg}(t) = var$) algväärtusega lühise tekkimise hetkel I_{kg}'' .

6.2.2.2. Lühisvoolu perioodilise komponendi Joule'i integraal

Lühisvoolu perioodilise komponendi ja selle Joule'i integraali avaldamine analüütilisel kujul on keeruka konfiguratsiooniga elektrisüsteemis praktiliselt võimatu. Seevastu võib valemi (6.ss) alusel lühisvoolu perioodilise komponendi Joule'i integraali leida, asendades voolu analüütilise kuju voolu efektiivväärtusega, sest $I_k(t)$ leidmiseks on olemas lihtsustatud arvutusmeetodid. Seega

$$B_{kp} = \int_0^t i_p^2 dt \approx \int_0^t I_k^2(t) dt \quad (6.27)$$

Toetudes aseseemile jn. 6.8 saab avaldada

$$B_{kp} = \int_0^t [I_{kg}(t) + I_{ks}]^2 dt = \int_0^t I_{kg}^2(t) dt + I_{ks}^2 t + 2I_{ks} \int_0^t I_{kg}(t) dt \quad (6.28)$$

Nagu eespool mainiti, on avaldise (6.28) analüütiline lahendamine keerukas ja selle asemel kasutatakse järgmist lihtsustatud meetodit.

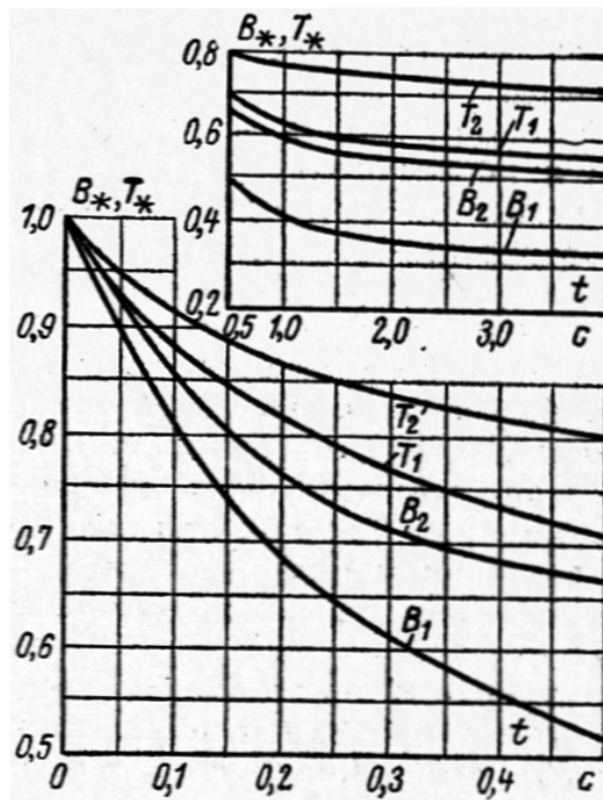
Valemis (6.28) tehakse asendused

$$B_* = \frac{\int_0^t I_{kg}^2(t) dt}{I_{kg}''^2 t} \quad \text{ja} \quad Q_* = \frac{\int_0^t I_{kg}(t) dt}{I_{kg}'' t} \quad (6.29)$$

Asenduse tulemusena saadakse algebraline avaldis

$$B_{kp} = \left(I_{kg}''^2 B_* + 2I_{kg}'' I_{ks} Q_* + I_{ks}^2 \right) t \quad (6.30)$$

B_* ja Q_* väärtused on tüüpsetele turbo- ja hüdrogeneraatoritele eelnevalt välja arvatud ja tehasekatsetustega kontrollitud, mille tulemusena on teatmematerjalina esitatud graafikud $B_* = f(t)$ ja $Q_* = g(t)$. Vastavad graafikud on toodud joonisel 6.9.



Indeks 1 – turbogeneraatorid
2 - hüdrogeneraatorid

Joonis 6.9

Nomogrammide abisuuruste B_* ja Q_* leidmiseks

Juhul, kui on tegemist elektriliselt kauge lühisega, s.t lühisvoolu perioodilise komponendi amplituud ajas ei muutu, on $B_* = Q_* = 1$ ja avaldis (6.30) lihtsustub kujule

$$B_{kp} = I_{ks}^2 t. \quad (6.31)$$

6.2.2.3. Lühisvoolu aperioidilise komponendi Joule'i integraal

Lühisvoolu aperioidilised voolukomponendid aseskeemi harudes avalduvad

$$i_{ag} = I_{kmg} e^{-t/T_{ag}} = \sqrt{2} I_{kg}'' e^{-t/T_{ag}} \quad (6.32)$$

ja

$$i_{as} = I_{kms} e^{-t/T_{as}} = \sqrt{2} I_{ks}'' e^{-t/T_{as}} \quad (6.33)$$

Seega

$$B_{ka} \approx \int_0^t i_a^2 dt = \int_0^t \left(\sqrt{2} I_{kg}'' e^{-t/T_{ag}} + \sqrt{2} I_{ks}'' e^{-t/T_{as}} \right)^2 dt \quad (6.34)$$

Sulgude ruutu võtmise ja mõningate teisenduste järel saadakse järgmine avaldis:

$$B_{ka} = I_{ks}''^2 T_{as} \left(1 - e^{-2t/T_{as}} \right) + I_{kg}''^2 T_{ag} \left(1 - e^{-2t/T_{ag}} \right) + 4 I_{ks}'' I_{kg}'' \frac{1}{\frac{1}{T_{as}} + \frac{1}{T_{ag}}} \left(1 - e^{-t \left(\frac{1}{T_{as}} + \frac{1}{T_{ag}} \right)} \right) \quad (6.35)$$

Enamikel juhtudel elektrisüsteemis $T_{as} = 0,04 \dots 0,2$ s, $T_{ag} = 0,09 \dots 0,45$ s ja lühise kestus t_{vl} on minimaalselt 0,1 s ning suurimad väärtused võivad ulatuda kuni 2 sekundini.

Sel juhul võrrand lihtsustub oluliselt:

$$B_{ka} = I_{ks}''^2 T_{as} + I_{kg}''^2 T_{ag} + I_{ks}'' I_{kg}'' \frac{4}{\frac{1}{T_{as}} + \frac{1}{T_{ag}}} \quad (6.36)$$

6.2.2.4. Lühisvoolu Joule'i integraali lihtsustatud arvutus

Elektrijaamades kauges elektrisüsteemi osades on lühisvoolu perioodilise komponendi efektiivväärtus praktiliselt muutumatu. Sellistel juhtudel võib joonisel 6.8 kujutatud kaheharulise aseskeemi asendada veelgi lihtsama üheharulise aseskeemiga, milles on ainult süsteemiharu.

Üheharulises aseskeemis saab avaldis (6.36) kuju

$$B_{ka} = I_{ks}''^2 T_{as} \quad (6.37)$$

Kuna lühisvoolu Joule'i integraali avaldub kujul

$$B_k = B_{kp} + B_{ka} ,$$

siis lihtsustatud arvutuse kohaselt on lühisvoolu Joule'i integraal

$$B_k = I_{ks}^2 (T_{as} + t). \quad (6.38)$$

6.2.2.5. Aparaatide termilise taluvuse kontroll

Aparaatide termilise taluvuse arvutused on keerukad, kuna kasutatakse erineva ristlõikepindalaga voolujuhte (rosettkontakti, nugakontaktid, ümar- ja lapikjuhid jms), erinevad võivad olla isegi voolujuhtide materjalid. Tavaliselt sisaldavad aparaadid ka liug- ja rullkontakte, ning poltliiteid. Temperatuuritõusu arvutamine muutub ebatäpseks ja seetõttu aparaate kontrollitakse termilisele taluvusele katseliselt.

Termilise taluvuse katsetusteks kasutatakse suure rootori massiga turbogeneraatori tüüpi elektrimasinaid, mille staatorimähised on arvutatud suurtele vooludele madalatel pingetel.

6.3. Lühisvoolu elektrodünaamiline toime

6.3.1. Elektrodünaamilised jõud voolujuhtivate osade vahel

Kui lähestikku asuvad kaks vooluga juhti, siis võivad nende vahel tekkida jõud, mis on võimelised elektrivõrgus esinevate lühiste korral purustama elektriseadmeid.

Ühes lõpmata väikese ristlõikega juhis 1 voolava voolu i poolt teise lõpmata väikese ristlõikega rööpjuhi 2 asukohas tekkiv magnetvälja induksioon B on teslades leitav

$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi a}, \quad (6.40)$$

kus a – juhtidevaheline kaugus, m,

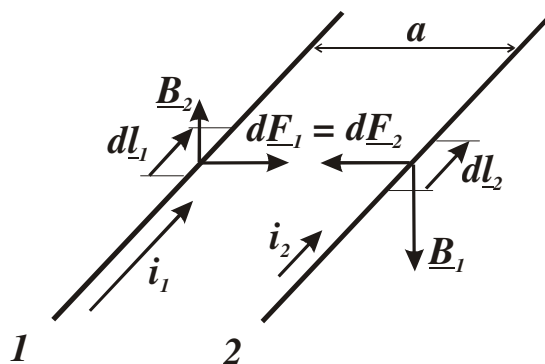
$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m.}$$

Erineva tugevusega voolude i_1 ja i_2 korral tekkivad erineva tugevusega induksioonid B_1 ja B_2 . Voolutugevuste ja induksioonide erinevus juhtides kompenseerub vastastikku nii, et elektrodünaamilised jõud mõlemas juhis on vastassuunalised, kuid moodulilt võrdsed väärtusega.

Jõud avalduvad

$$dF_{1,2} = i_2 B_{1,2} dl_2 \sin \Theta \quad (6.41)$$

Lõpmata pikkades ja lõpmatult väikse ristlõikega juhtides voolavate voolude ja magnetväljade vastasmõjul tekivad juhtides ühtlaselt jaotunud elektrodünaamilised jõud, mis on suunatud vastavalt vasaku käe reeglile ja moodulilt võrdsed:



Joonis 6.10

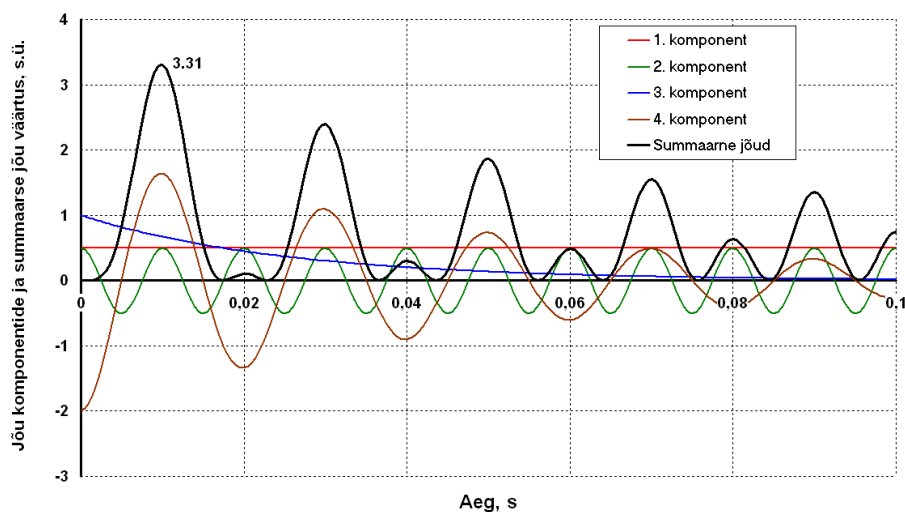
Elektrodünaamiliste jõudude kujunemine
kahe rööpse lõpmatult väikse ristlõikega
juhi vahel

$$f = \frac{df}{dl} = \frac{\mu_0 i_1 i_2}{2\pi a} = 2 \cdot 10^{-7} \frac{1}{a} i_1 i_2, \frac{N}{m} \quad (6.42)$$

Juhul, kui juhtide ristlõige on lõplik, s.t nullist erinev, tuleb arvestada sellega, et vastastikusesse mõjusse asuvad juhtide erinevates elementaarsetes ristlõigetes voolavad voolud.

6.3.2. Elektrodünaamilised jõud kolmefaasilises voolujuhtide süsteemis

Elektrodünaamilised jõud kolmefaasilises voolujuhtide süsteemis sõltuvad nende paigutusest (kolmnurkne, rõhtne vms), juhtide vahelisest kaugusest, lühise liigist, lühise alfaasist jms. Jäikades juhtides tekkivad jõud võivad tekitada mehaanilisi vigastusi/purunemisi. Paindjuhtmetes jõud vigastusi ei tekita, kuid juhtide nihkumine oma algasendist võib tekitada uusi lühiseid.



Joonis 6.11
Elektrodünaamilised jõud lattide vahel kahefaasilisel lühisel.

6.3.3. Lattide elektrodünaamilise taluvuse kontroll

6.3.4. Isolaatorite elektrodünaamilise taluvuse kontroll

7. Lühisvoolu piiramine

7.1. Lühisvoolu piiramine võtetega elektriskeemi koostamisel

7.2. Voolupiiravate reaktorite konstruktsioon ja kasutamine

7.3. Voolupiiravate reaktorite valik

8. Elektriseadmete maandamine

8.1. Maandustakistus

Pinnase eritakistus võrgusagedusel

(mõõtmistel sageli saadud väärtusvahemikud)

Pinnase liik	Eritakistus ρ_E Ωm
Soopinnas	5 ... 40
Liivsavi, savi, mustmuld	20 ... 200
Liiv	200 ... 2500
Kruus	2000 ... 3000
Murenenud kivim	Enamasti alla 1000
Liivakivi	2000 ... 3000
Graniit	kuni 50000
Moreen	kuni 30000

Niiskusesisalduse muutumine võib põhjustada pinnase eritakistuse ajalisi muutusi kuni mõne meetri sügavuseni. Lisaks sellele tuleb arvesse võtta, et pinnase eritakistus võib tunduvalt muutuda koos sügavuse suurenemisega, kuna tavaliselt koosneb pinnas selgesti eristatavatest eri omadustega pinnasekihtidest.

Võrkmaanduri valgumistakistus on ligikaudu

$$R_E = \frac{\rho_E}{2D},$$

milles D on sellise ringjoone läbimõõt, mille pindala võrdub võrkmaanduri pindalaga.

Riba- või ümarmaterjalist või kiudjuhtmest rõhtsate sirg- ja rõngasmaandurite valgumistakistus homogeenses pinnases on arvatav järgmiste valemitega:

sirgmaandur $R_{EB} = \frac{\rho_E}{\pi L} \ln \frac{2L}{d}$

rõngasmaandur $R_{ER} = \frac{\rho_E}{\pi^2 D} \ln \frac{2\pi D}{d}$

L sirgmaanduri pikkus m, $D = \frac{L}{\pi}$ rõngasmaanduri läbimõõt m, d ümarelektroodi või kiudjuhtme läbimõõt või ribaelektroodi pool laiust m (joonis kehtib $d = 0,015$ m puhul), ρ_E pinnase eritakistus Ωm

Homogeensesse pinnasesse süvistatud **püstmaanduri** valgumistakistus on arvatav valemiga

$$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{4L}{d}$$

L maandusvarda pikkus m, d maandusvarda läbimõõt m (joonis kehtib $d = 0,02$ m puhul), ρ_E pinnase eritakistus Ωm

8.2. Puute- ja sammupinge

8.3. Potentsiaaliühtlustus

8.4. Maandusseadme konstruktsioon ja arvutus

9. Jaotlate konstruktsioon

9.1. Elektriohutust ja talitluskindlust tagavad nõuded

Elektrialajaamade metallosad võivad olla pingestatud või pingeldis.

Pingestatud metallosadeks on elektrijuhid, mida kasutatakse normaaltalitluses elektrienergia edastamiseks. Pingestatud osadeks võivad olla ka mitmesugused juhtimis- ning mõõteahelad.

Pingeldis juhtivateks osadeks on elektriseadme puutevõimalikud juhtivad osad, mis normaalselt ei ole pingestatud, kuid võivad pingestuda isolatsioonirikke tagajärjel.

Paigaldised peavad olema ehitatud selliselt, et pingestatud osade juhuslik puudutamine või juhuslik ulatumine pingestatud osade läheduses asuvasse ohutsooni oleks välditud. Seda nimetatakse otsepuutekaitseks.

Kaitstud peavad olema nii pingestatud osad kui ka talitlusisolatsiooniga osad ja osad, mis võivad kanda ohtlikku potentsiaali. Talitlusisolatsiooni ei loeta elektriohutuse seisukohalt piisavaks.

Kaitse võib olla saavutatud mitmesugusel viisil:

- kaitse ümbrise abil,
- kaitse piirde abil,
- kaitse tõkke abil,
- kaitse pingestatud osade paigutamisega väljapoole puuteküündivust.

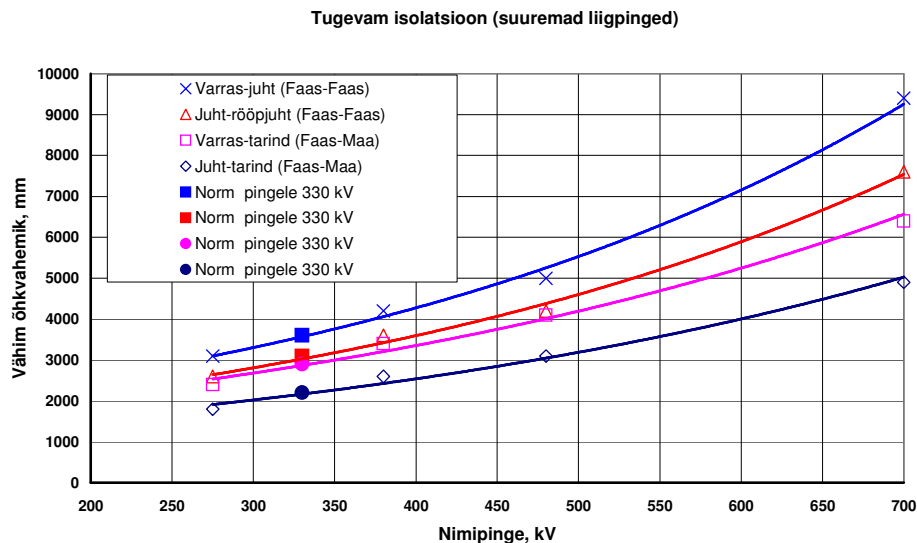
Loetletud kaitseviiside rakendamisel võetakse aluseks nõutavat isolatsiooni tagavad vähimad õhkvahekiud. Need õhkvahekiud leitakse mõjuvate liigpingete alusel CENELEC'i isolatsiooni koordinaatsiooni standardite EN 60071-1 ja EN 60071-2 põhjal (Eesti standardid on vastavalt EVS-EN 60071-1 ja EVS-EN 60071-2). Vähimad õhkvahekiud on toodud konspekti osas 2.2 "Alajaamade talitlustingimused".

Joonistel 9.1.1 ja 9.1.2 on kujutatud vähimate õhkvahekiude sõltuvusi võrgu nimipingest elektroodide erineva kuju korral ülikõrgepingelistes elektripaigaldistes. Sellesse pingete rühma kuuluvad Eestis 330 kV elektripaigaldised. Joonistel esitatud õhkvahekiud on esitatud ka järgnevas tabelis 9.1.1.

Tabel 9.1.1

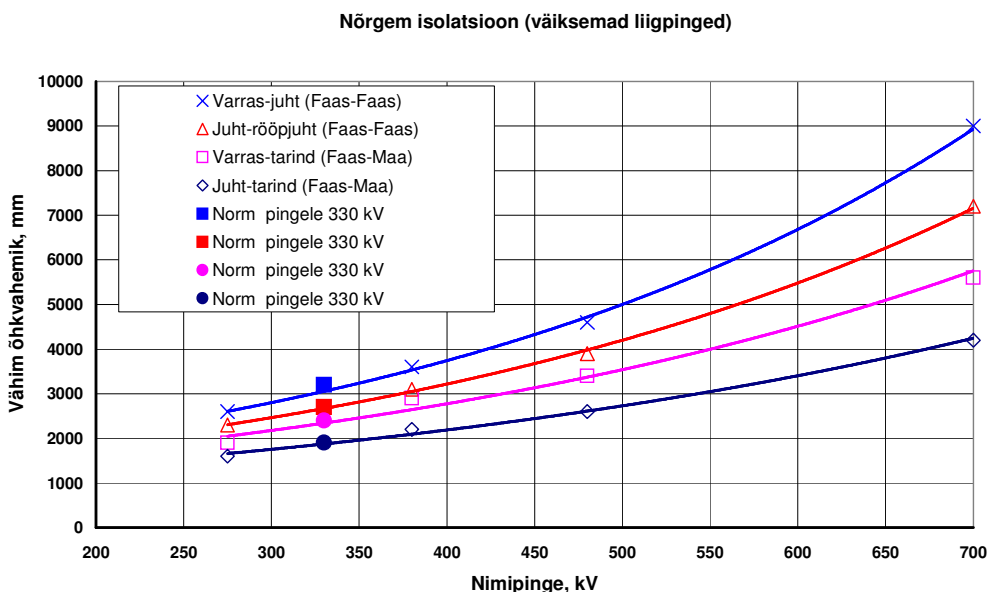
Vähimad õhkvahekiud EVS-HD 637 S1:2002 järgi

Nimipinge, kV	Juht- Tarind F-M 1	Varras- Tarind F-M 1	Juht- Rööpjuht F-F 1	Varras- Juht F-F 1	Juht- Tarind F-M 2	Varras- Tarind F-M 2	Juht- Rööpjuht F-F 2	Varras- Juht F-F 2
	275	1600	1900	2300	2600	1800	2400	2600
380	2200	2900	3100	3600	2600	3400	3600	4200
480	2600	3400	3900	4600	3100	4100	4200	5000
700	4200	5600	7200	9000	4900	6400	7600	9400
330	1900	2400	2700	3200	2200	2900	3100	3600
	F-M faas-maa			F-F faas-faas				
	1 - madalamad taluvuspinged			2 - kõrgemad taluvuspinged				



Joonis 9.1.1

Vähimad õhkvaheemikud C-pingepiirkonna võrkudes suuremate liigpingete esinemise korral (nt õhuliinidega võrkudes)



Joonis 9.1.2

Vähimad õhkvaheemikud C-pingepiirkonna võrkudes väiksemate liigpingete esinemise korral (nt kaabelliinidega võrkudes)

Nõuded isolatsiooni tugevusele sõltuvad elektrivõrgu tüübist (õhuliinidega või kaabelliinidega võrk) ja kasutatavast liigpingete piiramistasemest, s.t valitud liigpingepiirike või muude kaitsevahendite kaitsetasemest.

9.2. Ohutusvahemikud

Vähimad õhkvahemikud peavad ühelt poolt tagama elektriseadmete töökindluse, kuid teiselt poolt ka elektriohutuse. Nende vahemike alusel antakse vähimad lubatavad vahekaugused pingestatud osadeni. Neid vahekaugusi võib lugeda ohutusvahemikeks.

Kaitsepiiretena võib kasutada lausseinu, uksi, võre- või traatvõrkpiirdeid kõrgusega vähemalt 1800 mm, mis peavad tagama, et inimkeha mistahes osa ei saa küündida pingestatud osade läheduses asuvasse ohutsooni.

Kaitsetõketeks võivad olla nt katted, tõkkepuud, ketid ja köied ning alla 1800 mm kõrgusega seinad, ukсед, võre- ja traatvõrkpiirded, mis oma madaluse tõttu ei kuulu piirete hulka.

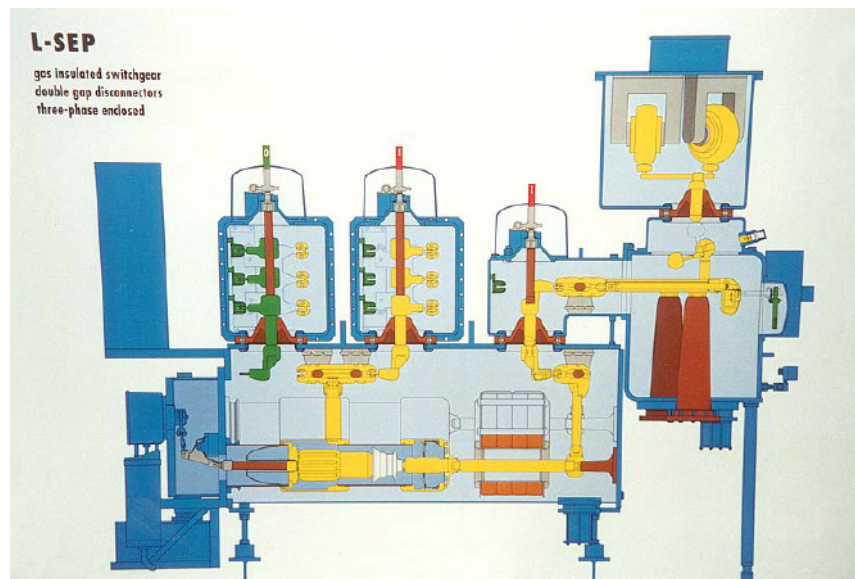
9.3. Lahtised ja kinnised jaotlad

9.4. Kohapeal koostatavad ja komplektjaotlad

Elegaasisolatsiooniga 110 kV komplektjaotla



110 kV komplektjaotla lõige



9.5. Lahtiste jaotlate konstruktiivsed iseärasused

9.6. Alajaamade piksekaitse

Kaitse välgu otselöökide eest

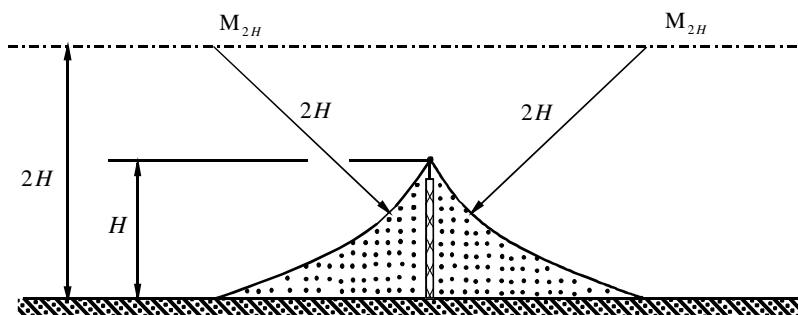
Modelleerimine, mõõtmised, vaatlused ja paljude aastate kogemused näitavad, et välgu otselööke seadmesse saab suure tõenäosusega vältida, kui kasutada alljärgnevat piksevarraste või -trosside paigutusviisi. Joonistel 9.6.1 kuni 9.6.4 kujutatud kaitsetsoonid kehtivad paigaldiste puhul, mille kõrgus H on kuni 25 m (kasutusel 420 kV elektrivõrgus). Kõrgemate paigaldiste korral on kaitsetsoonid suhteliselt väiksemad.

Alljärgnev on esitatud kui meetod, mis tagab piisava kaitsetaseme ilma isolatsiooni-koordinatsiooni lähema käsitlemiseta.

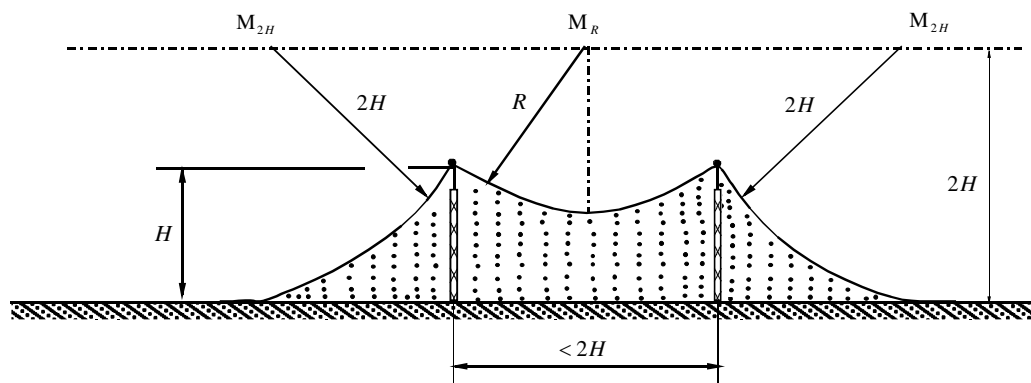
Üksik piksetross loob piki trossi telgikujulise kaitsetsooni, mille moodustajaks (ristlõike piirjooneks) on trossist algav kaar raadiusega $2H$ (vt joonis 9.6.1).

Kaks piksetrossi, mille omavaheline kaugus on väiksem kui $2H$, loovad kaitsetsooni, mille piiri piksetrosside vahel moodustab kõrguse $2H$ keskpunktist M_R läbi trosside (raadiusega R) tõmmatud kaar (vt joonis 9.6.2).

Kaitsetsoon on trosside kogu ulatuses pidev.



Joonis 9.6.1 – Üksiku piksetrossi kaitsetsoon



Joonis 9.6.2 – Kahe piksetrossi kaitsetsoon

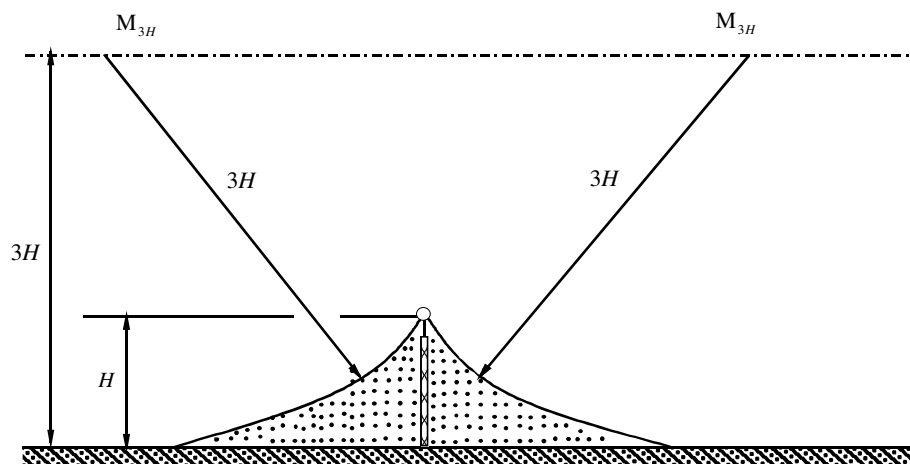
Piksevardad

Ülespoole suunatud välgukanalis (striimeris) arenevad lahendused piksevarraste korral varem kui piksetrosside puhul.

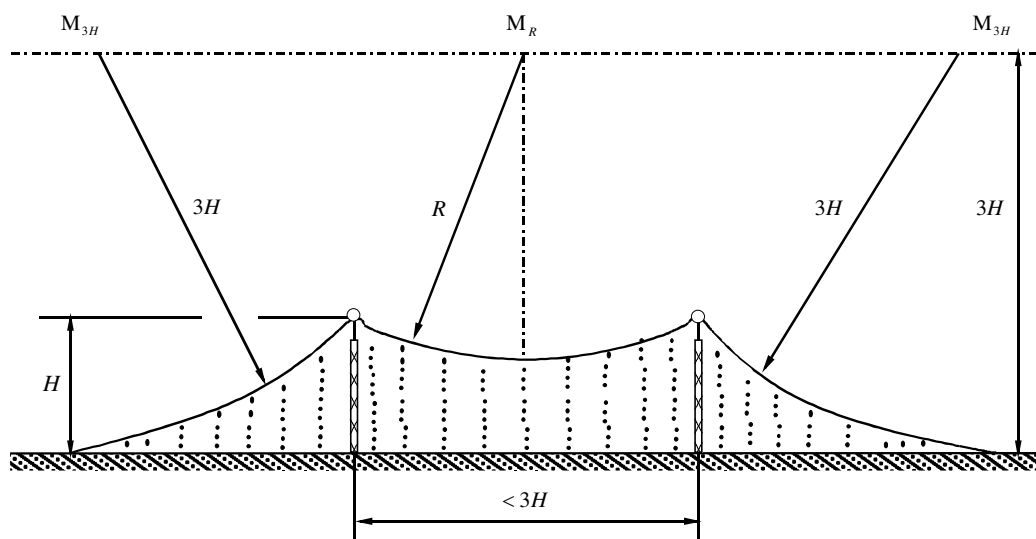
Piksevarda kaitsetsoon on üldjuhul laiem kui samasuguse kõrgusega piksetrossi puhul.

Üksik piksevarras loob nõguskoonuse kujulise kaitsetsooni, mille moodustaja on piksevarda tippu läbiv kaar raadiusega $3H$ (vt joonis 9.6.3).

Kahe teineteisest vähem kui $3H$ kaugusel asuva piksevarda vaheline kaitsetsoon moodustub varraste tippusid läbiva kaarega, mille raadius on R ja mille keskpunkt M_R on kõrgusel $3H$ (vt joonis 9.6.4).



Joonis 9.6.3 – Üksiku piksevarda kaitsetsoon



Joonis 9.6.4 – Kahe piksevarda kaitsetsoon

Kirjandus

1. Электрическая часть станций и подстанций / Под ред. А.А.Васильева. Москва, 1990.
2. M. Lehtonen, T. Hakola. Neutral earthing and power system protection. Earthing solutions and protective relaying in medium voltage distribution networks. ABB Transmit Oy, Relays and Network Control, Vaasa, Finland.
3. Teknisiä tietoja ja taulukoita. ABB Strömberg, Vaasa, 1990.
4. Switchgear Manual. 10th edition. Edited by Henning Gremmel for ABB Calor Emag Schaltanlagen AG Mannheim. Cornelsen Verlag, Berlin. 2001.
5. Ü. Treufeldt. Lühised elektrisüsteemides. TTÜ. Tallinn, 2002. 160 lk.
6. Kõik kättesaadavad Eestis ja mujal ilmuvad elektroenergeetikaalased ajakirjad ja Interneti leheküljed (www.abb.com, www.siemens.com, www.merlengerin.com/MG/en/index.htm, www.areva-td.com, www.vatech-td.com, jms.).