



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

110 KV ÕHULIINI KANDEMASTIDE PROJEKTEERIMINE TARTU-REOLA-MAARITSA PÕHJAL

DESIGN OF 110 KV OVERHEAD POWERLINE SUPPORT TOWERS BASED ON
TARTU – REOLA – MAARITSA LINE

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Taavi Poll

Üliõpilaskood: 093749AAVB

Juhendaja: Paul Taklaja, vanemlektor

Tallinn, 2019

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“.....” 201.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” 201.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Taavi Poll

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: 110 kV õhuliini kandemastide projekteerimine Tartu-Reola-Maaritsa põhjal.

Kuupäev: 25.05.2019

50 lk (lõputöö lehekülgede arv koos lisadega)

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): Paul Taklaja

Töö konsultant (konsultandid): Juhan Karin, Empower AS

Sisu kirjeldus:

Antud lõputöö eesmärgiks on kontrollida Eestis laialdaselt kasutatud raudbetoon kandemastide õhkvaheemike, ronimis õhkvaheemike ja äikesekaitse nivoode vastavust standardile EVS-EN 50341-1:2013 ja Elering AS tehnilistele nõuetele „701 Projekteerimine“

Lõputöö esimeses peatükis antakse ülevaade õhuliinil esinevatest liigpingetest. Kirjeldatakse õhuliini isolatsiooni koordineerimise ja selle protseduuri läbiviimist ja liigpingete määramist. Antakse ülevaade vähimate õhkvaheemike arvutamise teooriast.

Teises peatükis viiakse läbi isolatsiooni koordineerimise protseduur 110 kV õhuliinile Tartu – Reola – Maaritsa, arvutatakse konkreetsete liigpingete korral lubatavad õhkvaheemikud kiire tõusuga liigpingete korral, võrgusageduslike liigpingete korral ja ohutud ronimisvahemikud.

Kolmandas peatükis antakse ülevaade Eestis esinevatest välkudest ja välgu esinemissagedustest. Kirjeldatakse läbimurdest isolatsiooni ülelöövide arvutamise teooriat ja viiakse läbi konkreetse õhuliini Tartu – Reola – Maaritsa õhuliini välgukindluse nivoo arvutus IEEE programmiga Flash.

Märksõnad: kõrgepinge, raudbetoonkandemast, õhuliin, äikesekindlusenivoo, isolatsiooni koordineerimine, vähimad lubatud õhkvaheemikud

ABSTRACT

Author: Taavi Poll

Type of the work: Bachelor/Master Thesis

Title: Design of 110 kV overhead powerline support towers based on Tartu – Reola - Maaritsa

Date: 25.05.2019

52 pages (the number of thesis pages including appendices)

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisor(s) of the thesis: Paul Taklaja

Consultant(s): Empower AS, head of overhead power line design Juhan Karin

Abstract:

The aim of this thesis is to examine 110 kV reinforced concrete tower electrical design according to standards EVS-EN50341-1:2013 and technical literature published by Elering AS „701 Projekteerimine“.

First chapter gives an overview of over voltages that occur on high voltage overhead powerline. The process of insulation coordination is described and the determination of overvoltages.

In second chapter insulation coordination is carried out based on 110 kV Tartu – Reola – Maaritsa powerline. The calculation of tower top geometry according to electrical clearances and mid-span conductor clearances. Also the calculation of safe climbing distances for live works is carried out.

Third chapter gives an overview of lightning and compares lightning density in Estonia based on Nordlis data and ENSV “Kliimaatlas” data. The calculation method for shielding flashover rate is described, and the calculation itself is conducted using IEEE program Flash.

Keywords: reinforced concrete support tower, overhead powerline, lighting performance, insulation coordination, electrical clearances

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	110 kV õhuliini kandemastide projekteerimine Tartu – Reola – Maaritsa põhjal
Lõputöö teema inglise keeles:	Design of 110 kV overhead powerline support towers based on Tartu – Reola – Maaritsa line.
Üliõpilane:	Taavi Poll
Eriala:	Elektroenergeetika
Lõputöö liik:	bakalaureusetöö
Lõputöö juhendaja:	Paul Taklaja
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	üks aasta
Lõputöö esitamise tähtaeg:	24.05.2019

/allkirjastatud digitaalselt/

Üliõpilane (allkiri)

/allkirjastatud digitaalselt/

Juhendaja (allkiri)

/allkirjastatud digitaalselt/

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Teema uurimine on vajalik, arvestades asjaolu, et suurem osa 110 kV ülekandevõrgust on vanuses 40-60 aastat, vajavad olemasolevad õhuliinid rekonstrueerimist. Töö eesmärk on selgitada tüüpprojekti järgsete 110 kV raudbetoon kandemastide kasutatavus lähtuvalt EVS-EN 50341-1:2013 ja Elering AS seeria 700 „Tehnilistest nõuetest“.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on kontrollida tüüpprojekti mastide kasutatavus edasistes ehitatavates ja rekonstrueeritavates õhuliinides. Töö käigus kontrollitakse õhuliini mastide geomeetria, visangukesksed õhkvaheemikud, isolatsiooni koordineerimine, arvutatakse äikesekaitse nivood ja mastide maandused.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Töö käigus arvutatakse kehtiva standardi järgi õhuliinile Tartu-Reola ja Reola – Maaritsa projekteeritud mastide geomeetria, siseõhkvaheemikud ja visangukesksed õhkvaheemikud, samuti ronimisõhkvaheemikud.

Määratakse mastide maandustakistus, mis on vajalik tagamaks nõutud äikesekaitse nivood, lisaks dimensioneeritakse maandus- ja ühendusjuhid töökindluse ja termilise vastupidavuse järgi.

4. Lähteandmed

110 kV õhuliini mastide tüüpprojektid, kehtiv Elektriõhuliinide standard, Cigre poolt koostatud „Overhead powelines“ – The Green Book. Elering AS seeria 700 „Tehnilised nõuded“

5. Uurimismeetodid

Teoreetiline rakendus, võrdlev analüüs, tabelarvutused Excelis, arvutuste läbiviimine smath/mathcad programmiga, jooniste koostamine Autocad'is.

6. Graafiline osa

Masti eskiisid koos põhimõõtudega ning arvutatud õhkvaheemikega.

Masti maanduste skeemid.

7. Töö struktuur

Sisukord

Lõputöö ülesanne

Eessõna

Sissejuhatus

Siseõhkvaheemike arvutamise teooria ja arvutused

Visangukesksete õhkvaheemike arvutamise teooria ja arvutused

Mastide geomeetria ja joonised

Maanduspaigaldiste projekteerimine

BFR ja SFFOR nivooade arvutamise teooria ja arvutuste läbiviimine IEEE Flash programmiga

Järeldused ja kokkuvõte

8. Kasutatud kirjanduse allikad

- Elektrilevi OÜ hankedokumendid „Tartu –Maaritsa ja rajatava Reola 110/10 kV alajaama vahelise kahe 110 kV õhuliini eelprojekti koostamine (IK0973)“
- Elering AS seeria 700 „Tehnilised nõuded“
- Standard: EVS-EN 50341-1:2013 Elektriõhuliinid vahelduvpingega üle 1 kV Osa 1: Üldnõuded
- Standard: EVS-EN 50341-2-20:2018 Elektriõhuliinid vahelduvpingega üle 1 kV Osa 2-20: Eesti siseriiklikud erinõuded (SEN)
- International Council on Large Electric Systems (CIGRE) Study Committee B2: Overhead Lines
- CIGRE brošüür 063: GUIDE TO PROCEDURES FOR ESTIMATING THE LIGHTNING PERFORMANCE OF TRANSMISSION LINES

9. Lõputöö konsultandid

Juhan Karin – Empower AS, Kõrgepingeliinide projekteerimise juht - juhtmete koormused ja ripped vajadusel.

10. Töö etapid ja ajakava

Kirjanduse läbitöötamine – 20.03.2019

Lähteandmete kogumine 1.04.2019

Teoreetilise osa kirjutamine 10.04.2019

Arvutuste teostamine 20.04.2019

Järelduste kirjutamine 25.04.2019

Kokkuvõtte koostamine 30.04.2019

Töö esimene versioon valmis juhendajale läbilugemiseks. 1.05.2019

Paranduste sisseviimine. – 7.05.2019

Töö teineversioon valmis juhendajale läbilugemiseks. 7.05.2019

Töö lõplik versioon valmis 15.05.2019

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE.....	3
ABSTRACT	4
EESSÕNA.....	10
SISSEJUHATUS	11
1. ÕHKVAHEMIKE ARVUTAMINE TEOREETILISEL MEETODIL	12
1.1 Liigpinged	12
1.1.1 Liigpingete tüübid.....	12
1.2 Isolatsiooni koordinaatsioon.....	13
1.2.1 Isolatsiooni koordinaiooni protseduur	13
1.3 Statistiline lähenemine õhkvaheemiku suuruse määramiseks.....	15
1.4 Visangukesksete õhkvaheemike määramine.....	19
2. TARTU – REOLA JA REOLA – MAARITSA ÕHULIINI ISOLATSIOONI KOORDINATSIOON JA ÕHKVAHEMIKE ARVUTAMINE.....	22
2.1 110 kV õhuliini Tartu-Reola-Maaritsa isolatsiooni koordinaatsioon	22
2.1.1 Elektrilised lähteandmed	22
2.2 Vähimate õhkvaheemike arvutamine.....	22
2.3 Visangukesksete õhkvaheemike arvutamine.....	26
2.4 Ronimisõhkvaheemikud.....	32
3. TARTU – REOLA – MAARITSA ÕHULIINI ÄIKESEKINDLUSE NIVOOD	36
3.1 Äike Eestis	36
3.2 Äikese parameetrid.....	39
3.3 Õhuliinide piksekaitse põhimõtted.....	40
3.4 Läbimurdest isolatsiooni ülelöögi määra arvutamine, SFFOR	40
KOKKUVÕTE	45
SUMMARY	47

KASUTATUD KIRJANDUS	48
LISAD	49
Lisa 1 Masti 54 kandekettide kõrvalekalde kontroll	49
Lisa 2 IEEE FLASH programmi arvutusleht	50

EESSÕNA

Käesolev töö on koostatud autori enda initsiatiivil, kuna autor puutub igapäevaselt kokku kõrgepinge õhuliini projekteerimisega. Töö eesmärgiks on koostada arvutused 110 kV õhuliinile vajalike õhkvaheemike, ronimisvahemike, äikesekindluseniivoode leidmiseks ja kontrollimiseks.

Autor tänab käesoleva töö valmimise juures abi pakkunud juhendajat Paul Taklaja't ja Empower AS Kõrgepinge projekteerimisosakonna juhti Juhan Karin'it.

Kõrgepinge õhuliinid, ühendavad me linnasid,

toimetavad elektrienergiat tarbijani.

Metallsõrestik ankrumastid ja raudbetoon kandemastid,

koostöös traaversite, isolaatorkettidega hoiavad juhett maast kõrgemal.

Eesti põhivõrk suures osas vananenud,

vajab palju tähelepanu tagamaks varustuskindlust.

Uusi õhuliine ehitades, vanu õhuliine rekonstrueerides,

suurendame läbilaskevõimet.

SISSEJUHATUS

Lõputöö eesmärgiks on uurida ja kirjeldada 110 kV Tartu – Maaritsa - Reola õhuliini kandemasti projekteerimist lähtudes elektrilistest nõuetest. Teema on ajendatud Eesti põhivõrgu seisukorrast, põhivõrk on rajatud aastatel 1955-1985 suur osa 110 kV õhuliine on vanuses 35-60 aastat. Vastavalt Elering AS kinnitatud investeeringute eelarvele aastateks 2018-2022, planeeritakse rekonstrueerida olemasolevaid 110 kV õhuliine. Elering AS poolt koostatud „Varustuskindluse aruande“ Lisas 6 on esitatud vähemalt 20 õhuliini, mida plaanitakse rekonstrueerida või ehitada.

Töö on jaotatud kolmeks peatükiks. Esimene peatükk käsitleb vähimate õhkvahemike leidmist teoreetilisel meetodil, annab ülevaate liigpingetest ja isolatsiooni koordinatsioonist ja visangukesksete õhkvahemike arvutamisest.

Teisest peatükis viiakse läbi arvutused esimeses peatükis kirjeldatud teooria põhjal, kasutades vabavaralist arvutusprogrammi Smath Studio 0.99. Samuti koostatakse õhuliini kandemasti joonis kuhu peale kantakse kõik arvutatud õhkvahemikud.

Kolmandas peatükis käsitletakse õhuliini äikesekindluseniivood, esmalt kirjeldatakse lühidalt välku, välku Eestis ja välguvoolu parameetreid, seejärel antakse teoreetiline ülevaade isolatsiooni ülelööride arvutamise kohta, viiakse läbi arvutused IEEE programmiga Flash.

1. ÕHKVAHEMIKE ARVUTAMINE TEOREETILISEL MEETODIL

Käesolevas peatükis kirjeldatakse õhkvaehemike arvutamist teoreetilisel meetodil. Enne valemite esitamist antakse ülevaade vajalikest liigpingetest, tüüppingetest ja isolatsiooni koordinatsioonist. Õhuliini projekteerimise lähteülesandes antakse nõutav õhuliini nimipinge ja õhuliini läbilaskevõime. Nendest lähtuvalt tuleb määrata õhuliini mastide ülemise otsa geomeetria, elektrivälja mõjud, koroonamõjud, liigpinged, isolatsiooni koordinatsioon ja õhuliini trass ja mastide asukohad. [1]

1.1 Liigpinged

Liigpinge on pinge, mille väärtus ületab isolatsioonile ettenähtud maksimaalset pinget. Isolatsioonile ettenähtud maksimaalne pinge on tavaliselt suurima lubatava kestepinge maksimaalväärtus:

- Faasi ja maa vahelisele isolatsioonile $\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}U_s$
- Faasidevahelisele isolatsioonile $\sqrt{2}U_s$

kus, U_s - võrgu suurim pinge

Liigpingeid iseloomustab pinge suurim väärtus, pinge kuju ja esinemissagedus. [2]

1.1.1 Liigpingete tüübid

Kiire tõusuga liigpinged – ehk atmosfääri liigpinged on peamiselt põhjustatud välgu otselöökidest õhuliini faasijuhtmesse või vastassuunalistest ülelöökidest faasijuhtmetesse põhjustatud liigpinged. Kiire tõusuga liigpingeid tuleb arvestada õhuliini välgukindluse määramisel. Projekti erinõuetega määratakse õhuliini välgukindluse nivoo, kus antakse maksimaalne ülelöökide arv 100 kilomeetri liini kohta aastas. Liini nimipinge kasvades, muutuvad välgust põhjustatud liigpingete tähtsus väiksemaks isolatsiooni arvutamisel, seda põhjusel, et muutuvad olulisemaks teised liigpinged, näiteks lülitamisest põhjustatud liigpinged. Välgulöögi tabamused maapinda õhuliini lähedal, võivad tekitada liigpingeid mis põhjustavad vastassuunalisi ülelööke faasijuhtmetest mastile. [1]

Ajutised liigpinged – on antud võrgu punktis esinevad võnkuvad võrgusageduslikud liigpinged, mis on suhteliselt pika kestusega ega sumbu, või sumbuvad nõrgalt. Ajutised tüüpliigpinged on

põhjustatud riketest, koormuse äkkväljalülitumisest, resonantsist, ferroresonantsist. Ajutisi liigpingeid 110 kV õhuliini isoleerõhkvahemike määramisel üldiselt ei arvestata. [1]

Aeglase tõusuga liigpinged – põhjuseks võivad olla rikked, lülitamised või kaugetest välgu otselöökidest õhuliini. Tähtsaimateks aeglase tõusuga liigpingeteks õhuliinide jaoks on maaühendustest ja taaslülitamistest põhjustatud liigpinged. Aeglase tõusuga liigpinge mõju iseloomustatakse impulsiga mille kuju vastab standardsele lülitusimpulsile 250/2500 μ s. [1]

1.2 Isolatsiooni koordineatsioon

Isolatsiooni koordineatsiooni määramisel valitakse isolatsiooni iseloomustavad standardsed ja taluvuspinged. Õhuliini puhul koosneb isolatsiooni koordineatsioon järgmistest sammudest:

- Tüüppingete ja liigpingete kindlaksmääramine;
- Koordineatsiooni taluvuspingete kindlaksmääramine;
- Õhkvahemiku nõutavate taluvuspingete kindlaksmääramine;
- Õhkvahemiku jaoks asjakohase elektroodide vahelise kauguse kindlaksmääramine; [1]

1.2.1 Isolatsiooni koordineatsiooni protseduur

Tüüpliigpingete ja liigpingete kindlaksmääramine

Õhkvahemike arvutamisel tuleb arvesse võtta välgu poolt tekitatud kiire tõusuga liigpinged I ja II pingepiirkonna võrkudes, pingepiirkond on määratud standardis EN 60071-1, I pingepiirkonnas on võrgu suurim pinge üle 1 kV kuni 245 kV ja teises pingepiirkonnas võrgu suurim pinge üle 245 kV. Lülituste põhjustatud aeglase tõusuga liigpinged võetakse arvesse ainult II pingepiirkonna võrkudes. Kiire tõusuga tüüpliigpingena tuleb võtta aluseks liigpinge, mis on levinud välgu tabamispunktist mõne masti kaugusele. Faasi ja maa vaheliste õhkvahemike jaoks võetakse see pinge isolaatorketi 90% taluvuspinge välguimpulssidel. Faaside vaheliste õhkvahemike jaoks võetakse see pinge 1,20 kordne isolaatorketi 90% taluvuspinge välguimpulssidel. [3]

Aeglase tõusuga liigpinged – kuna käesolevas töös on vaatluse all liin, mille suurim võrgupinge on 123 kV, siis käesolevas töös õhkvahemike määramisel ei arvestata aeglase tõusuga liigpingetega. [3]

Võrgusageduspinged

Isolatsiooni projekteerimise ja koordineerimise jaoks võrgusageduspingetel tuleb võtta konstantseks ja võrdseks võrgu suurima pingega:

- Faasi ja maa vahelisele isolatsioonile $\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_s$
- Faasidevahelisele isolatsioonile $\sqrt{2} U_s$

Järgnevas tabelis on esitatud kokkuvõtlikult tüüpinged, tüüpliigpinged ja nende väärtused:

Tabel 1.1 Tüüpinged ja tüüpliigpinged

Tüüpinged ja tüüpliigpinged U_{rp}		
	Faasi ja maa vahel	Faaside vahel
Kiire tõusuga liigpinged (atmosfääri liigpinged)	$U_{90\%_{ff_is}}$	$1,2U_{90\%_{ff_is}}$
Võrgusageduspinged	$\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} U_s$	$\sqrt{2} U_s$

$U_{90\%_{ff_is}}$ – liinile paigaldatud isolaatorketi suurim 90% taluvuspinge välguimpulssidel [3]

110 kV liini nimepinge, vastav suurim võrgupinge ja seadmetele lubatav suurim kestevpinge on määratud standardis EN 60038 „CENELECI standardpinged“. Standardi EVS-EN 50341 tabelis 5.3 „Vähimad õhkvaheemikud D_{el} ja D_{pp} välgu liigpingete talumiseks“ on määratud liini isolaatorketi tüüpiline välgutaluvuspinge, käesolevas töös on isolaatorketi $U_{90\%_{ff_is}}$ väärtuseks võetud 550 kV. Lisaks on võimalik isolaatorketi impulssaluvuspinge arvutada kasutades valemit:

$$U_{90\%_{ff_is}} = K_{Z_{ff}} \cdot K_{g_{ff_is}} \cdot 530 \cdot d_{is} \quad (1.1)$$

kus, $K_{Z_{ff}}$ – õhkvaheemiku taluvuspinge statistilise jaotuse hälbetegur kiire tõusuga liigpingete korral

$K_{g_{ff_is}}$ – isolaatorketi kujutegur kiire tõusuga liigpinge impulsside jaoks

d_{is} - isolaatorketi otspunktide vahelise õhkvaheemiku suurus, m [3]

Koordineerimise taluvuspinge

Kasutatav koordineerimise taluvuspinge U_{cw} tuleb võtta tüüpliigpingest U_{rp} suurem või sellega võrdne. [3]

Õhkvaheemiku nõutav taluvuspinge

Koordinatsiooni taluvuspinge U_{cw} kaudu määratakse õhkvaheemiku nõutav taluvuspinge U_{rw} arvestades atmosfääritingimustega seotud parandustegurit. Standardi EVS-EN 50341-2-20:2018 kohaselt tuleb atmosfääri teguri k_a väärtuseks võtta 1,0 olenemata kõrgusest merepinnast. [3] [4]

1.3 Statistiline lähenemine õhkvaheemiku suuruse määramiseks

Isolatsioonimaterjalid jagunevad elektrilise läbilöögi korral laias laastus kaheks, mitte isetaastuvateks, näiteks paber või õli trafodes isetaastuvateks, näiteks õhk. Järgnevalt on vaatluse all statistiline lähenemine isetaastuva isolatsiooni korral. Kui isolatsiooni katsetada kindel arv kordi, kindla pingekuju ja impulsiga, siis isolatsiooni rike võib esineda või mitte. Sellest lähtuvalt, määratakse õhkvaheemiku suurus tõenäosusfunktsiooniga, Gaussian(normaal) või Weibull funktsioonina. [1] Standard EVS-EN 50341-1 soovib kasutada modifitseeritud Weibulli jaotusfunktsiooni, mille parameetrid on kindlaks määratud nii, et see vastaks normaaljaotusele 50% ja 16% sildavlahenduse tõenäosuse juures ning et jaotus oleks lõigatud $U_{50\%}-3Z$. Õhkvaheemiku nõutav taluvuspinge avaldatakse funktsioonina 50% taluvuspinge $U_{50\%}$ kaudu: [3]

$$U_{rw} = U_{90\%} = U_{50\%} - N \cdot Z \quad (1.2)$$

kus, $U_{90\%}$ õhkvaheemiku 90% taluvuspinge, kV

$U_{50\%}$ õhkvaheemiku 50% taluvuspinge, kV

Z standardhälve

N nõutavale taluvuspingele U_{rw} vastav standardhälve kordus.

Kiire ja aeglase tõusuga liigpingete puhul on nõutavaks statistiliseks taluvuspingeks U_{rw} õhkvaheemiku 90% taluvuspinge $U_{90\%}$, mis avaldatakse õhkvaheemiku 50% taluvuspinge $U_{50\%}$ järgi:

$$U_{rw} = U_{90\%} = U_{50\%} - 1,3 \cdot Z \quad (1.3)$$

Võrgusageduspingete jaoks määratakse õhkvaheemik avaldisega

$$U_{rw} = U_{100\%} = U_{50\%} - 3 \cdot Z \quad (1.4)$$

Hälbetegurid Z, standardhälve Z väljendatakse 50% taluvuspinge $U_{50\%}$ kaudu:

$$Z = zU_{50\%} \quad (1.5)$$

Vastavalt standardile EVS 50341 kasutatakse järgmisi variatsioonitegureid z ja standardhälbeid Z

- kiire tõusuga liigpingetele $z=0,03$ ja $Z=0,03U_{50\%}$
- aeglase tõusuga liigpingetele $z=0,06$ ja $Z=0,06U_{50\%}$
- võrgusageduspingetele $z=0,03$ ja $Z=0,03U_{50\%}$

Ülaltoodud standardsete hälvete juures on arvestatud atmosfääritingimuste mõjuga, mistõttu võib õhkvaheemiku nõutava taluvuspinge avaldada hälbeteguri K_z kaudu:

$$U_{rw} = K_z \cdot U_{50\%} \quad (1.6)$$

Järgnevas tabelis on esitatud eelpool toodud valemite kaudu arvutatud hälbetegurid. [3]

Tabel 1. 2 Hälbetegurid liigpingetele [3]

Mõjuva pinge tüüp	Õhkvaheemiku nõutav taluvuspinge U_{rw}	Standardhälve Z	Hälbetegur K_z
Kiire tõusuga liigpinged	$U_{rw} = U_{90\%} = U_{50\%} - 1,3 Z$	$0,03 U_{50\%}$	$K_{z_ff} = 0,961$
Aeglase tõusuga liigpinged	$U_{rw} = U_{90\%} = U_{50\%} - 1,3 Z$	$0,06 U_{50\%}$	$K_{z_sf} = 0,922$
Võrgusageduspinged	$U_{rw} = U_{100\%} = U_{50\%} - 3 Z$	$0,03 U_{50\%}$	$K_{z_pf} = 0,910$

Kujutegurid

Õhkvaheemiku elektrilist tugevust mõjutab õhkvaheemiku konfiguratsioon. Kõikide mõjuvate pinge tüüpide jaoks avaldatakse kujutegurid järgmiselt:

Aeglase tõusuga liigpinged: K_{g_sf}

Kiire tõusuga liigpinged: $K_{g_ff}=0,74+0,26K_{g_sf}$

Võrgusageduspinged: $K_{g_pf}=1,35K_{g_sf}-0,35K_{g_sf}^2$

Aeglase tõusuga liigpingete kujuteguri väärtused sõltuvad vahemiku konfiguratsioonist, tabelis 1.3 on esitatud kujutegurid aeglase tõusuga liigpingete jaoks:

Tabel 1.3 Aeglase tõusuga liigpingete kujuteguri väärtused sõltuvalt konfiguratsioonist [3]

Õhk- vahemiku tüüp	Konfiguratsioon	Kujutegur aeglase tõusuga liigpingete jaoks $K_{g_{sf}} = K_g$
Välis- vahemikud	Juhe – liiniväline objekt (ohutusvahemik)	1,30
Sise- vahemikud	Juhe – masti aken nt vahemik masti aknas paikneva juhtme ja masti konstruktsiooni vahel. • vertikaalne või V-kujuline isolaatorkett masti aknas	1,25
	Juhe – masti konstruktsioon nt vahemik traaversi konsooli lõpus vabalt rippuva isolaatorketi külge kinnitatud juhtme ja masti konstruktsiooni vahel. • vertikaalne isolaatorkett traaversi konsooli lõpus; • V-kujuline isolaatorkett.	1,45
	Juhe–juhe	1,60

Kiire tõusuga liigpinge korral vahemiku teravik-tasapind läbilöögipinge positiivse polaarsusega standardsetel välguimpulssidel ja kuni 10 m vahekaugustel määratakse seosega:

$$U_{50rp_ff} = 530 \cdot d \text{ tippväärtus kV} \quad (1.7)$$

kus d – vahekaugus, m

Võrgusageduspingetel vahemiku teravik-tasapind 50% läbilöögipinge ligikaudne väärtus leitakse valemiga

$$U_{50rp_50Hz} = 750\sqrt{2}\ln(1 + 0,55d^{1,2}) \text{ tippväärtus, kV} \quad (1.8)$$

d – vahekaugus, m

Vähimate õhkvahemike arvutusvalemite tuletamisel lähtutakse järgmisest avaldistest:

- $U_{cw} \geq U_{rp}$ – õhkvahemiku koordinatsiooni taluvuspinge U_{cw} peab olema kõikide mõjuvate pingete puhul olema tüüptaluvuspingest U_{rp} kõrgem või sellega võrdne.
- $U_{rw} \geq U_{cw}/k_a$ ja $f(d) = U_{rw}/K_z K_g$ – Koordinatsiooni korrigeermisel arvestatud atmosfääriteguriga k_a , nõutava õhkvahemiku taluvuspinge U_{cw} ja formuleeringuga mis kirjeldab seoseid suuruse d määramiseks. [3]

Eelnevate avaldiste põhjal on alljärgnevalt toodud arvutusvalemid vähimate õhkvahemike suuruste määramiseks:

Faasi ja maa vahel kiire tõusuga liigpingete korral:

$$D_{el} = \frac{U_{90\%_{ff-is}}}{530k_a K_{z_{ff}} K_{g_{ff}}} = \frac{1}{k_a} \cdot \frac{K_{g_{ff-is}}}{K_{g_{ff}}} d_{is} \quad (1.9)$$

kus d_{is} – isolaatorketi otspunktide vaheline õhkvahemik, m

$K_{g_{ff}}$ – õhkvahemiku kujutegur välguimpulssidel

$K_{g_{ff-is}}$ – isolaatorketi kujutegur välguimpulssidel

$K_{z_{ff}}$ – õhkvahemiku taluvuspinge statistilise jaotuse hälbetegur kiire tõusuga liigpingete korral

k_a – atmosfääritegur

$U_{90\%_{ff-is}}$ – liinile paigaldatud isolaatorketi 90% taluvuspinge suurim väärtus välguimpulssidel, kV. [3]

Faaside vaheline õhkvahemik kiire tõusuga liigpingete korral:

$$D_{50Hz_{p-e}} = 1,642 \left(\exp \left(\frac{U_s}{750 \sqrt{3 \cdot k_a \cdot K_{z_{pf}} \cdot K_{g_{pf}}}} \right) - 1 \right)^{0,83} \quad (1.10)$$

kus – $k_{g_{pf}}$ – õhkvahemiku kujutegur võrgusageduspinge jaoks

$K_{z_{pf}}$ – õhkvahemiku taluvuspinge statistilise jaotuse hälbetegur võrgusageduspingete korral

k_a – atmosfääritegur

U_s – võrgu suurim pinge, kV [3]

Faaside vaheline õhkvahemik, m kiire tõusuga liigpingete korral:

$$D_{pp} = \frac{1,2 \cdot U_{90\%_{ff-is}}}{530 \cdot k_a \cdot K_{z_{ff}} \cdot K_{g_{ff}}} \quad (1.11)$$

kus d_{is} – isolaatorketi otspunktide vaheline õhkvahemik, m

$K_{g_{ff}}$ – õhkvahemiku kujutegur välguimpulssidel

$K_{g_{ff-is}}$ – isolaatorketi kujutegur välguimpulssidel

$K_{z_{ff}}$ – õhkvaheemiku talvuspinge statistilise jaotuse hälbetegur kiire tõusuga liigpingete korral

k_a – atmosfääritegur

$U_{90\%_{ff_{is}}}$ – liinile paigaldatud isolaatorketi 90% talvuspinge suurim väärtus välguimpulssidel, kV. [3]

Faaside vaheline õhkvaheemik, m võrgusageduspingete korral:

$$D_{50Hz_{p-p}} = 1,642 \left(\exp \left(\frac{U_s}{750 \cdot k_a \cdot K_{z_{pf}} \cdot K_{g_{pf}}} \right) - 1 \right)^{0,83} \quad (1.12)$$

kus $k_{g_{pf}}$ – õhkvaheemiku kujutegur võrgusageduspinge jaoks

$K_{z_{pf}}$ – õhkvaheemiku talvuspinge statistilise jaotuse hälbetegur võrgusageduspingete korral

k_a – atmosfääritegur

U_s - võrgu suurim pinge, kV. [3]

1.4 Visangukesksete õhkvaheemike määramine

Käesolev peatükk kirjeldab visangukesksete õhkvaheemike määramist faasijuhtmete vahel ja faasijuhtmete ning piksekaitsetrosside vahel tuule puudumisel. Samas, tuleb arvestada juhtme kõrvalekalde nurka arvutuslike tuuletingimuste korral. Nõutavad õhkvaheemikud on seotud eelmises peatükis kirjeldatud D_{pp} ja D_{el} vähimate väärtustega, mis korrutatakse läbi vähendusteguriga k_1 , mille väärtus on määratud EVS-EN 50341-2-20:2018 kohaselt 0,70. Visangusisesed õhkvaheemikud arvutatakse järgmisel koormusjuhtumitel:

Tabel 1.4 Visangukesksete õhkvaheemike arvutamise koormusjuhtumid

Koormusjuhtum	Faasijuhe – faasijuhe	Faasijuhe – piksekaitsetross
Juhtme suurim temperatuur	D_{pp}	D_{el}
Piirjätekoormus	D_{pp}	D_{el}
Nimituulekoormus	$k_1 D_{pp}$	$k_1 D_{el}$
Piirtuulekoormus	$D_{50Hz_{p-p}}$	$D_{50Hz_{p-e}}$

Lisaks, ei tohi piksekaitsetrossi riipe ulatuda faasijuhtmetest allapoole. Kuna vaatluse all oleval liinil on kasutusel ühte tüüpi juhtmed, siis võib kasutada standardi EVS 50341-1:2013 kohaselt lihtsustatud meetodit nõutava õhkvaheemiku arvutamiseks visangu tuulevaikuse korral. Antud valemite kasutamisel saadud väärtused tagavad nõutava õhkvaheemiku ka tuulekoormuste korral. [3]

Faasijuhtmete vaheline kaugus visangu keskel leitakse valemiga:

$$c = k\sqrt{f + l_k} + k_1 D_{pp} \quad (1.13)$$

Valem 1.1 – faasijuhtmete vahelise kauguse arvutamise valem [3]

Faasi ja piksekaitsetrossi vaheline vahemik visangu keskel leitakse valemiga:

$$c = k\sqrt{f + l_k} + k_1 D_{el} \quad (1.14)$$

Valem 1.2 – faasijuhtme ja piksekaitsetrossi vahelise kauguse arvutamise valem

kus f – faasijuhtme või piksekaitsetrossi riipe, m temperatuuril +40°C;

l_k – ükskõik millise isolaatorketi osa pikkus, mis võib risti liini suunaga kõrvale kalduda, m

k – koefitsient vastavalt EVS-EN 50341-1:2013 Lisa F tabelile F.1

D_{pp} – faaside vahelise õhkvaheemiku vähim väärtus, m (Valem 1.11)

D_{el} – faasi ja maa vahelise õhkvaheemiku väärtus, m (Valem 1.9) [3]

Juhtmete kõrvalekalde nurk on juhtmele mõjuva horisontaalse tuulekoormuse ja kaaluvisangule vastava juhtme vertikaalkoormuse suhe. Juhtme kõrvalekalde nurk arvutatakse vastavalt valemile:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{Q_{wc}}{G_k}\right) \quad (1.15)$$

kus φ – juhtme kõrvalekalde nurk °

Q_{wc} – juhtmele mõjuv horisontaalne tuulekoormus, 10 minutiline keskmine tuulekiirus, m/s

G_k – kaaluvisangule vastav juhtme vertikaalne kaalukoormus, N [3]

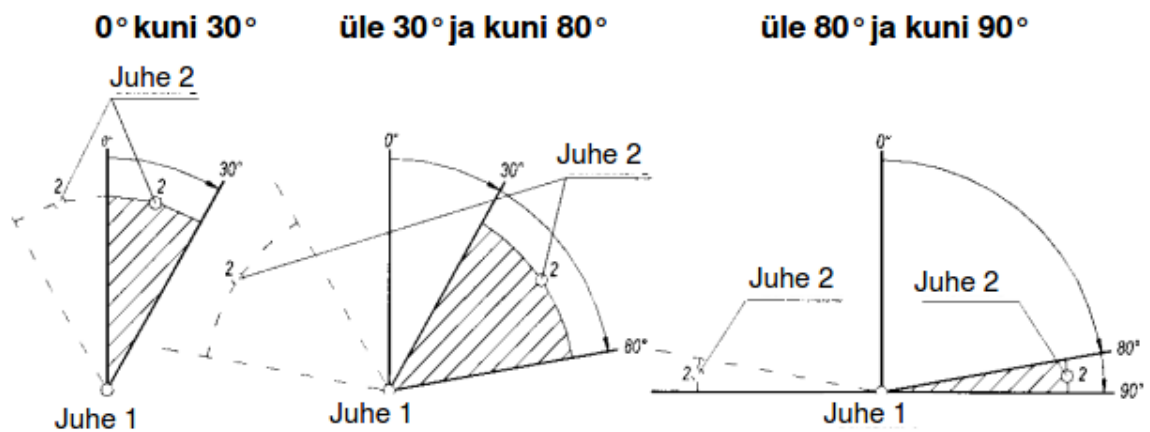
Tabelis 1.5 on esitatud koefitsiendi k väärtused arvestades juhtme kõrvalekalde nurka ja nurka juhtmete A ja B vahel vastavalt õhuliini masti traaversite asetusele. Lisaks peab arvestama

õhkvaheemike hindamisel mastis isolaatorketi kõrvalekalde nurgaga, mis tuleneb juhtmele ja isolaatorketile mõjuva tuulekoormuse ning juhtme ja isolaatorkomplekti omakaalu suhtest. [3]

Tabel 1.5 Koefitsient k väärtused

Koefitsient k väärtused				
		Nurk juhtmete 1 ja 2 vahel		
		0°C ...30°C	>30°C...80°C	>30°C...90°C
Juhtme	40,1°C...55,0°C	0,75	0,65	0,62
kõrvalekalde nurga vahemik	≤40,0°C	0,70	0,62	0,60

Järgnevalt on esitatud joonis juhtme 2 asend juhete 1 läbiva vertikaaltelje suhtes. Joonist tuleb kasutada koos tabeliga 1.5 ning valida vastav koefitsiendi k väärtus. [3]



Joonis 1.1 Faasijuhtme „2“ asend faasijuhete 1 läbiva vertikaaltelje suhtes. [3]

2. TARTU – REOLA JA REOLA – MAARITSA ÕHULIINI ISOLATSIOONI KOORDINATSIOON JA ÕHKVAHEMIKE ARVUTAMINE

Olemasolev 35 kV Reola alajaam demonteeritakse ning selle asemele rajatakse uude asukohta 110/10 kV alajaam. Alajaama toitmiseks rajatakse uued 110 kV õhuliinid olemasoleva 35 kV õhuliini asemele. Uued õhuliinid ühendatakse olemasoleva 110 kV õhuliiniga Tartu – Maaritsa selliselt, et tekib kaks uut õhuliini Tartu – Reola ja Reola – Maaritsa. Olemasolev 35 kV õhuliin on ehitatud „Elektriseadmete ehituse eeskirjad – Üle 1000-V õhuliinid, jaotlad ja alajaamad“ määruse järgi. Elektrilevi hankedokumentatsiooni järgi peavad uued liinid olema projekteeritud standartide EVS-EN 50341-1:2013, EVS-EN 50341-2-20:2015 ja Elering AS poolt esitatud tehnilise juhendi „701 Projekteerimine“ põhjal. Käesolevas peatükis viib autor läbi eelmise peatüki põhjal konkreetse õhuliini isolatsiooni koordineerimise, arvutab kõik nõutavad vähimad õhkvaahemikud ning kannab need joonisele. [5]

2.1 110 kV õhuliini Tartu-Reola-Maaritsa isolatsiooni koordineerimine

2.1.1 Elektrilised lähteandmed

Nimetus	Tähis	Väärtus
Võrgu nimipinge	U_n	110 kV
Võrgu suurim pinge	U_s	123 kV
Isolaatorketi 90% välguimpulsstaluvuspinge	$U_{90\%_{ff_is}}$	550 kV
Kiire tõusuga liigpinged		
Faasi ja maa vaheline	$U_{90\%_{ff_is}}$	550 kV
Faasidevaheline	$1,20U_{90\%_{ff_is}}$	660 kV
Võrgusageduspinged		
Faasi ja maavaheline isolatsioon	$\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}U_s$	100,42 kV
Faasidevaheline isolatsioon	$\sqrt{2}U_s$	173,94 kV

2.2 Vähimate õhkvaahemike arvutamine

Arvutuste läbiviimiseks on kasutatud vabavara arvutusprogrammi SMath Studio 0.99. Programmi on sisestatud lähteandmed ja arvutusvalemid. Arvutuste ümardatud tulemused on kokkuvõtlikult esitatud järgnevates tabelites 2.1 ja 2.2. Arvutuskäik vähimate õhkvaahemike leidmiseks kiire tõusuga liigpingete korral on esitatud joonisel 2.1.

Kiire tõusuga liigpinged

Isolaatorketi 90% taluvuspinge välguimpulssidel

$$U_{90\%_{ff_{is}}} := 550$$

Atmosfääri tegur, vastavalt EVS-EN 50341-2-20:2018

$$k_a := 1$$

Õhkvaheemiku taluvuspinge statistilise jaotuse hälbetegur, EVS-EN 50341-1:2013

$$K_{z_{ff}} := 0,961$$

Juhe - liiniväline objekt

$$K_{g_{sf}} := 1,30$$

Õhkvaheemiku kujutegur välguimpulssidel

$$K_{g_{ff}} := 0,74 + 0,26 \cdot K_{g_{sf}} = 1,078$$

Juhe - liiniväline objekt

$$D_{el} := \frac{U_{90\%_{ff_{is}}}}{530 \cdot k_a \cdot K_{z_{ff}} \cdot K_{g_{ff}}} = 1,0017$$

Juhe - masti aken

$$K_{g_{sf}} := 1,25$$

Õhkvaheemiku kujutegur välguimpulssidel

$$K_{g_{ff}} := 0,74 + 0,26 \cdot K_{g_{sf}} = 1,065$$

Juhe - masti aken

$$D_{el} := \frac{U_{90\%_{ff_{is}}}}{530 \cdot k_a \cdot K_{z_{ff}} \cdot K_{g_{ff}}} = 1,0139$$

Juhe - masti konstruktsioon

$$K_{g_{sf}} := 1,45$$

Õhkvaheemiku kujutegur välguimpulssidel

$$K_{g_{ff}} := 0,74 + 0,26 \cdot K_{g_{sf}} = 1,117$$

Juhe - masti konstruktsioon

$$D_{el} := \frac{U_{90\%_{ff_{is}}}}{530 \cdot k_a \cdot K_{z_{ff}} \cdot K_{g_{ff}}} = 0,9667$$

Juhe - juhe

$$K_{g_{sf}} := 1,60$$

Õhkvaheemiku kujutegur välguimpulssidel

$$K_{g_{ff}} := 0,74 + 0,26 \cdot K_{g_{sf}} = 1,156$$

Juhe-juhe

$$D_{PP} := \frac{1,2 \cdot U_{90\%_{ff_{is}}}}{530 \cdot k_a \cdot K_{z_{ff}} \cdot K_{g_{ff}}} = 1,121$$

Joonis 2.1 – Arvutuskäik vähimate õhkvaheemike leidmiseks kiire tõusuga liigpingete korral

Tabel 2.1 Faasi ja maa vaheliste õhkvahemike väärtused kiire tõusuga liigpingete korral

Kiire tõusuga liigpinged			
Faasi ja maavahel D_{el}			
Õhkvahemiku tüüp	Konfiguratsioon	Arvutatud väärtus, m	Kujuteguri k_a väärtus
Välisõhkvahemik	Juhe ja liiniväline objekt	1,002	1,30
Siseõhkvahemik	Juhe – masti aken	1,014	1,25
	Juhe – masti konstruktsioon	0,967	1,45

Tabel 2.2 Faaside vaheline vähim õhkvahemik kiire tõusuga liigpingete korral

Kiire tõusuga liigpinged			
Faaside vahel D_{pp}			
Õhkvahemiku tüüp	Konfiguratsioon	Arvutatud väärtus, m	Kujuteguri k_a väärtus
Siseõhkvahemik	Juhe-juhe	1,121	1,60

Tabelis 2.1 esitatud faasi ja maavahelise vähima õhkvahemiku D_{el} väärtuseks kiire tõusuga liigpingete korral on edasistes arvutustes võetud 1,0 m. Tabelis 2.2 esitatud faaside vahelise vähima õhkvahemiku D_{pp} väärtuseks kiire tõusuga liigpingete korral on edasistes arvutustes võetud 1,15 m. Antud D_{el} ja D_{pp} väärtused vastavad Elering AS dokumendi „701 Projekteerimine tabelis 5-2 „Välisõhkvahemikud“ toodud väärtustele.

Arvutuskäik vähimate õhkvaemike leidmiseks võrgusageduspingetel on esitatud joonisel 2.2. Ümardatud arvutuste väärtused on esitatud tabelites 2.3 ja 2.4.

Võrgu suurim pinge

$$U_s := 123$$

atmosfääritegur

$$k_a := 1$$

Õhkvaemiku taluvuspinge statistilise jaotuse hälbetegur võrgusageduspinge korral

$$K_{z_pf} := 0,91$$

Lülitusimpulsi kujutegur juhe-liiniväline objekt

$$K_{g_sf} := 1,30$$

Õhkvaemiku kujutegur võrgusageduspinge jaoks avaldatuna kujuteguri K_g kaudu: juhe - liiniväline objekt

$$K_{g_pf} := 1,35 \cdot K_{g_sf} - 0,35 \cdot K_{g_sf}^2 = 1,1635$$

Vähim õhkvaemik faasi ja maa vahel: juhe - liiniväline objekt

$$D_{50Hz_p_e} := \left(1,642 \cdot \exp \left(\frac{U_s}{750 \cdot \sqrt{3} \cdot k_a \cdot K_{z_pf} \cdot K_{g_pf}} \right) - 1 \right)^{0,83} = 0,2112$$

Lülitusimpulsi kujutegur juhe-masti aken

$$K_{g_sf} := 1,25$$

Õhkvaemiku kujutegur võrgusageduspinge jaoks avaldatuna kujuteguri K_g kaudu: Juhe - masti aken

$$K_{g_pf} := 1,35 \cdot K_{g_sf} - 0,35 \cdot K_{g_sf}^2 = 1,1406$$

Vähim õhkvaemik faasi ja maa vahel: juhe - masti aken

$$D_{50Hz_p_e} := \left(1,642 \cdot \exp \left(\frac{U_s}{750 \cdot \sqrt{3} \cdot k_a \cdot K_{z_pf} \cdot K_{g_pf}} \right) - 1 \right)^{0,83} = 0,2149$$

Lülitusimpulsi kujutegur juhe- masti konstruktsioon

$$K_{g_sf} := 1,45$$

Juhe - masti konstruktsioon

$$K_{g_pf} := 1,35 \cdot K_{g_sf} - 0,35 \cdot K_{g_sf}^2 = 1,2216$$

Vähim õhkvaemik faasi ja maa vahel: juhe - masti konstruktsioon

$$D_{50Hz_p_e} := \left(1,642 \cdot \exp \left(\frac{U_s}{750 \cdot \sqrt{3} \cdot k_a \cdot K_{z_pf} \cdot K_{g_pf}} \right) - 1 \right)^{0,83} = 0,2025$$

Lülitusimpulsi kujutegur juhe-juhe

$$K_{g_sf} := 1,60$$

Vähim õhkvaemik faaside vahel võrgusageduspingel

$$D_{50Hz_p_p} := 1,642 \cdot \exp \left(\frac{U_s}{750 \cdot k_a \cdot K_{z_pf} \cdot K_{g_pf}} \right) - 1 \right)^{0,83} = 0,3568$$

Joonis 2.2 Arvutuskäik vähimate õhkvaemike leidmiseks võrgusageduspingete korral

Tabel 2.3 Faasi ja maa vaheliste õhkvahemike väärtused võrgusageduspingetel

Võrgusageduspinged			
Faasi ja maavahel $D_{50\text{Hz}_p_e}$			
Õhkvahemiku tüüp	Konfiguratsioon	Ümardatud väärtus, m	Kujuteguri k_a väärtus
Välisõhkvahemik	Juhe ja liiniväline objekt	0,21	1,30
Siseõhkvahemik	Juhe – masti aken	0,21	1,25
	Juhe – masti konstruktsioon	0,21	1,45

Tabel 2.4 – Faaside vaheline vähim õhkvahemik võrgusageduspingetel

Võrgusageduspinged			
Faaside vahel $D_{50\text{Hz}_p_p}$			
Õhkvahemiku tüüp	Konfiguratsioon	Ümardatud väärtus, m	Kujuteguri k_a väärtus
Siseõhkvahemik	Juhe-juhe	0,36	1,60

2.3 Visangukesksete õhkvahemike arvutamine

Visangukesksed õhkvahemikud on arvatud eelmises peatükis esitatud valem 1.13 ja valemi 1.14 kohaselt. Kandekettide kõrvalekaldeks on kasutatud tabelarvutusprogrammi, mis arvutab nõuetekohaselt kandekettide maksimaalsed kõrvalekalded. Järgnevalt on esitatud õhuliini Tartu – Reola masti nr 54 isolaatorkettide kõrvalekalded. Kõrvalekalded on esitatud kolmel koormusjuhtumil, juhtme maksimaalsel temperatuuril, piirtuulekoormusel ja nimituulekoormusel. Tulemustest on näha, et suurim kõrvalekalde nurk on piirtuulekoormusel, kus kaldenurgaks on 32° ja nimituulekoormusel on kaldenurk 20° . Arvutustes kasutatud lähteandmed on toodud tabelis 2.5 ja isolaatorketi kõrvalekalde arvutuseleht on esitatud Lisas 1.

Tabel 2.5 Isolaatorketi kõrvalekalde arvutuse kliima lähteandmed

Nimetus	Väärtus	Ühik
Kliima		
Tuulekiirus	21	m/s
Jäite paksus	10	mm
Kõrgus	15	m
Tuulerõhk	313	N/m ²

Tabel 2.6 Isolaatorketi kõrvalekalde arvutuse juhtme, liini, masti ja mastitarvikute lähteandmed

Juhe		
Nimetus	Väärtus	Ühik
Juhtme mark	242-AI1/39-ST1A Hawk	
Ristlõige	280,84	mm ²
Diameeter	21,77	mm
Elastusmoodul	76000	MPa
Temperatuuritegur	0,000019	
Erikoormus omakaalust	0,0339	N/mm ²
Montaaži elastusmoodul	60000	MPa
Katkemistugevus	87,98	kN
Osajuhtmete arv faasis	1	
Liin, mast ja isolaatorid		
Masti nr	54	
Masti tüüp	Raudbetoon tüvega kandemast	
Isolaatorketi kaal	50	kg
Kaaluvisangu pikkus	242	m
Tuulevisangu pikkus	249,5	m
Taandatud visangu pikkus	245	m

Kokkuvõtte arvutuse tulemustest on esitatud all olevas tabelis 2.7.

Tabel 2.7 Isolaatorkettide kõrvalekalde arvutuse tulemused

Koormusjuhtum	Piirtuulekoormus	Nimituulekoormus	Maksimaalne juhtme temperatuur
Temperatuur	15°C	15°C	80°C
Tuul	313 N/mm ²	159 N/mm ²	0
Jäide	0 mm	0 mm	0 mm
Keti kõrvalekaldenurk	32°	20°	0°

Juhtmete omavaheliste minimaalsed kaugused visangu keskel on arvatud Smath Studio 0.99 programmiga ja arvutuskäik koos lähteandmetega on esitatud joonisel 2.3

Arvutatud faasidevaheline nõutav vähim õhkvahemik

$$D_{pp} := 1,15$$

Õhkvahemiku vähendustegur

$$k_1 := 0,7$$

Arvutatud faas-maa nõutav vähim õhkvahemik

$$D_{e1} := 1,00$$

Isolaatorketi pikkus mis võib tuulega kõrvale kalduda

$$l_k := 1,6$$

Faasijuhtme riipe temperatuuril +40

$$f := 6$$

Koefitsendi k väärtus faasijuhtmetele 1 ja 2 vastavalt tabelile 5

$$k := 0,60$$

Kaugus faasijuhtme 1 ja faasijuhtme 2 vahel visangus

$$k \cdot \sqrt{f + l_k} + k_1 \cdot D_{pp} = 2,4591$$

Koefitsendi k väärtus faasijuhtmetele 2 ja 3 vastavalt tabelile 5

$$k := 0,62$$

Kaugus faasijuhte 2 ja faasijuhte 3 vahel visangus

$$k \cdot \sqrt{f + l_k} + k_1 \cdot D_{pp} = 2,5142$$

Koefitsendi k väärtus faasijuhtmetele 1 ja 3 vastavalt tabelile 5

$$k := 0,62$$

Kaugus faasijuhte 1 ja faasijuhte 3 vahel visangus

$$k \cdot \sqrt{f + l_k} + k_1 \cdot D_{pp} = 2,5142$$

Koefitsendi k väärtus faasijuhtmele 3 ja piksekaitsetrossile vastavalt tabelile 5

$$k := 0,70$$

Faasijuhtme 3 ja piksekaitse trossi kaugus visangus

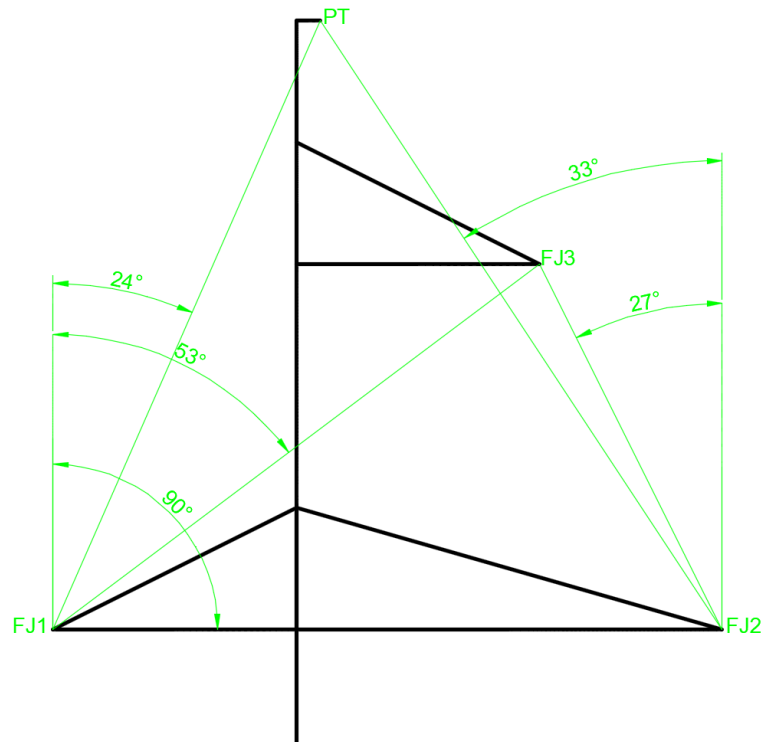
$$k \cdot \sqrt{f + l_k} + k_1 \cdot D_{e1} = 2,6298$$

Joonis 2.3 Vähimate visangukesksete õhkvahemike arvutus koos tulemustega

Tabel 2.7 Faasijuhtmete omavahelised kaugused visangu keskel

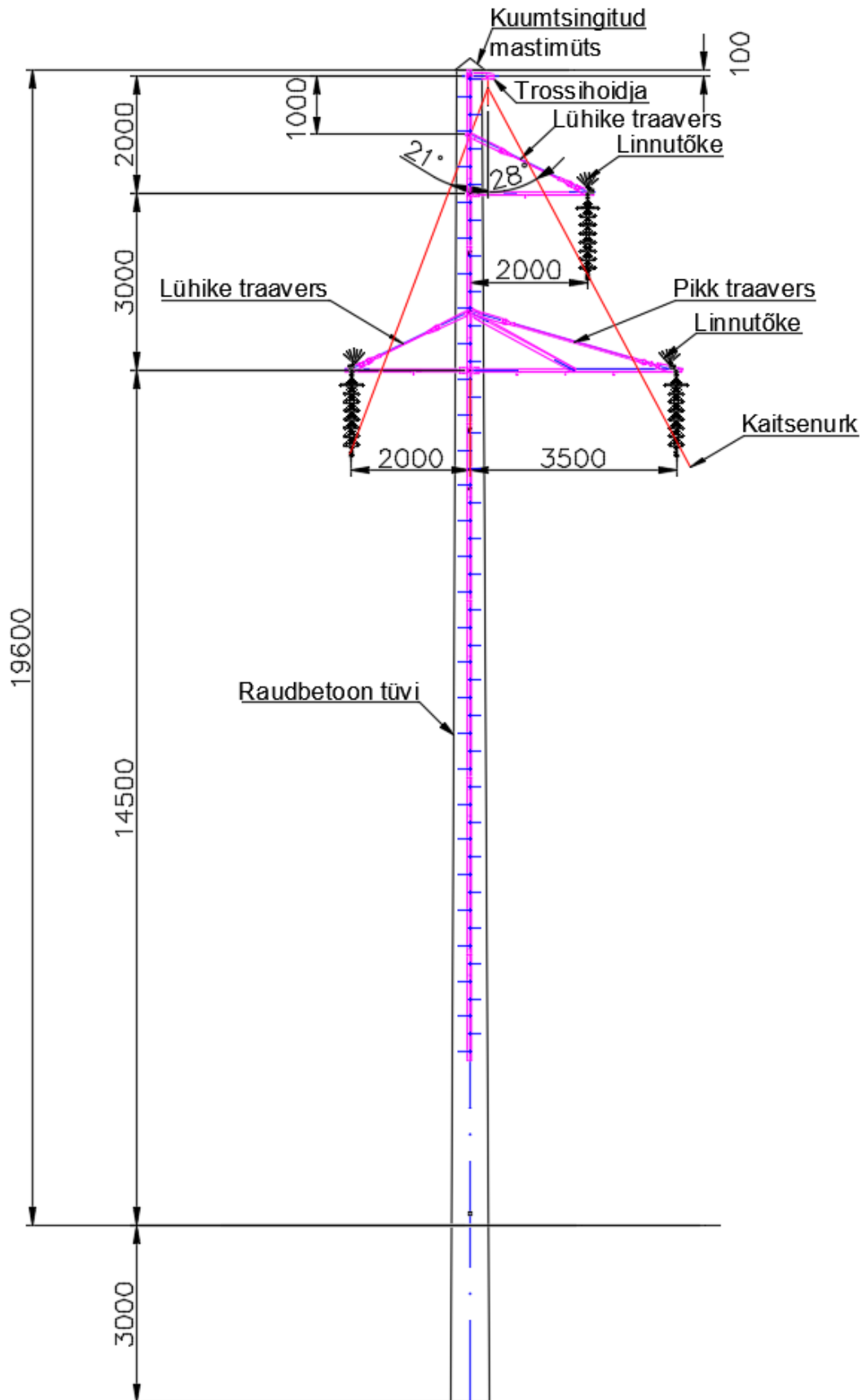
Minimaalne õhkvahemik juhtmete vahel visangu keskel					
Kirjeldus	Parameeter k_c	Parameeter k_1	Riipe +40°, m	Isolaatorketi pikkus, m	Minimaalne õhkvahemik, m
FJ1-FJ2	0,60	0,70	6,0	1,6	2,46
FJ2-FJ3	0,62		6,0	1,6	2,51
FJ1-FJ3	0,62		6,0	1,6	2,51
FJ3-PT	0,70	0,70	5,0	1,6	2,63

Joonis .4 kujutab raudbetoon kandemasti ülemise otsa tüüpilist skeemi, kuhu on peale märgitud faasijuhtmete kinnituspunktide ja piksekaitsetrossi vahelised nurgad, mille abil määratakse koefitsienti k_c väärtused. FJ1, FJ2, FJ3 tähistavad faasijuhtmeid ja PT tähistab piksekaitsetrossi.



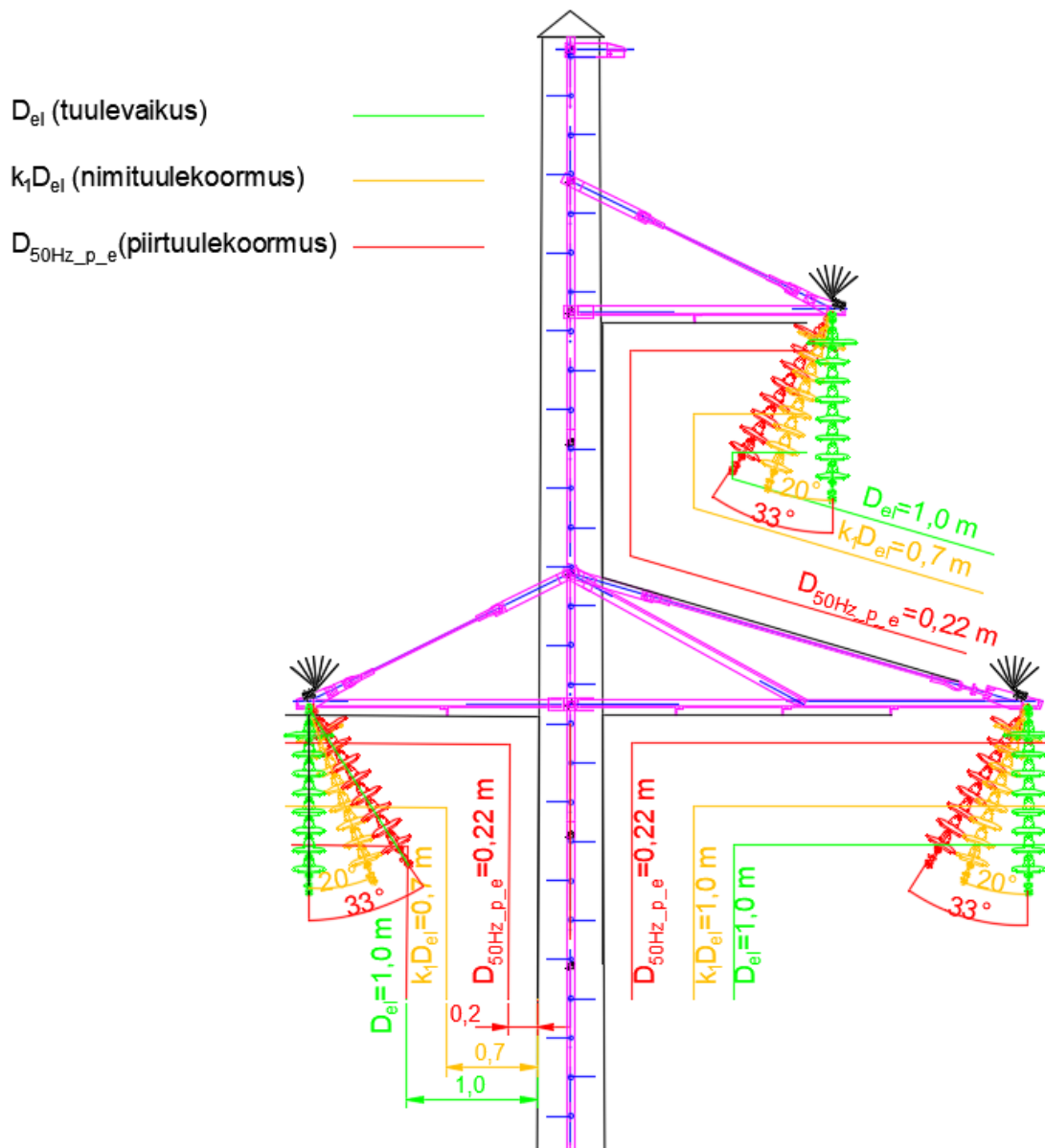
Joonis 2.4 –Faasijuhtmete ja piksekaitsetrosside vahelised nurgad

Joonisel 2.5 on esitatud raudbetoonkandemasti põhijoonis koos traaversite, piksekaitsetrossi kinnituse, kandekettidega ning muude vajalike liini ja mastitarvikutega.



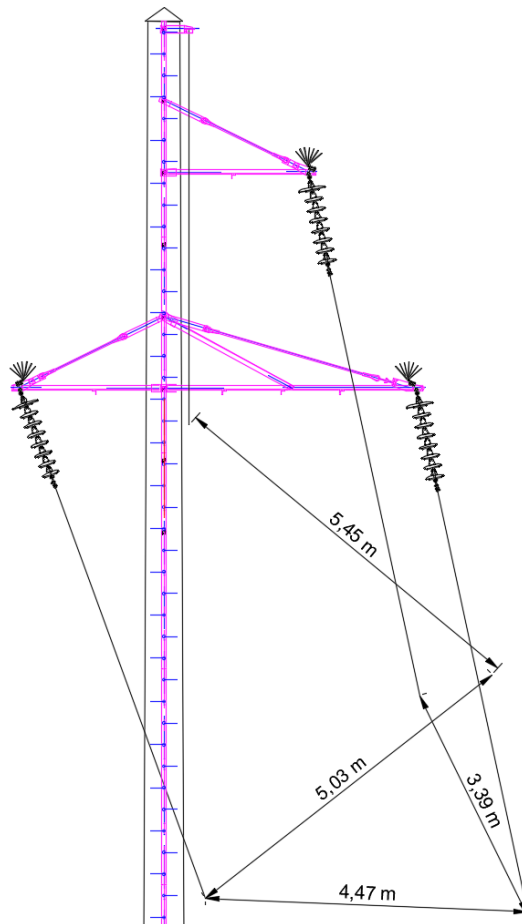
Joonis 2.5 – Raudbetoon kandemast põhimõõtudega

Joonisel 2.6 on esitatud raudbetoon kandemasti põhijoonis, kuhu on kantud peale vähimad arvutatud nõutavate õhkvaheemike ümardatud väärtused.



Joonis 2.6 - Raudbetoon kandemasti ülemise otsa õhkvaheemikud

Joonisele 2.7 on kantud juhtmed ja esitatud visangukesksed õhkvaheemikud. Visangukesksete õhkvaheemike määramisel on arvestatud koormusjuhtumiga, kus ühele faasijuhtmele mõjuv dünaamiline tuulesurve erineb 40% võrra. Faasijuhtmete joonisel riipe on 6,0 m ja piksekaitsetrossi riipe 5,0 m. Vasakpoolne faasijuhe on kõrvalekaldunud 20° ja parempoolsed 12°. [3]



Joonis 2.7 – Raudbetoonkandemasti visangukesksed õhkvahemikud

Joonisel 2.7 on näha, et minimaalseid lubatavaid õhkvahemike, mille miinimum väärtus vastavalt tabelis 2.7 toodud arvutuste tulemusele on 2,51 m ei ületata ühegi faasijuhtme, ega faasijuhtme ning piksekaitsetrossi vahelist 2,63 m.

2.4 Ronimisõhkvahemikud

Elering AS dokument „701 Projekteerimine“ nõuab, et liini projekteerimisel peavad olema tagatud ohutud teenidusvahemikud pingevaluste tööde teostamiseks. 110 kV liinidel tuleb lähtuda *hot-stick* meetodist. [6] Pingevaluste töötsooni määramisel arvestatakse ainult lülitusliigpingetega, välgust tulenevate ülelöökidega ei arvestata, kuna tööde tegemine on keelatud äikese korral. Pingevaluste tööde korral, määratakse ohutu teenindamisvahemik lähtuvalt lülitamis liigpingest ja väljendatakse valemiga:

$$D_A = D_U + D_E \quad (2.1)$$

kus, D_U – on elektriline kaugus, sõltuv läbilöögipingest, kV

D_E – on montööri töötegemise laius, m

D_A - ohutu töötegemise kaugus, m [7]

Ohutu vahekaugus määratakse statistiliselt liigpingest, U_{e2} , mille ületamise tõenäosus on 2%.

$$U_{e2} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U_s \quad (2.2)$$

kus U_{e2} – statistiline liigpinge mille ületamistõenäosus on 2%, kV

U_s - võrgu suurim pinge, kV

u_{e2} – statistiline faas-maa liigpinge väljendatud ühiku kaudu, kV

Minimaalse vahemiku arvutamiseks on vaja teada talvuspinget, mida isolatsioon 90% tõenäosusega talub:

$$U_{90} = K \cdot U_2 \quad (2.3)$$

Eelnevad kaks valemit kokku pannes, saadakse

$$U_{e90} = K \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U_s \cdot u_{e2} \quad (2.4)$$

kus, U_{e90} – statistiline faas-maa talvuspinge

u_{e2} – kuna faas-mast on risk, siis $u_{e2}=2,2$

K – statistiline turvalisustegur, väärtus 1,0...1,1.

Vahemik D_U , m arvutatakse vastavalt valemile:

$$D_U = 2,17 \cdot \left(\exp \left(\frac{U_{90}}{1080 \cdot K_s \cdot K_g \cdot K_f \cdot K_a \cdot K_i} \right) - 1 \right) \quad (2.5)$$

kus K_s – konventsionaalne hälbetegur

K_g – sädemikutegur

K_f – ujuva objekti tegur

K_a – atmosfääritegur

K_i – purunenud isolaatori tegur [7]

Arvutus on läbi viidud Smath 0.99 arvutiprogrammis. Tulemusena on saadud pingealuste tööde minimaalseks õhkvahemikuks 0,9 m, millele on lisatud montööri laius 1,0 m. Kuna õhuliini ehitus peab võimaldama teha remonttöid pinges liinil, siis montöörile mugavaks ja turvaliseks liikumiseks mastil tuleb mastid varustada turvaredelitega, mis algavad maapinnast 3 m kõrguselt ja ulatuvad masti tipuni. Joonisel 2.8 on esitatud raudbetoon kandemast koos redeliga ja joonisel on märgitud ohutud masti teenindusvahemikud. Arvutused koos seletusega ja lähteandmetega on joonisel 2.8

Võrgu suurim pinge

$$U_s := 123$$

Põhiisolaatorite ehituspikkus

$$L_{ins1} := 0,127$$

Esimese isolaatori ehituspikkus

$$L_{ins2} := 0,146$$

Põhiisolaatorite

$$L_{insq1} := 8$$

Esimese laia taldriku arv

$$L_{insq2} := 1$$

Isolaatorite kogupikkus

$$L_t := (L_{ins1} \cdot L_{insq1}) + (L_{ins2} \cdot L_{insq2}) = 1,162$$

katkiste isolaatorite kogupikkus

$$L_k := 0 \cdot 0,127 = 0$$

Statistiline turvalisus tegur, väärtus 1,0...1,1

$$K_s := 1,0$$

Statistilise 2% liigpinge ühikväärtus

$$u_{e2} := 2,2$$

isolatsiooni 90% taluvuspinge

$$U_{90} := K_s \cdot \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \right) \cdot U_s \cdot u_{e2} = 220,944$$

sädevahemikutegur, faas-maa=1,2, faas-faas=1,45, EVS_EN 61472, 4.3.2.2

$$k_g := 1,2$$

statistiline hälbetegur, EVS_EN 61472, 4.3.2.1

$$k_s := 0,936$$

atmosfääritegur EVS_EN 61472, 4.3.2.3

$$k_a := 1$$

hõljuva juhtiva objekti faktor EVS_EN 61472, 4.3.2.4

$$k_f := 1$$

katkise isolaatori tegur EVS_EN 61472, 4.3.2.5

$$k_i := 1 - 0,8 \cdot 1 \cdot \left(\frac{L_k}{L_t} \right) = 1$$

Õhkvahemik DU

$$D_U := 2,17 \cdot \left(\exp \left(\frac{U_{90}}{1080 \cdot k_s \cdot k_g \cdot k_f \cdot k_a \cdot k_i} \right) - 1 \right) = 0,4335$$

Õhkvahemik DE, olenevalt montööri väljaõppest 0,2 kuni 1 m

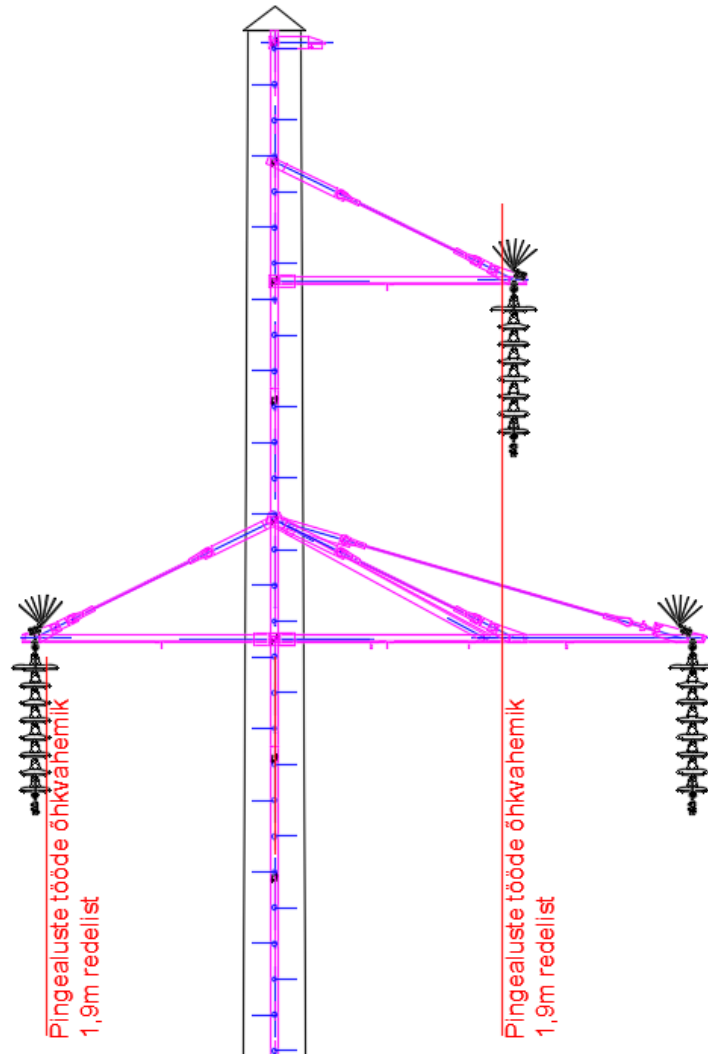
$$D_E := 0,5$$

Ronimisõhkvahemik

$$D_A := D_U + D_E = 0,93$$

Joonis 2.8 Ronimisõhkvahemiku arvutuskäik koos tulemustega

Joonisele 2.9 on kantud peale raudbetoon kandemasti ülemine ots, koos traaverse, isolaatorkettide ja ronimisredeliga. Joonisele on märgitud arvutuste teel saadud pingeluste tööde õhkvaheemik 0,9 m millele on lisatud montööri laius 1 m.



Joonis 2.9 Pingealuste tööde õhkvaheemik kandemastis

3. TARTU – REOLA – MAARITSA ÕHULIINI ÄIKESEKINDLUSE NIVOOD

Õhuliini projekteerimisel üks tähtis aspekt mis on seotud masti geomeetriaga on õhuliinide äikesekindlus. Üldiselt antakse äikesekindluse projekti erinõuetega või tuuakse välja tehnilises dokumentatsioonis. Õhuliini välgukindlust iseloomustatakse:

- a) Läbimurdest isolatsiooni ülelöövide määraga, ehk SFFOR(*shielding flashover rate*);
- b) Vastassuunalisi ülelöövide määraga, ehk BFR (*back flashover rate*),

Mõlemad väärtused mõõdetakse 100 kilomeetri liini kohta aastas. Punktis 3.3 on antud mõisted laiemalt lahti seletatud. [8]

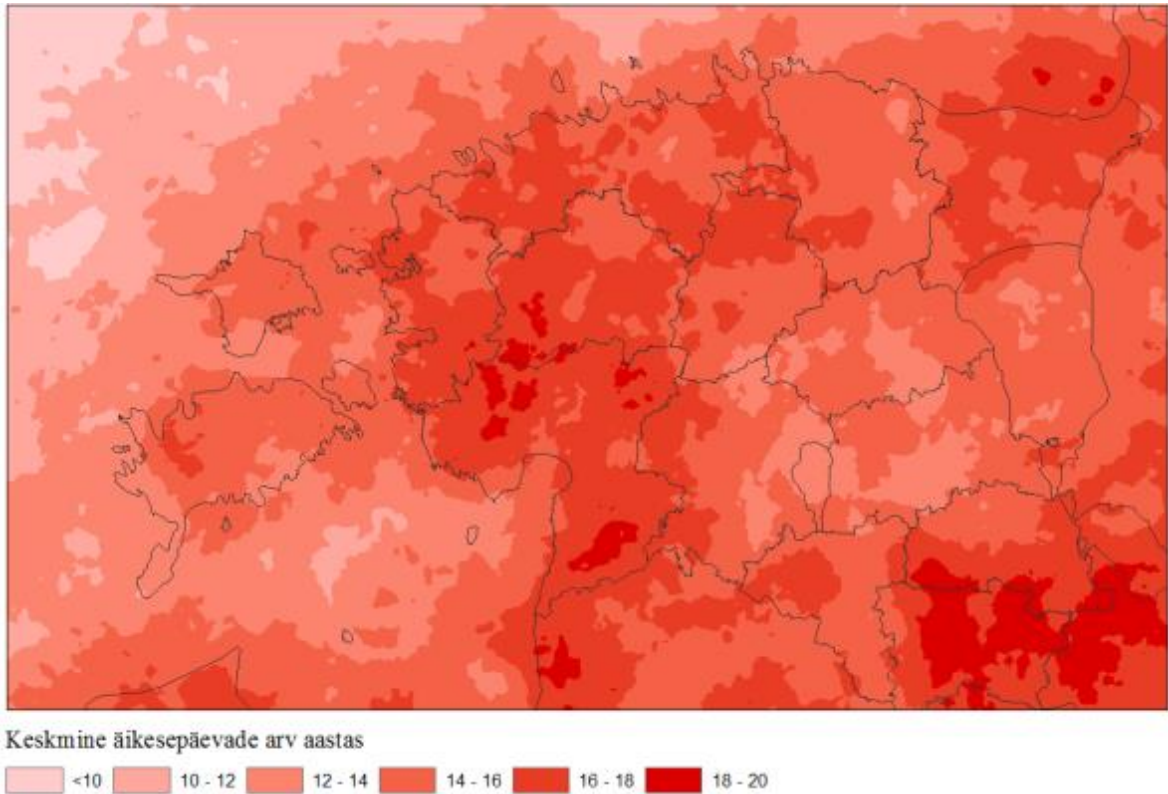
3.1 Äike Eestis

Üheks põhiliseks välgu iseloomustamise parameetriks on välgulöövide tabamuse arv ühe ruutkilomeetri kohta aastas, so N_g [1/km²a]. Välgu tiheduse hindamiseks kasutatakse välgulöögi loendureid (*lighting flash counter*) ja välgulöögi tuvastussüsteeme(*lighting location system*). Info Eestis esinevate pilv-maa välkude kohta on olemas aastast 2005, mis põhineb NORDLIS äikesedetektorite võrgustiku poolt kogutaval andmestikul. NORDLIS äikesedetektorite võrgustik katab Norra, Rootsi, Soome, Eesti ja Leedu. [1] [9]



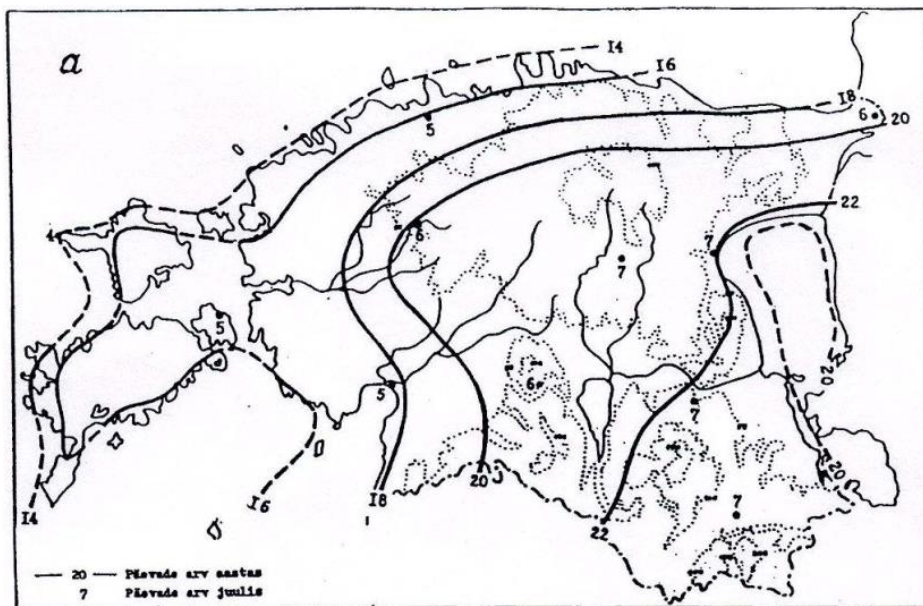
Joonis 3.1 NORDLIS äikesedetektorite sensorite asukohad märts 2013 seisuga ja võrgustiku liikmesriigid

Perioodil 2005-2013 oli NORDLIS andmete põhjal Eestis keskmiselt 8-20 äikesepäeva aastas. Antud arv jääb alla tavapäraselt projekteerimisel kasutatud ENSV kliimaatlase äikesepäevade kaardil toodud äiksepäevade arvule 14-22 päeva aastas. [9]



Joonis 3.2 Keskmine äiksepäevade arv aastas perioodil 2005-2013 [9]

Võrdlusena on toodud ka ENSV kliimaatlase äikesepäevade kaart.



Joonis 3.3 ENSV kliimaatlase äiksepäevade kaart

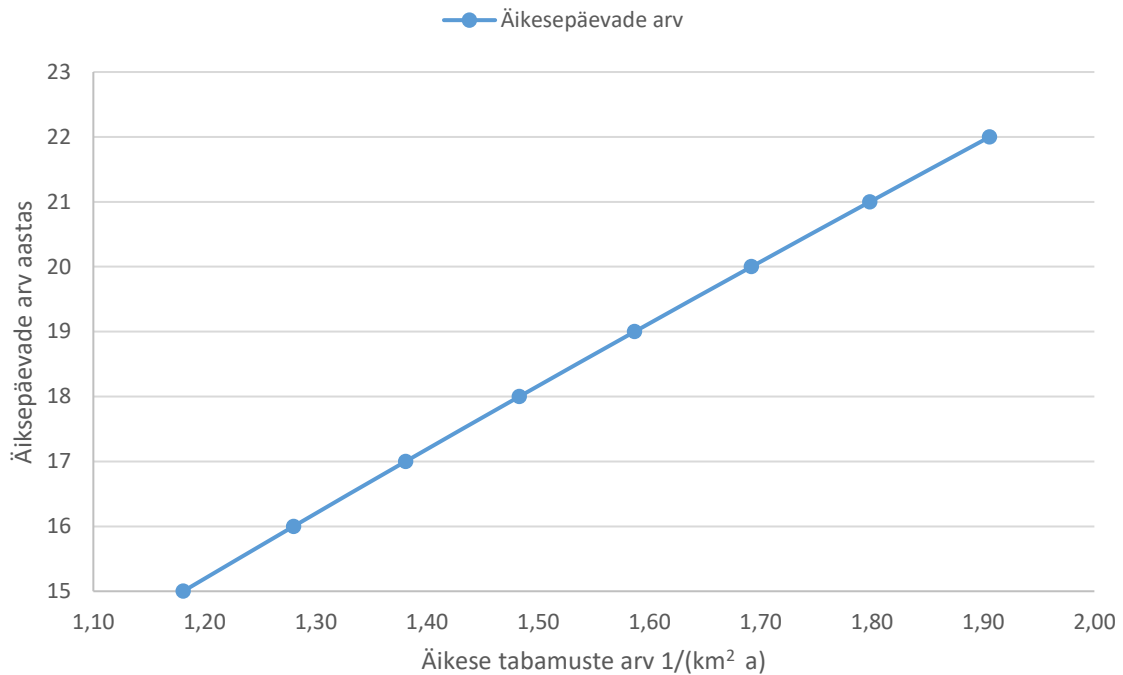
Äikesepäevade arvu on vajalik teada, leidmaks välgu tabamistihedust ühe ruutkilomeetri kohta, selleks kasutatakse käesolevas töös IEEE, Cigre ja IEC poolt heaks kiidetud A.J. Eriksson'i valemit:

$$N_g = 0,04 \cdot N_k^{1,25} \quad (3.1)$$

kus, N_g – välgu tabamistihedus ühe ruutkilomeetri kohta

N_k – äikesepäevade arv aastas [1] [8]

Äikesepäevade arvu ja välgu tabamistiheduse sõltuvus on esitatud joonisel 3.4.

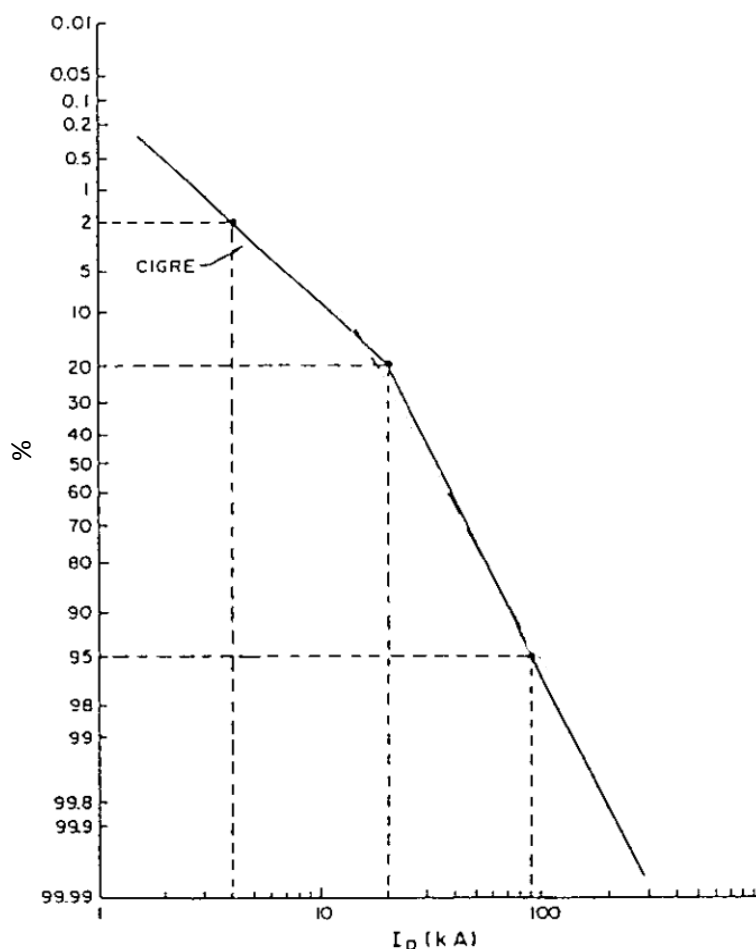


Joonis 3.4 - äiksepäevade arvu ja äikese tabamuse arvu vaheline seos

Graafikul on näha, et välgulöökide tabamuste arv ühe ruutkilomeetri kohta jääb vahemikku 1,12 kuni 1,91 lööki ruutkilomeetrile. NORDLIS andmete põhjal, oli perioodil 2005-2013 keskmine pilv-maa välgulöökide arv 0,41 lööki ruutkilomeetri kohta (9 aasta keskmine). Arvestades, et tulemus 0,41 lööki ruutkilomeetrile, on ka juba vähemalt 6 aastat vana tulemus, siis oleks vajalik võimalusel läbi viia uus piksekaitse uuring, et näha kuhu suunas on see arv liikunud. [9]

3.2 Äikese parameetrid

Õhuliinide välgukindluse nivoode arvutamisel on üheks olulisemaks parameetriks välguvoolutugevus. Sisuliselt, kõik rahvusvahelised välgukindluse standardid ja juhendid sisaldavad välguvoolu tippväärtuste keskmist logaritmilist jaotust. See jaotus põhineb aastatel 1963 kuni 1971 Šveitsis mõõdetud välguvooludel. Alljärgneval joonisel on esitatud esmaste negatiivsete välguvoolude tugevused ja nende esinemistõenäosused.



Joonis 3.5 - Välguvoolu tippväärtuste logaritmiline jaotus

Tabel 3.1 – Maksimaalsete välguvoolude jaotus

Välguvoolu maksimaalne väärtus kA	5	10	20	40	60	80	100
Tõenäosus % et välgulöök ületab väärtuse	99	95	76	34	15	7,8	4,5

Piksekaitse arvutustes arvestatakse esmase negatiivse välgulöögiga kuna järgnevate välgulöökide voolud on oluliselt väiksemad. [1] [8]

3.3 Õhuliinide piksekaitse põhimõtted

Välgulöögid võivad põhjustada isolatsiooni ülelööke, kui need tabavad faasijuhtmeid või piksekaitsetrossi. Välgulöögid, mis tabavad maapinda õhuliinid lähedal on ohtlikud madal- ja keskpingeliinidele, sest enamus indutseeritud pinge mõõtmisi jäävad alla 300 kV, arvestades, et projekteeritaval 110 kV õhuliinil on isolaatorketi impulsspingetaluvus 550 kV, siis välgulöögid 110 kV õhuliini lähedal ei ole sellele probleemiks. Piksekaitse seisukohast on kriitilised olukorrad välguotselöögid juhtmesse ja välguotselöögid masti. Kui välk lööb juhtmesse, siis tekib juhtmes kõrge impulsi liigpinge juhtme ja masti vahel, faasijuhtmete vahel või faasijuhtme ja maa vahel, need liigpinged võivad tekitada ülelööke õhuliinil. Kuna isolaatorketid on enamasti kõige väiksema impulsitaluvusega komponendid liinil, siis suurima tõenäosusega tekib ülelööök isolaatorketil. Vähendamaks välguotselööke juhtmetesse, varustatakse õhuliinid piksekaitsetrossidega, millede arvu ja paiknemise määramiseks tuleb läbi viia äikesekindluse analüüs. [1]

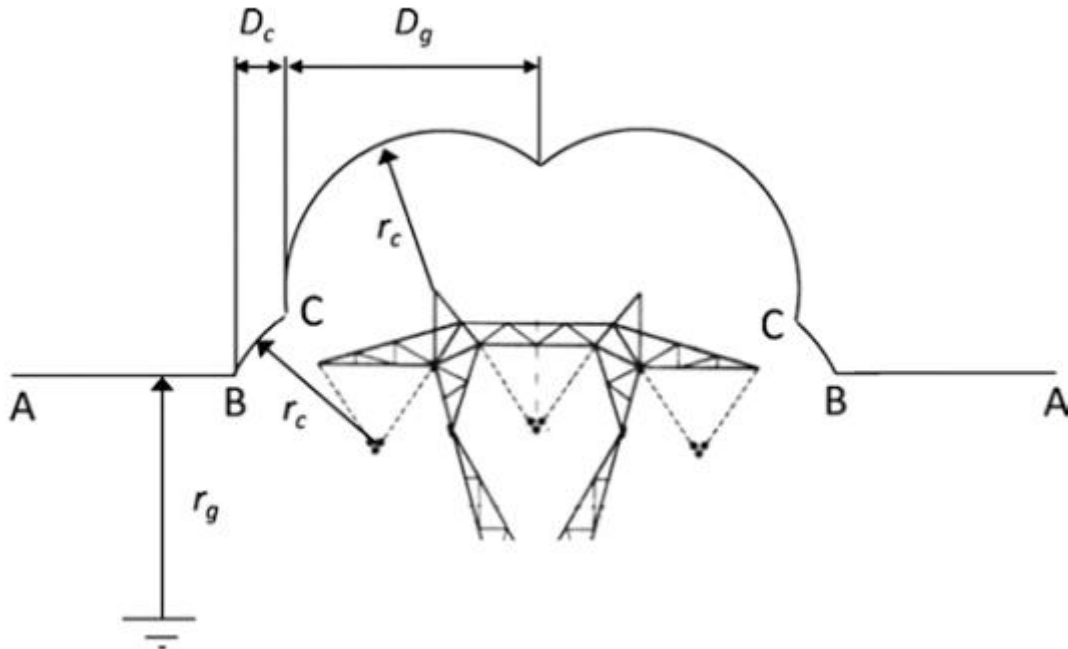
Välgulöögist masti või piksekaitsetrossi alguse saanud liigpinget iseloomustatakse kui vastassuunalist ülelööki. Välgulöögi tagajärjel tekib kõrge impulsi liigpinge mis võib ületada isolaatorketi impulsstaluvuspinget, siis tekib vastassuunaline ülelööök õhuliini maandatud osalt elektrilisele osale, näiteks siis piksekaitsetrossilt või mastilt faasijuhtmele. Vähendamaks ülelöögi toimumise tõenäosust vastuvõetavale tasemele, tuleb projekteerimisfaasis hinnata sobiliku maandussüsteemi rajamist. Välgukindluse vaatevinklist tuleb hinnata maandussüsteemi toimimiseks vajaliku maandustakistuse suurust arvestades nii madalsageduslike takistuste kui ka impulsstakistustega. See tähendab, et masti maanduskiirte pikendamine üle kriitilise piiri ei vähenda enam piksekaitse efektiivsuse seisukohast kriitilist impulsstakistust, hoolimata sellest, et madalsageduslik takistus väheneb. Asukohtades, kus on suured pinnase eritakistused, näiteks liiv ja kivimid, ning suur välgutihedus, on teinekord vajalik arvutuste kohaselt väga väiksest maandustakistuse väärtust, mis võib osutada tehniliselt ja majanduslikult väga kalliks, sellisel juhul on parimaks lahenduseks liigpingepiirikute paigaldamine õhuliinile. [1]

Käesolevas töös on täpsemalt vaatluse all läbimurdest põhjustatud isolatsiooni ülelöögid.

3.4 Läbimurdest isolatsiooni ülelöögi määra arvutamine, SFFOR

Välgu tabamisel faasijuhet õhuliinil, millel on paigaldatud üks või mitu piksekaitsetrossi nimetatakse läbimurdeks piksekaitsetrossist. Kui pärast sellist välgutabamist faasijuhtmesse tekib ülelööök faasijuhtmelt masti maandatud osale või ülelööök üle isolaatorketi sädevahemiku, nimetatakse seda olukorda läbimurdest isolatsiooni ülelöögiks.

Läbimurdest isolatsiooni ülelöögi arvutamisel kasutavad nii Cigre kui IEEE elektromeetrilist mudelit. Elektromeetriline mudel arvestab allasuunatud välgu liidri lähenemisel maapinnale, et satub see piirkonda, kus järgmine hüpe toimub kas maapinnale või piksekaitsetrossi. Elektromeetrilisel mudelil iseloomustatakse välgulöögi tabamiskaugust.



Joonis 3.6 – Elektromeetriline mudel, kus r_g – välgulöögi tabamiskaugus maapinnani, r_c – välgulöögi tabamiskaugus faasisuhtmeni, D_c - piirkond kus tekib läbilöök faasisuhtmesse, D_g - piirkond kus välgulöök tabab piksekaitsetrossi.

Tabamiskauguste määramiseks kasutatakse järgnevaid valemeid:

$$r_c = 10 \cdot I^{0,65}, \text{ m} \quad (3.2)$$

ja alla 40 m mastidel

$$r_g = [3,6 + 1,7 \ln(43 - y_c)] \cdot I^{0,65}, \text{ m} \quad (3.3)$$

kus I – välguvool, kA

y_c – juhtme keskmine kõrgus mastil, lahutatud 2/3 rippest, m

Minimaalse liigpinge väärtust, mis üldse ülelöögi tekitab arvutatakse IEEE kohaselt valemiga

$$I_c = \frac{2 \cdot CFO}{Z_{surge}} \quad (3.4)$$

kus I_c – kriitiline vool, mille korral toimub ülelöök, kA

CFO – kriitiline ülelöögi pinge, kV

Z_{surge} – juhtme lainetakistus koroona, Ω

Faasijuhtme lainetakistus koroona leitakse:

$$Z_{surge} = 60 \sqrt{\ln\left(\frac{2h}{r}\right) \ln\left(\frac{2h}{R_c}\right)} \quad (3.5)$$

kus, h – juhtme keskmine kõrgus, m

r – juhtme raadius, m

R_c = juhtme koroona raadius 1500 kV/m gradiendi juures, m

IEEE ja Cigre kasutavad läbimurdest isolatsiooni ülelöövide määra arvutamiseks mõlemad valemit:

$$SFFOR = 2 \cdot N_g \cdot L \int_{I_c}^{I_{max}} D_c(I) \cdot f(I) dI \quad (3.6)$$

kus, SFFOR – läbimurdest isolatsiooni ülelööke, ülelööke/100 km/aastas

L – liini pikkus, km

$D_c(I)$ – faasijuhtme kaitseta olemise pikkus, arvutatakse I funktsioonina, m

$f(i)$ – Voolu I statistiline jaotus

I_{max} – maksimaalne vool mis saab faasijuhet tabada, kA.

Eelmisest valemist on näha, et on võimalus nn ideaalsele kaitseenergale, st kaitseurk mille korral $I_{max}=I_c$, antud valem kehtib ainult välgu esmaste löökide korral.

$$\alpha_p = 0,5 \left[\sin^{-1} \left(\frac{r_g - h}{r_c} \right) + \sin^{-1} \left(\frac{r_g - y}{r_c} \right) \right] \quad (3.7)$$

kus, r_g ja r_c on arvatud voolule I_c

h – keskmine piksekaitsetrossi kõrgus, m

y – keskmine faasijuhtme kõrgus, m

Liini planeerides peab esitama nõutava äiksekindlusenivoo, nõudes liiga väikest äiksekindlusenivoo väärtust, võib lahendus olla majanduslikult liiga kallis. Cigre soovib väga tähtsatel liinidel kasutada äiksekindluse nivood 0,05. Tavapraktikas kasutatakse äiksekindlusenivood väärtusega 0,1 kuni 0,2. Eestis on aastast 2017 uutel ehitavatel põhivõrgu liinidel nõutav äiksekindlusenivood järgnevad.

330 kV – 0,05 lööki/100km liini kohta/aastas

110 kV – 0,10 lööki/100km liini kohta/aastas

Lisaks võib neid väärtuseid muuta projekti erinõuetega. [1] [6]

Olemasolevatel 110 kV liinidel peab ehitusaegsete nõuete järgi olema kaitsenurk alla 30°. Raudbetoon tüvega üheaheelalise kandemasti kaitsenurgad on vastavalt 21° ja 28°. Eelnevalt kirjeldatud arvutuskäik on koos vajalike parameetritega kokku pandud *IEEE Lighting Performance of Overhead Lines Working Group*i poolt koostatud arvutiprogrammi IEEE Flash. Sisestades antud programmi parameetrid:

- visangu pikkus, m;
- välgutihedus ruutkilomeetri kohta, lööke/km²
- juhtme diameeter, mm
- juhtme ripe, m
- piksekaitsetrossi diameeter, mm
- piksekaitsetrossi ripe, m
- õhuliini masti geomeetria XY koordinaat süsteemis

Arvutab programm ideaalse kaitsenurga, mis on konkreetsel juhul 1 ja 2 faasijuhtmele 26,75° ja faasijuhtmele 3 21,97°. Lisaks arvutatakse läbimurdest isolatsiooni ülelöökide arv 100 km/a, mis konkreetsel liinil on 0,01.

Tabel 3.1 Läbimurdest isolatsiooni ülelöökide arvutus.

Tartu - Reola - Maaritsa													
Välgu tihedus, lööke km ²	1.91												
Visangupikkus, m	250												
JUHTMED													
Diameeter, mm	22												
Ripe, m	6												
Osajuhtmete arv faasis	1												
Isolaatorketi pikkus, m	1,45												
		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Masti geomeetria-juhtmed</th> </tr> <tr> <th>X, m</th> <th>Y, m</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>-2</td> <td>14.5</td> </tr> <tr> <td>3.5</td> <td>14.5</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>17.5</td> </tr> </tbody> </table>		Masti geomeetria-juhtmed		X, m	Y, m	-2	14.5	3.5	14.5	2	17.5
Masti geomeetria-juhtmed													
X, m	Y, m												
-2	14.5												
3.5	14.5												
2	17.5												
		<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Masti geomeetria-piksekaitsetross</th> </tr> <tr> <th>X [m]</th> <th>Y [m]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.3</td> <td>19.6</td> </tr> </tbody> </table>		Masti geomeetria-piksekaitsetross		X [m]	Y [m]	0.3	19.6				
Masti geomeetria-piksekaitsetross													
X [m]	Y [m]												
0.3	19.6												
Piksekaitsetross													
Diameeter [mm]	9												
Ripe[m]	5												
Kaitsenurgad													
Faasijuhe	Piksekaitsetross	Ideaalne	Tegelik										
1	1	26,75	21,74										
2	1	26,75	29,03										
3	1	21,97	31,57										
Välgukindluse nivoo													
Läbimurdest isolatsiooni läbilööke	0,01	/100 km/yr											

Antud arvutuse põhjal võib teha järelduse, et Eestis laialdaselt kasutatud raudbetoon tüvega kandemasti geomeetriat kasutades on tagatud Elering AS dokumendis „701 Projekteerimine“ nõutud läbimurdest isolatsiooni ülelöökide arv 100 km liinipikkuse kohta aastas mis 110 kV liini korral on 0,10.

KOKKUVÕTE

Antud lõputöö ülesandeks oli uurida olemasolevate raudbetoon kandemastide geomeetria ja kuju kasutatavust lähtuvalt elektrilistest nõuetest edasistes õhuliinide rekonstrueerimistes ja uute õhuliinide ehitamisel.

Selleks anti esimeses peatükis ülevaade 110 kV õhuliinile mõjuvatest liigpingetest, anti ülevaade õhuliini isolatsiooni koordineerimisest ja isolatsiooni koordineerimise protseduurist, vajalike vähimate õhkvaheemike arvutamise teooriast.

Teises peatükis, viis autor läbi isolatsiooni koordineerimise protseduuri, määras tüüpliigpinged ja neid arvestades viis läbi arvutused vähimate õhkvaheemike leidmiseks kiire tõusuga liigpingete ja võrgusageduslike liigpingete korral. Lisaks arvutati antud peatükis ohutusvahemikud pinges liinil töötamiseks. Kõik läbiviidud arvutused on läbi viidud kujul, et neid on võimalik tulevikus lihtsalt üle kanda teistele õhuliinidele. Lisaks on kõik arvutustulemused esitatud graafiliselt ja kantud joonistele.

Kolmandas peatükis on antud ülevaade välgust, selle esinemise sagedusest Eestis, lähtuvalt NORDLIS poolt kogutud andmestikul ja selle põhjal läbi viidud uuringust ning tavapäraselt õhuliinide projekteerimisel kasutusel olnud ENSV Kliimaatlase infost. Lisaks on käsitletud välguvoolude maksimaalseid väärtuseid ja nende esinemissageduste tõenäosusi. Kolmanda peatüki tähtis osa on läbimurdest isolatsiooni ülelööride määra arvutamise teooria. Antud teooria põhjal koostatud IEEE FLASH programmiga viis läbi autor läbimurdest isolatsiooni ülelööride määra arvutuse.

Kokkuvõtlikult võib öelda, et Eestis laialdaselt kasutatud raudbetoon kandemastide ülemise otsa geomeetria vastab uuele standardile EVS-EN 50341-1:2013, EVS-EN 50341-2:2018 ja Elering AS tehnilistele nõuetele „701 Projekteerimine“. Tuleb arvestada, et käesolevas töös ei tegeletud mastide mehhaaniliste sobivustega, olenevalt faasisuhtme tüübist või visangute pikkusest võib tekkida olukord, kus olemasolevate masti tüvede tugevused või traaversid ei ole piisavad kandmaks uusi faasisuhtmeid. Lisaks ei ole olemasolevatel kandemastidel enamasti topeltkandekettide jaoks kinnitusi, mis tuleb paigaldada ristumistel raudteedega ja riigimaanteedega. Lähtuvalt topeltkandekettide nõudest ning vähimatest õhkvaheemikest faasisuhtme ja masti vahel on vajalik lühikese traaversi ümber projekteerimine pikemaks topelt-kandeketi kinnituse võrra.

Käesoleva töö edasiarendusena tuleks uurida ja kirjeldada vastassuunaliste ülelööride arvutuskäiku ja määrata vajalik mastide maandustakistus tagamaks nõuetekohast vastassuunaliste

ülelöökide määra. Sealjuures arvestades masti geomeetria ja liini pingega ning välguvoolu jagunemisega masti piksekaitsetrossi ja masti maandurite vahel.

SUMMARY

The aim of this thesis is to examine the use of 110 kV reinforced concrete support tower electrical design according to standards EVS-EN50341-1:2013 and technical literature published by Elering AS „701 Projekteerimine“, for new power lines and reconstruction.

First chapter gives an overview of overvoltage's occurring on high voltage overhead powerlines. The process of insulation coordination is described and the calculation method for calculating the electrical clearances is described.

In second chapter insulation coordination procedure is carried out and the values of overvoltage's are stated. Values for electrical clearances are calculated for fast front overvoltage's and switching overvoltage's. Also safe distances for live work clearances are calculated. All calculations are carried out and their form allows them easily to convert for other powerlines. Also all results are graphically shown.

Third chapter gives an overview of lightning and lightning density in Estonia based on NORDLIS and ENSV Kliimaatlas data. Also lightning peak current distribution is covered. Main part of the third chapter is the theory of calculation for shielding flashover failure rate. Also the calculation for Tartu – Reola – Maaritsa overheadlines shielding failure rate is carried out.

In conclusion, we can say that widely used reinforced concrete support towers' top geometry is suitable for use according to EVS-EN50341-1:2013, EVS-EN50341-2:2018 and Elering AS Document „701 Projekteerimine“. Although it must be taken into account, that this thesis didn't cover the mechanical design of support tower. depending on the type of phase conductor, it might happen that the reinforced concrete tower or cross arms aren't strong enough. Also new technical documents say that railroad or highway crossings must have double insulator strings, old cross arms usually don't have attachments for double insulator strings. Considering the electrical clearances the cross arms should be redesigned for use of double-insulator strings.

Further development of this thesis should study the back flashover rate and the calculation of it. Also the tower foot resistance and grounding system for these kinds of towers should be designed.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] C. G. Books, CIGRE Overhead Lines, 2017.
- [2] Ü. Treufeldt, Kõrgepingetehnika loengukonspekt, Võrgumaterjal, 2010.
- [3] EVS-EN 50341-1:2013 Elektriõhuliinid vahelduvpingega üle 1kV Osa 1: Üldnõuded Ühised eeskirjad, Eesti Standard, 2013.
- [4] Elektriõhuliinid vahelduvpingega üle 1 kV Osa 2-20: Eesti siseriiklikud erinõuded, EVS, 2018.
- [5] Elektrilevi hankedokumentatsioon Tartu-Maaritsa ja rajatava Reola 110/10 kV alajaama vahelise kahe 110 kV õhuliini eelprojekti koostamine, 2018.
- [6] 701 Projekteerimine, Elering AS, 10.03.2017.
- [7] Live working - Minimum approach distances for a.c systems in the voltage range 72,5 kV to 800 kV - A method of calculation, EVS, 2013.
- [8] 063 Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines., Cigre, 1991.
- [9] L. Eiber, Pilv-maa välgulöökide klimatoloogia ja seos tsirkulatsioonitüüpidega Eestis 2005-2013, Tartu, 2014.
- [10] Elektriseadmete ehituse eeskirjad -Üle 1000-V õhuliinid, jaotlad ja alajaamad, Tallinn: Valgus, 1986.

LISAD

Lisa 1 Masti 54 kandekettide kõrvalekalde kontroll

Mastide vahemik

EDS [N/mm ²]	60	Kliima	z0	0,05
			Tuulekiirus	21
			Jäite paksus	10
Masti number	54		Kõrgus	15
Masti tüüp	RBK			
Liini nurk [°]	0	Tuulerõhk		313,04
Armatuuri kaal [kg]	5			
Isolaatorite kaal [kg]	45			
Kaaluviseang [m]	242			
Tuuleviseang [m]	249,5			
Taandatud viseang [m]	245			
Mark	242-A1/39-ST1A Haw			
Ristlõige [mm ²]	280,84			
Diam[mm]	21,77			
Elastsusmoodul [MPa]	76000			
Temperatuuri tegur	1,9e-05			
Erikoormus omakaalust [N/mm ²]	0,0339			
Montaazi elastsusmoodul [MPa]	60000			
Maksimaalne pingsus [N/mm ²]				
RTS kN	87,98			
Osajuhtmete arv	1			

	1	2	3	7	10
Koormusjuhtum	Piirtuul	Tuul	Tmin	EDS	Tmax60
Temperatuur	15	15	-40	5	80
Omakaal	1	1	1	1	1
Jäide	0	0	0	0	0
Tuul	1	0,58	0	0	0
Tuule iil	FALSE	FALSE			

Tõmbejõud

Juhtme tõmme [N]	17 814	16 414	25 500	16 850	10 809
Visangu kaal [N]	2 304	2 304	2 304	2 304	2 304
Vertikaalkoormus [N]	2 549	2 549	2 549	2 549	2 549
Juhtme tõmbe ristkomponent [N]	0	0	0	0	0
Ristjõud tuulest [N]	1 588	921	0	0	0
	1 588	921	0	0	0
	-1 588	-921	0	0	0
Kaldenurgad					
Keti kaldenurk [°]	32	20	0	0	0
+ sisenerga/ - välisnurga poole	-32	-20	0	0	0

Lisa 2 IEEE FLASH programmi arvutusleht

Title
 GFD [per sq km]
 Span [m] English Units Metric Units

Details to Log File:
Log File: c:\ieeeflash\test1\flash1p9.out

Conductors
 Diameter [mm] # Bundled
 Sag [m] Spacing [mm]

Index	X [m]	Y [m]	SI [m]	kV	Angle	AC/DC?
1	-2	14.5	1.45	110	0	ac
2	3.5	14.5	1.45	110	120	ac
3	2	17.5	1.45	110	240	ac
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						

Shield Wires
 Diameter [mm]
 Sag [m]

Index	X [m]	Y [m]
1	0.3	19.6
2		

Index	Conductor	Shield Wire	Shielding Angles		Icrit kA
			Required	Actual	
1	1	1	26,75	21,74	4,48
2	2	1	26,75	29,03	4,48
3	3	1	21,97	31,57	4,28
4					

Tower Model Do Not Edit:
 Height [m] 1 - Cone
 -not used- [m] 2 - H Frame
 Diameter [m] 3 - Cylinder
 -not used- [m] 4 - Waist
 -not used- [m]

Footing Resistances		Flashover Rates	
Percentage (%)	Ohms		/100 km/yr
		0,01	/100 km/yr
			/100 km/yr

Critical Currents	
	kA
	85,490
	84,639
	0,000

Version 2.04 - May 2012