



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**110 KV ISOLAATORKETI ÜLELÖÖGI  
KARAKTERISTIKUD VÄLGUIIMPULSSPINGEL**

**LIGHTNING IMPULSE VOLTAGE FLASHOVER  
CHARACTERISTICS OF 110 KV INSULATOR STRINGS  
BAKALAUREUSETÖÖ**

Üliõpilane: Markus Uppus

Üliõpilaskood: 194060

Juhendajad: Paul Taklaja, vanemlektor  
Ivar Kiitam, teadur  
Risto Rusin, vanemprojekteerija

Tallinn 2023

(Tiitellehe pöördel)

## **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.

“18” mai 2023

Autor: Markus Uppus

/allkirjastatud digitaalselt/

Töö vastab bakalaureusetöö esitatud nõuetele

“18” mai 2023

Juhendajad: Paul Taklaja

Ivar Kiitam

Risto Rusin

/allkirjastatud digitaalselt/

/allkirjastatud digitaalselt/

/allkirjastatud digitaalselt/

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....20..... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina Markus Uppus

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „110 kV isolaatorketi ülelöögi karakteristikud välguimpulsspingel“,

mille juhendajad on Paul Taklaja, Ivar Kiitam ja Risto Rusin

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

18. mai 2023 (kuupäev)

---

<sup>1</sup> Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

## LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Markus Uppus

*Lõputöö liik:* Bakalaureusetöö

*Töö pealkiri:* 110 kV isolaatorketi ülelöögi karakteristikud välguimpulsspingel

*Kuupäev:* 13.05.2023

73 lk

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendajad:* Paul Taklaja, Ivar Kiitam ja Risto Rusin

*Sisu kirjeldus:*

Eesti 110 kV põhivõrgus on kasutusel erinevate isolatsioonitasemetega õhuliinid, mis tuleneb ehituslike nõuete muutumisest ajas. Antud asjaolust tulenevalt püstitati käesoleva töö eesmärgiks välja selgitada erinevate Eesti 110 kV põhivõrgus kasutuses olevate isolaatorkettide liigpingetaluvus.

Lõputöös kirjeldati lähemalt võrgus esinevaid liigpingeid ning isolatsiooni koordineerimise protseduuri. Isolaatorketi liigpingetaluvuse väärtusest tulenevad mastide siseõhkvaheemike väärtused, mille näidisarvutus töös ka teostati.

Tallinna Tehnikaülikooli kõrgepingelaboratoriumis teostati katsetused seitsme erineva konfiguratsiooniga isolaatorketil, mille tulemusena määrati isolaatorkettide liigpingetaluvus.

Katsetulemuste põhiliseks järelduseks on, et kõikide töös esitatud isolaatorkettide liigpingetaluvus on suurem, kui standardi EVS-EN IEC 60071-1:2020 kajastatud 550 kV.

*Märksõnad:* isolaatorkett, kõrgepinge, liigpinged, siseõhkvaheemikud, isolatsiooni koordineerimine.

## ABSTRACT

*Author:* Markus Uppus

*Type of the work:* Bachelor Thesis

*Title:* Lightning Impulse Voltage Flashover Characteristics of 110 kV Insulator Strings

*Date:* 13.05.2023

73 pages

*University:* Tallinn University of Technology

*School:* School of Engineering

*Department:* Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

*Supervisor(s) of the thesis:* Paul Taklaja, Ivar Kiitam and Risto Rusin

*Abstract:*

The 110 kV electricity transmission grid in Estonia has overhead lines with different levels of insulation, which is a result of changing requirements and standards over time. Due to this fact, the aim of this work was to determine the insulation lightning impulse withstand voltage of the different insulator strings used in the Estonian 110 kV transmission grid.

In the thesis, the overvoltages occurring in the transmission grid and the insulation coordination procedure to the following overvoltages were described. The internal clearances of the transmission towers are derived from the value of the insulator string lightning withstand voltage and a sample calculation of these values was carried out.

For determining the lightning impulse withstand voltage the  $U_{50}$  parameter of insulator strings had to be calculated. For that the tests were carried out at the High Voltage Laboratory of Tallinn University of Technology on 7 different configurations of insulator strings, which resulted in the determination of the lightning impulse withstand voltage of the insulator strings.

The main conclusion of the test results is that the lightning impulse withstand voltage of all the insulator strings presented in the thesis is higher than 550 kV as provided in the standard EVS-EN IEC 60071-1:2020.

*Keywords:* insulator string, high voltage, overvoltages, internal clearances, insulation coordination.

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema: **110 kV isolaatorketi ülelöögi karakteristikud välguimpulsspingel**

Lõputöö teema inglise keeles: **Lightning Impulse Voltage Flashover Characteristics of 110 kV Insulator Strings**

Üliõpilane: **Markus Uppus, 194060**

Eriala: **Elektroenergeetika**

Lõputöö liik: **bakalaureusetöö**

Lõputöö juhendajad: **Paul Taklaja, Ivar Kiitam**

Lõputöö kaasjuhendaja: **Risto Rusin**  
(ettevõtte, amet ja kontakt) **(Connecto Eesti AS, vanemprojekteerija, +372 5087870)**

Lõputöö ülesande kehtivusaeg: **kehtivusaja annab juhendaja**  
2022/2023 2023/2024 Sügis

Lõputöö esitamise tähtaeg: **18.05.2023**

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja 1 (allkiri)

---

Juhendaja 2 (allkiri)

---

Juhendaja 3 (allkiri)

---

Õppekava juht (allkiri)

## **1. Teema põhjendus**

Eesti põhivõrgus on kasutusel mitmetel erinevatel konfiguratsioonidel isolaatorkette, millest tulenevalt on ka nende ülelöögikarakteristikud erinevad. 110 kV elektrivõrgus on varasemalt olnud kasutusel peamiselt vertikaalse I-asetusega klaasist dielektrikuga isolaatorketid, milles on 8 standardse profiiliga isolaatorit. Lindude väljaheidetest põhjustatud rikete vähendamiseks paigaldatakse uutele liinidele isolaatorkette, mille ülemine isolaator on lameprofiil kujuga ning alumistest ka suurema diameetriga. Täiendavalt on uute liinide korral kasutusele võetud kaitsesarved mis on mõeldud kaitsma isolaatorkette ja liinijuhtmeid võimalike elektrikaare kahjustuste eest. Mõlemad disaini muudatused mõjutavad liini isolatsiooni impulsspinge taluvust. Kuna isolaatorketi ülelööök põhjustab elektrisüsteemis häiringuid on seda põhjustavate impulsspingete parameetrite uurimine võrgu talitluse mõttes oluline.

## **2. Töö eesmärk**

Töö eesmärgiks on uurida ülelöögikarakteristikuid 110 kV isolaatorketi erinevatel konfiguratsioonidel, et välja selgitada võrgus kasutusel olevate isolaatorkettide impulsspinge taluvused.

## **3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:**

Millised on hetkel põhivõrgus kasutusel olevate isolaatorkettide (erinevate isolaatorprofiilidega, kaare kaitsesarvedega ja ilma kaitsesarvedeta) impulsspinge  $U_{50}$  positiivse ja negatiivse polaarsusega väärtused?

## **4. Lähteandmed**

EVS-EN 50341-1:2013. Elektriõhuliinid vahelduvpingega üle 1 kV. Osa 1: Üldnõuded. Ühised eeskirjad

EVS-EN 50341-2-20:2018. Elektriõhuliinid vahelduvpingega üle 1 kV. Osa 2-20: Eesti siseriiklikud erinõuded (SEN).

Elering AS tehniline dokumentatsioon 700.

„Elektriseadmete Ehituse Eeskiri“ (VI väljaanne 1986. aasta).

## **5. Uurimismeetodid**

Töö tulemusteni jõutakse põhiliselt Tallina Tehnikaülikooli kõrgepinge laboris teostatavate katsetuste ja mõõtetulemuste põhjal saadud info ning väärtuste analüüsil. Andmete analüüsiks kasutatakse eelnevalt teoreetiliselt arvutuslikul teel saadud väärtusi ning katsetustel fikseeritud mõõtetulemusi. Saadud suuruste põhjal

teostatakse analüüs. Põhiliseks vahendiks andmete analüüsil on tabelarvutusprogramm Excel.

## **6. Graafiline osa**

- Katsete põhimõtteskeemid
- Hetkel põhivõrgus kasutatava 110 kV isolaatorkettide joonis
- Erinevate konfiguratsioon- lahenduste joonised
- Saadud mõõtetulemuste karakteristikud

## **7. Töö struktuur**

- 1) Sisukord
- 2) Lõputöö ülesanne
- 3) Eessõna
- 4) Sissejuhatus
- 5) Eesti elektrivõrgu lühikirjeldus
- 6) Siseõhkvaahemike arvutamise teooria ja arvutused
- 7) Isolatsiooni koordineatsioon
- 8) Isolaatorkettide geomeetria ja joonised
- 9) Katsetulemused
- 10) Järeldused ja kokkuvõte

## **8. Kasutatud kirjanduse allikad**

- F. Kiessling, P. Nefzger, J. F. Nolasco ja U. Kaintzyk, Overhead Power Lines, Berlin, 2003.
- Ü. Treufeldt, Kõrgepingetehnika loengukonspekt, Võrgumaterjal, 2010
- EVS-EN 50341-1:2013 Elektriõhuliinid vahelduvpingega üle 1kV Osa 1: Üldnõuded Ühised eeskirjad, Eesti Standard, 2013.
- Kiitam, I.; Saarna, M.; Taklaja, P.; Tealane, M.; Palu, I, "Electrical and Mechanical Properties of Service-aged Medium Voltage Porcelain Support Insulators" 2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon): 2020 6th IEEE International Energy Conference (ENERGYCon), Gammarth, Tunis, Tuneesia, 28. sept - 1. okt 2020. IEEE, 702–706. DOI: 10.1109/ENERGYCon48941.2020.9236596.
- EVS-EN 60060-1:2010, Kõrgepinge katsetehnika. Osa 1: Üldised määratlused ja katsenõuded, Eesti Standard, 2010.

## **9. Lõputöö konsultandid**

Konsultantideks on lõputöö juhendajad.

## **10. Töö etapid ja ajakava**

Kirjanduse läbitöötamine 10.03.2023

Lähteandmete kogumine 15.03.2023



Teoreetilise osa kirjutamine 20.03.2023

Laboratoorsete katsetuste teostamine 31.03.2023

Järelduste kirjutamine 01.04.2023

Kokkuvõtte koostamine 02.04.2023

Töö esimene versioon valmis juhendajale läbilugemiseks. 03.04.2023

Paranduste sisseviimine. 10.04.2023

Töö teine versioon valmis juhendajale läbilugemiseks. 17.04.2023

Lõputöö esitamine eelkaitsmiseks 24.04.2023

Töö lõpliku versiooni esitamine 18.05.2023

# SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE .....	4
ABSTRACT .....	5
EESSÕNA .....	13
Lühendite ja tähiste loetelu .....	14
SISSEJUHATUS .....	15
1 ÕHULIINI TÖÖKINDLUS JA ISOLATSIOONI TAGAMINE .....	16
1.1 Võrgusageduslikud liigpinged .....	16
1.2 Aeglase tõusuga liigpinged .....	17
1.3 Kiire tõusuga liigpinged .....	18
2 ISOLATSIOONI KOORDINATSIOON .....	20
2.1 Isolatsiooni koordineerimine võrgusageduspingele .....	20
2.2 Isolatsiooni koordineerimine aeglase tõusuga liigpingetele .....	21
2.3 Isolatsiooni koordineerimine kiire tõusuga liigpingetele .....	24
3 VÄHIMATE ÕHKVAHEMIKE ARVUTAMINE .....	25
3.1 Arvutusteooria I pingepiirkonna võrkudele .....	25
3.2 Näidisarvutus 110 kV nimipingega võrgule .....	27
3.2.1 Õhkvaheemikud kiire tõusuga liigpingetele .....	27
3.2.2 Õhkvaheemikud võrgusageduspingetele .....	28
4 VÄLGUIMPULSSPINGEKATSED VASTAVALT STANDARDILE EVS-EN 60060-1:2010 ..	30
4.1 Katsetulemustel $U_{50}$ määramise teooria .....	30
4.2 Atmosfääri parandustegurite arvestamine .....	32
4.2.1 Õhutiheduse parandustegur, $k_1$ .....	32
4.2.2 Niiskuse parandustegur, $k_2$ .....	33
4.3 Katse põhimõtteskeem .....	34
5 KATSETULEMUSED .....	35
5.1 Isolaatorkett: 8 U70BL isolaatorit .....	35
5.1.1 Katsetused positiivse polaarsusega pingega .....	36
5.1.2 Katsetused negatiivse polaarsusega pingega .....	37
5.2 Isolaatorkett: 1 U120AD + 7 U70BL isolaatorit .....	38
5.2.1 Katsetulemused positiivse polaarsusega pingega .....	39
5.2.2 Katsetulemused negatiivse polaarsusega pingega .....	39
5.3 Isolaatorkett: 7 U70BL isolaatorit .....	40
5.3.1 Katsetulemused positiivse polaarsusega pingega .....	41
5.3.2 Katsetulemused negatiivse polaarsusega pingega .....	41
5.4 Isolaatorkett: 1 U120AD + 7 U70BS isolaatorit .....	42
5.4.1 Katsetulemused positiivse polaarsusega pingega .....	43

5.4.2 Katsetulemused negatiivse polaarsusega pingega.....	43
5.5 Isolaatorkett: 8 U70BS isolaatorit .....	44
5.5.1 Katsetulemused positiivse polaarsusega pingega .....	45
5.5.2 Katsetulemused negatiivse polaarsusega pingega.....	45
5.6 Isolaatorkett: 1 U120AD + 7 U70BL + sädevahemiku sarved .....	46
5.6.1 Katsetulemused positiivse polaarsusega pingega .....	47
5.6.2 Katsetulemused negatiivse polaarsusega pingega.....	47
5.7 Isolaatorkett 1 U120AD + 8 U70BS isolaatorit + sädevahemiku sarved .....	48
5.7.1 Katsetulemused positiivse polaarsusega pingega .....	49
5.7.2 Katsetulemused negatiivse polaarsusega pingega.....	49
6 KATSETULEMUSTEST ISOLAATORKETTIDE TALUVUSPINGE MÄÄRAMINE .....	50
7 JÄRELDUSED TÖÖ TULEMUSTEST .....	53
KOKKUVÕTE .....	56

## EESSÕNA

Käesoleva lõputöö teema sündis töö tegija huvist kõrgepinge, lähemalt kõrgepingeliinide vastu, mille tulemusena pakkus lõputöö juhendaja, Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi vanemlektor Paul Taklaja uurida Eesti 110 kV põhivõrgus kasutusel olevate isolaatorkettide  $U_{50}$  parameetri määramist läbi laboratoorsete katsetuste.

Töö teostamisel oli väga suur roll Tallinna Tehnikaülikooli kõrgepinge laboratooriumis teostatud katsetustel, mille läbiviimisel tänan nõu ja jõu eest Paul Taklajat, töö korrektse vormistuse ning heade mõtete eest Ivar Kiitamit. Katsetamiseks vajaminevate tarvikute eest tänan oma tööandjat CONNECTO EESTI ASi. Töö teostamiseks vajamineva aja ja mõistva suhtumise eest tänan CONNECTO EESTI AS vanemprojekteerijat Risto Rusinat ja kõrgepingeliinide osakonnajuhatajat Siim Õispalu.

Juhendaja Paul Taklaja soovil koostas järgmise luuletuse:

*Kõrgepinge sümboliseerib jõudu ja võimsust,  
millest meie elu sõltub ja põimub,  
kõrgepingeliinid meie peade kohal kõrguvad,  
üle maade ja metsade võrguvad.*

*Isolaatorketid kangelased kõrgustes,  
nagu valvurid taevas, kindlad ja truud,  
nende jõud on nähtamatu kuid ilmne,  
omades isolatsiooni üle väge ja võimu.*

*-Markus Uppus*

## Lühendite ja tähiste loetelu

$U_{50}$	katseobjekti 50% sildavlahenduspinge
$U_{90}$	katseobjekti 90% taluvuspinge
$U_w$	standardne normtaluvuspinge
$U_{rw}$	nõutav taluvuspinge
$K_t$	atmosfääri parandustegur
$D_{pp}$	faasidevaheline minimaalne õhkvahe
$D_{el}$	faasi ja maavaheline minimaalne õhkvahe
$d_{is}$	isolaatorketi otspunktide vahelise õhkvahe suurus
$K_g$	lülitusimpulsi kujuteguri
$K_{g,ff}$	õhkvahe kujutegur välguimpulssidel
$K_{z,ff}$	õhkvahe taluvuspinge statistilise jaotuse hälbetegur kiire tõusuga liigpingete korral
$K_{g,ff,is}$	isolaatorketi kujutegur välguimpulssidel
$k_a$	atmosfäärитеgur
$\sigma$	standardhälve
$N$	nõutava taluvuspingele $U_{rw}$ vastav standardhälvete kordsus
$k_1$	õhutiheduse parandustegur
$\delta$	õhu suhteline tihedus
$h$	suhteline niiskus
$k_2$	niiskuse parandustegur

## SISSEJUHATUS

Kasvava nõudlusega elektrienergia järele omavad ülekandeliinid väga olulist rolli elektri edastuses tarbijatele. Seeläbi on oluline tagada ülekandeliinide töökindlus ning katkestuste määra minimeerimine. Tagamaks faasijuhtmete isolatsiooni maast kasutatakse õhuliinidel isolaatorkette, millel on elektrivõrgu toimimises oluline roll. Elektrisüsteemis esinevad erinevat tüüpi liigpingeid, mida antud töö käigus lähemalt kirjeldatakse ning nende rolli isolatsiooni koordineerimises.

Eesti 110 kV põhivõrk on suuremas osas üles ehitatud Nõukogude ajal, seega vastavad antud perioodi nõuetele ka paigaldatud isolaatorketid, kuid ajas on seoses nõuete muutumisega isolaatorkettide konfiguratsioon muutunud. Seega on Eesti 110 kV ülekandevõrgus liine, millel on vägagi erinevad isolatsioonitasemed.

Isolaatorkettide liigpingetaluvus on täpse piksekaitse arvutamise aluseks. Isolaatorkettide konfiguratsioon mõjutab keti liigpingetaluvust. Erinevate 110 kV isolaatorkettide konfiguratsioonide uurimine ja mõõtmiste teostamine vajab eriseadmeid ning on seega tihti raskendatud ettevõtmine. Hetkel puudub selge ülevaade Eestis kasutusel olevate erinevate konfiguratsioonidega isolaatorkettide impulsspinge taluvuse määrad.

Käesoleva töö eesmärgiks on välja selgitada erinevate Eesti 110 kV põhivõrgus kasutusel olevate klaasisolaatorkettide liigpingetaluvus, mis saavutatakse läbi laboratoorsete mõõtmiste ning nende põhjal tehtud arvutuste ja saadud tulemuste analüüsil.

Töö on jaotatud seitsmeks peatükiks. Esimeses peatükis kirjeldatakse isolatsioonile rakenduvaid erinevaid liigpingeid ning nende mõjust õhuliinide töökindlusele. Teises peatükis kirjeldatakse isolatsiooni koordinatsiooni protseduuri ning selle olulisust esimeses peatükis kajastatud liigpingetele. Kolmandas peatükis teostatakse 110 kV mastide vähimate siseõhkvaheemike arvutus tuginedes standardipõhisele isolaatorketi liigpingetaluvuse väärtusele. Neljandas peatükis kajastatakse isolaatorkettide  $U_{50}$  parameetri määramise teooriat ja atmosfääri parandustegurite leidmist ning tutvustatakse katse põhimõtteskeemi. Viiendas peatükis määratakse, kasutades neljandas peatükis kirjeldatud teooriat, Eestis enimlevinud isolaatorkettide  $U_{50}$  parameeter. Kuuendas peatükis kirjeldatakse  $U_{50}$  parameetrist isolaatorketi taluvuspinge ehk  $U_{90}$  määramise teooriast ning teostatakse selle põhjal arvutused. Seitsmendas peatükis teostatakse saadud arvutustulemuste põhjal töö tulemustest analüüs.

# 1 ÕHULIINI TÖÖKINDLUS JA ISOLATSIOONI TAGAMINE

Ülekandeliinide töökindlus on oluline tegur elektrisüsteemi töökindluse ja turvalisuse tagamisel. Lisaks selle detailide mehaanilisele vastupidavusele on veelgi olulisem pöörata tähelepanu ka elektrilisele toimimisele, mis mängib peamist rolli ülekandevõrgu komponentide projekteerimisel või konkreetse ülekandeliinile lubatavate katkestuste määras. Selliste eesmärkide saavutamiseks tuleks valida mastidele optimaalseimad isolatsioonivahemikud, teisisõnu tuleks valida isolatsioonitasemed, mis sõltuvad erinevatest pingetest, mis rakenduvad õhkvahemikule, nii et saavutatakse kompromiss rahuldava talitluskindlus ja mõistlike investreerimismaksumuste vahel. [1]

Isolatsiooniga seoses on oluline mõista põhimõttelist erinevust süsteemi võrgusageduspingel ja liigpingetel. Liigpinged on harva esinevad ja piiratud kestusega, kuid süsteemi võrgusageduspinge, kuigi selle amplituud on suhteliselt väike, koormab võrgu toimimisel isolatsiooni pidevalt. Masti tipu geomeetria määramiseks võetakse arvesse järgmisi isolatsioonile rakenduvaid pinge liike: võrgusageduspinge; kiire ning aeglase tõusuga liigpinged. Lisaks sellele on mastid projekteeritud potentsiaalselt nii, et need võimaldaksid õhuliini pingevaluseid hooldustöid, seega tuleks arvestada ka selliste tööde jaoks vajalikke vahekaugustega. [1]

## 1.1 Võrgusageduslikud liigpinged

Süsteemi nimipinge on elektrisüsteemi, faasidevahelise pinge efektiivväärtus. Võrk on tavaliselt projekteeritud elektrisüsteemi nimipinge järgi, millega on seotud võrgu teatavad töomadused. Üldiselt on enamik süsteeme määratud töötama võrgunimipinge lähedal. Mõned süsteemid peavad siiski töötama võrgu suurima lubatud pinge lähedal või selle juures, mis on tavaliselt 10% kõrgem kui nimipinge. Suurim võrgupinge on süsteemi kõrgeima faasidevahelise pinge efektiivväärtus, mis esineb normaalsetes töötingimustes igal ajal ja igas võrgu punktis. Ajutised liigpinged on teatavas kohas esinevad võnkumised, mis on tavaliselt suhteliselt pika kestusega ja mis on summutamata või nõrgalt summutatud. Need tekivad tavaliselt lülitustoimingutest, näiteks suurte koormuste lülitamisest või resonantsist. [2]

Võrgusageduslikud liigpinged tekitavad isolatsioonile liigset koormust, mille tulemusel väheneb isolatsiooni tugevus. Kui isolatsiooni tugevus väheneb piisavalt, võib tekkida ülelöökk. Isolatsiooni tugevuse vähenemist võivad põhjustada ilmastikutingimused.

Näiteks võib tuul puhuda elektrijuhi masti poole, vähendades seeläbi õhkvaheemikku juhtme ja masti konstruktsiooni vahel ning masti valel dimensioneerimisel võib tekkida ülelöökk faasijuhist masti konstruktsiooni. Isolaatsiooni tugevus võib väheneda ka pikema aja jooksul, nt isolaatoritele tekkinud saastumise tõttu või kui isolaatorid on udust või vihmast niisutatud. [1]

Tavaliselt reguleerivad kirjeldatud võrgusageduspinged isolaatorkettide projekteerimist vastava reostustasemetega liini marsruudil. Isolaatorite lekkeraja kogupikkus piki isolaatorite pinda on põhiparameeter, mille põhjal määratakse kindlaks liini jaoks vajalike isolaatorite arv. Iga isolaatoritüübi individuaalse lekkeraja pikkusega on võimalik kindlaks määrata liini jaoks vajalike isolaatorite tüüpe ja arvu mingi piirkonna kohta mida õhuliin läbib.

Tabelis 1.1 on esitatud saastetaseme klassifikatsioonidele vastavad ühiklekkeraja pikkused vastavalt Eestis kehtivatele siseriiklikele erinõuetele (SEN) EVS-EN-50341-2-20:2018.

Tabel 1.1 Saastetaseme klassifikatsioonid [3]

Saastetase	Iseloomuliku keskkonna näited *)	Ühiklekkerada võrgu suurima isolaatorile toimiva pinge **) jaoks, mm/kV
Väga madal	Liin kaugemal kui 10 km merest või inimtekkelisest saasteallikast	22,0
Madal	Liin 5 km kuni 10 km kaugusel merest või inimtekkelisest saasteallikast	27,8
Keskmine	Liin 1 km kuni 5 km kaugusel merest või inimtekkelisest saasteallikast	34,7
Kõrge	Liin saastava tööstuse või elava liiklusega maantee lähedal või liin kuni 1 km kaugusel merest	43,3
Väga kõrge	Liin tugevalt saastava tööstuse lähedal	53,7

\*) Tabelis on vastava keskkonna jaoks saastetaseme ligikaudne hinnang. Täpsemad meetodid saastetaseme määramiseks on toodud tehnilises spetsifikatsioonis IEC/TS 60815-1.  
 \*\*) Enamikel juhtudel on selleks faasipinge ( $U_s/\sqrt{3}$ )

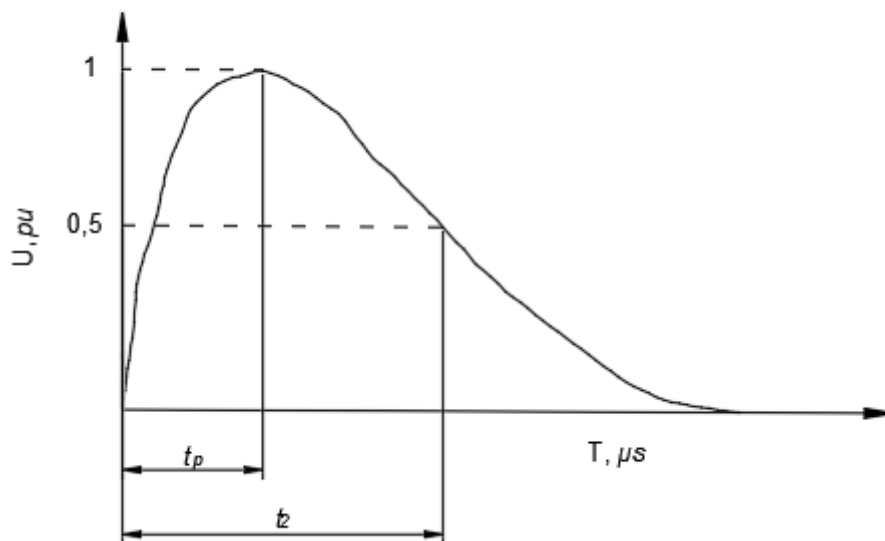
## 1.2 Aeglase tõusuga liigpinged

Aeglase tõusuga liigpinged võivad tekkida lülitusliigpingete või välgulöökkide tagajärjel liini lähedusse ja sõltuvad põhimõtteliselt võrgu parameetritest, võrgu konfiguratsioonist ja võrgu seisundist. Siiski võivad lülitusliigpinged saavutada erinevaid väärtusi isegi sama võrgu konfiguratsiooni ja lülitusoperatsiooni puhul. [1] [2]



Seda tüüpi liigpinged õhuliinis tekivad peamiselt liini sisselülitamisel või suurte koormuste ümberlülitustoimingutel. Pinge kuju on sel juhul iseloomulik standardse lainekujuga 250/2500  $\mu\text{s}$ , nagu on näha joonisel 1.2. [1] [2]

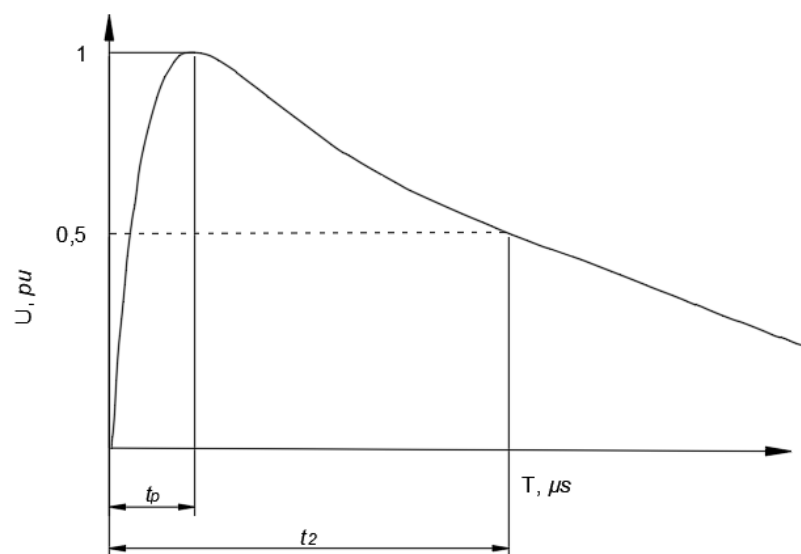
Liigpingete väärtused sõltuvad lülitussündmuse suhtelisest ajastusest seoses võrgusageduspinge siinuslainega. See on juhuslik ja iga lülitustoiming toob kaasa erineva liigpinge. [2]



Joonis 1.2 Standardne aeglase tõusuga liigpinge.  $t_p = 250 \mu\text{s}$ ;  $t_2 = 2500 \mu\text{s}$  [1]

### 1.3 Kiire tõusuga liigpinged

Kiire tõusuga liigpinged on võrgu vastavas kohas põhjustatud peamiselt otse faasijuhet tabanud välgulöögist või tagasilöögist mastist juhtmesse, mille kuju võib isolatsiooni koordineerimise eesmärgil pidada sarnaseks välguimpulsspingete katsetes kasutatava standardimpulsi kujuga. Sellised liigpinged on tavaliselt ühesuunalised ja väga lühikese kestusega. Standardimpulsi tõusu aeg on 1,2  $\mu\text{s}$  ja poolväärtusaeg 50  $\mu\text{s}$ , nagu on näha joonisel 1.3. Lihtsustatud analüüsis võib välku käsitleda kui vooluallikana, nii et välgu poolt tekitatud liigpinge on välguvoolu ja selle läbiva impedantsi korrutis. [1]



Joonis 1.3 Standardne kiire tõusuga liigpinge karakteristik.  $t_p = 1,2 \mu s$ ;  $t_2 = 50 \mu s$  [1]

## 2 ISOLATSIOONI KOORDINATSIOON

Isolatsiooni koordineerimine on tehnika, mida kasutatakse tagamaks, et ülekande- ja jaotusvõrgu moodustavate erinevate seadmete ning nendega seotud kaitseseadmete elektrilised tugevused on vastavuses võrgu omaduste ja eeldatavate pingevahemike vahel. Analüüsi ja selle järelduste rakendamise eesmärk on vähendada isolatsiooni riket ning isolatsiooni rikkest põhjustatud elektrikatkestuste tõenäosust operatiivselt ja majanduslikult vastuvõetava tasemeni. [4]

Standard EVS-EN IEC 60071 hõlmab isolatsiooni koordineerimise protseduuri. Standardis tunnistatakse, et isolatsioon võib aeg-ajalt rikneda, kuna rikete täielik ennetamine pole majanduslikult teostatav. Isolatsiooni koordineerimise põhimõtete soovitatav prioriteetide järjekord on järgmine [4]:

- Tagada turvalisus inimestele ja käitajatele.
- Vältida seadmete püsivat kahjustumist.
- Minimeerida tarbijate varustamise katkemist.
- Minimeerida liinide katkestusi.

### 2.1 Isolatsiooni koordineerimine võrgusageduspingele

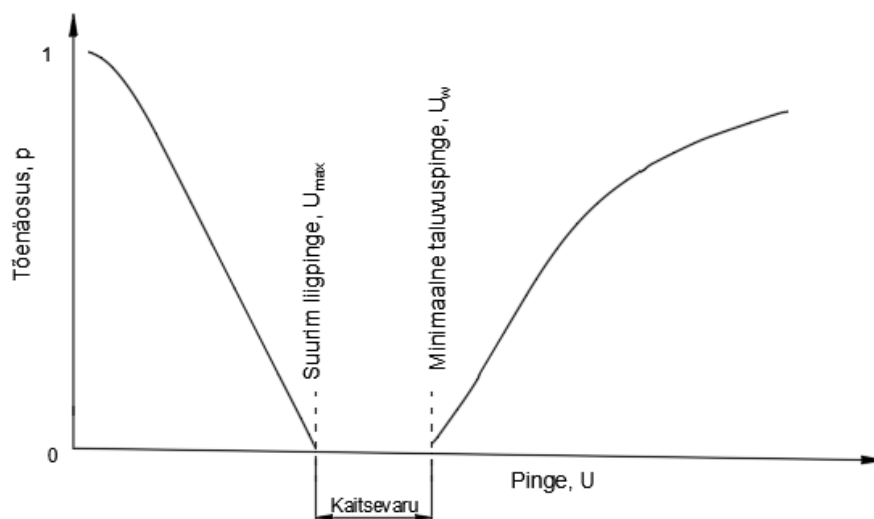
Ülekandeliinide võrgusagedustalitlus koosneb põhiliselt kahest aspektist: esimene neist on isolaatorkettide elektriline tugevus saastunud tingimustes ja teine on vahemaa juhtme äärmuslikus kõrvalekaldes masti konstruktsiooni poole, mis on põhjustatud piirtoole koormusest. Mõlemal juhul võetakse arvesse ainult võrgusageduspingeid. Tegelikult on õhkvaahemike nõuete arvestamisel äärmuslikus kõrvalekalde tingimustes lülitus- või välgulöökide tekkimise tõenäosus nii väike, et see jäetakse arvestamata. [1]

Praeguste kogemuste kohaselt võivad saastunud isolaatorid, mille võrgusageduspinge taluvus on väga lähedal välguimpulsspinge taluvusele, taluda märkimisväärseid lülitus- või välguimpulsspingeid, ilma et ülelöögi tõenäosus suureneks. Esimene samm on seega valida isolaatori tüüp ja keti pikkus ning isolaatorite arv sõltuvalt liini läbitava piirkonna saastetasemest. Tabelis 1.1 on esitatud IEC määratlused saastetasemete ja iga saastetaseme jaoks nõutavate ühiklekkeradade kohta. [1]

Piirtuulekoormusel isolaatorketi puhul tuleb äärmusliku kõrvalekalde tingimustes arvestada ainult õhkvaheemiku tugevust võrgusageduslike pingete puhul. Kõrvalekaldenurk tuleks arvutada tuule kiiruse, isolaatorketi massi ja tuuleulatuse suhte ning juhtme ristlõike ning kaalu funktsioonina. Vajaliku õhkvaheemiku saab määrata maksimaalse võrgusageduspinge jaoks. Maksimaalse kõrvalekaldeurgaga seotud kordumisperioodi võib pidada ka võrgusageduspinge juures toimuva ülelöögi keskmiseks kordumisintervalliks, nt üks kord 50 aasta jooksul. [1]

## 2.2 Isolatsiooni koordineerimine aeglase tõusuga liigpingetele

Õhuliini isolatsiooni koordineerimise uurimiseks on kaks põhilist meetodit, mis võtavad arvesse aeglase tõusuga liigpinget. Esimene, mida nimetatakse deterministlikuks või tavapäraseks isolatsioonikoordineerimise meetodiks, eeldab, et on olemas teadaolev kindel maksimaalne liigpinge  $U_{max}$ , mis võib isolatsioonile rakenduda. Samuti eeldatakse, et on olemas kindel minimaalne isolatsiooni taluvuspinge  $U_w$ . Isolatsioon projekteeritakse nii, et  $U_w$  on kaitsevaru võrra suurem kui  $U_{max}$ , nagu on näidatud joonisel 2.1. [1]



Joonis 2.1 Tavapärase isolatsiooni koordineerimise meetod [1] [5]

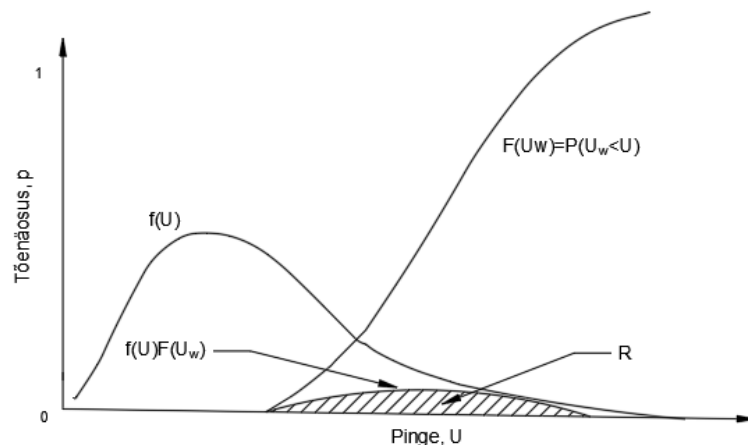
Taluvuspinget nimetatakse sel juhul põhisolatsioonitasemeks (*basic surge insulation level* e BSIL), kuna see viitab aeglase tõusuga liigpingele või lülitusliigpingele. Lisas 1 on esitatud iga pingetaseme jaoks vastuvõetud kõige levinumad isolatsioonitasemed. Seda lähenemisviisi on kasutatud traditsioonilises isolatsiooni koordineerimise

protseduuris. Vastavat liigpinget nimetatakse tavapäraseks maksimaalseks lülitusliigpingeks.

Tavapärane meetod on tavaliselt konservatiivsem, kuna maksimaalsed liigpinged esinevad harva ja samamoodi langeb isolatsioonitugevus harva oma madalaimale väärtusele. Lisaks on mõlema sündmuse üheaegse esinemise tõenäosus piiratud. [1]

Tänapäeval on levinud ja asjakohasem tava kasutada statistilisi meetodeid teatud isolatsiooni või konkreetselt liini ülelöögi tõenäosuse määramiseks. Statistilised meetodid ei ennusta konkreetset liigpinget, mida tekitab mingi konkreetne lülitustoiming, vaid nad annavad tõenäosuse, millega võib oodata ülelöögi tekkimist, või praktilisemalt öeldes tõenäosuse, et teatud liigpinge väärtus ületatakse. Liigpinge oleks täielikult defineeritud, kui oleks antud selle tõenäosuse jaotustihedus või kumulatiivne jaotusfunktsioon. Erinevalt tahkest isolatsioonist, millel ei ole lubatud läbilööki, valitakse mastide siseõhkvahekeskused nii, et see võimaldab teatud arvu ülelööke, mis vastab soovitud talitluskindluse. [1]

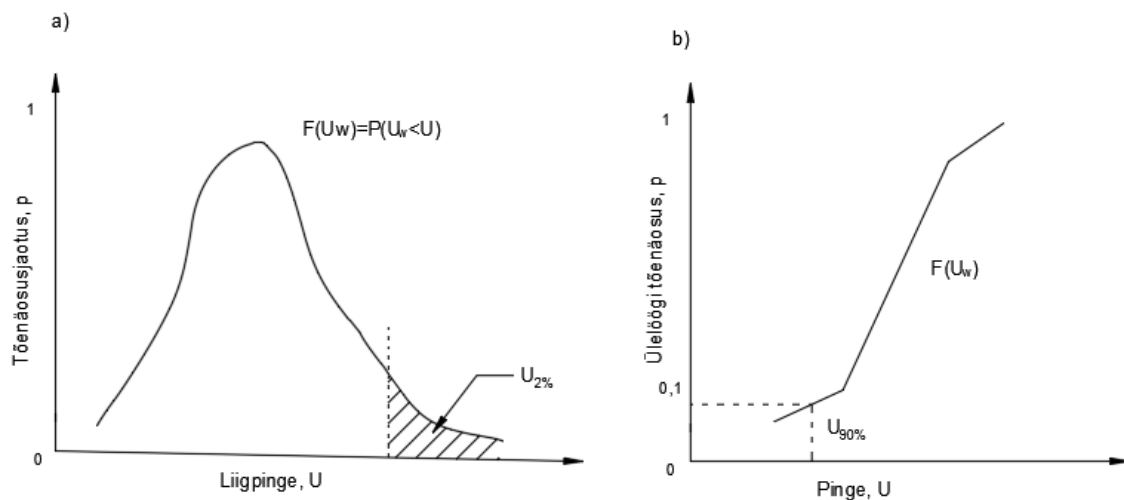
Pingete (liigpingete) ja tugevuste (isolatsiooni) koordineerimine soovitud talitluskindluse saavutamiseks on oma olemuselt statistiline protseduur, kuna nii isolatsiooni tugevusel kui ka ülelöögi pingetel ei ole fikseeritud väärtusi, vaid need varieeruvad vahemikes, mis moodustavad pingete ja tugevuste tõenäosusjaotused, mille integreeritud tõenäosus moodustab toimivuse või ülelöögi tõenäosuse ehk rikkeohu (joonis 2.2). [1]



Joonis 2.2 Statistiline lähenemine isolatsiooni koordineerimiseks, kus  $f(U)$  liigpingete tihedusjaotus;  $F(U_w)$  isolatsiooni taluvuspinge tõenäosusfunktsioon;  $R = \int_0^{U=\infty} f(U)F(U_w)dU$  ülelöögi risk [1] [5]

Erinevate konstruktsiooniliste õhkvahemike vastupidavuse määramiseks tuleb arvesse võtta nende kuju ning tavaliselt võetakse võrdluseks varras-tasapind elektroodidega õhkvahemik. Kriitiline ülelöögipingeline  $U_{50\%}$  arvutatakse empiiriliste valemite abil.

Kui liigpingete ja isolatsioonitaluvuse tegelik jaotus pole teada, võib riski ligikaudse hinnangu saada lihtsustatud statistilise meetodi abil (joonis 2.3). See lähenemisviis põhineb eeldusel, et liigpinge jaotuse madalamate väärtuste tegelik kuju ei ole ülemäära oluline, sest nii madalad liigpinged ei põhjusta ülelööke. Samuti pole vaja täpselt jälgida, kui tõenäoline on, et isolatsioonitugevus on suurem kui tavaliselt. Seetõttu asendatakse tegelikud jaotused lihtsate jaotustega, tavapäraselt Gaussi normaaljaotustega, mida saab iseloomustada standardhälbe ja keskväärtusega. Punkt kuulub liigpinge jaotusse ning seda iseloomustatakse kui statistilist liigpinget  $U_{2\%}$ , mis on liigpinge 2% punktis, ehk väärtus, mis võib esineda 2% tõenäosusega.



Joonis 2.3 lihtsustatud statistiline koordineerimine. a) liigpingete tõenäosusjaotus; b) isolatsiooni liigpingetaluvuse kumulatiivne jaotusfunktsioon

Talvuspingete jaotust kirjeldab statistiline talvuspinge  $U_{90\%}$ , mis on 90% isolatsiooni taluvuse või 10% ülelöögipunkt. Need punktid on esitatud joonisel 2.3. Seega oleks isolatsiooni koordineerimiseks vajalik kooskõlastada kaks jaotust: aeglase tõusuga liigpinged ehk lülituspinged ühel poolel ja talvuspinge jaotus teisel poolel. Seda on võimalik saavutada õhkvahemiku sobiva dimensioneerimisega ning vastava kumulatiivse jaotuse kohandamisega joonise 2.3 parempoolsel kõveral. Eespool nimetatud maksimaalne lülitusliigpinge tuleks kombineerida masti vähima õhkvahemiku minimaalseima talvuspingega, et määrata kindlaks ühe tüüpilise masti rikkekoht. Kasutades asjakohaseid statistilisi valemeid, on seejärel võimalik kindlaks määrata rikkekoht, mida nimetatakse ka ülelöögitõenäosuseks, selle arvu mastide jaoks, mida liigpinged eeldatavasti mõjutavad. Arvestades seega statistilist meetodit isolatsiooni

koordineerimiseks, et määrata kindlaks teatava liini isolatsioon, seisneb praktika selles, et määratakse kindlaks maksimaalne rikkeoht või ülelöögi tõenäosus, mida liin võib taluda. [1]

## 2.3 Isolatsiooni koordineerimine kiire tõusuga liigpingetele

Kiire tõusuga liigpingetaluvus iseloomustab ülekandeliini töökindlust äikeselöökide vastu. Kiire tõusuga liigpingelained või äikese liigpinged tekitavad ülekandeliinidel ülelööke peamiselt kahe teguri tõttu [1]:

- liigpinged, mis tulenevad välgulöökidest, mis mööduvad õhuliini piksekaitsetrossist ja löövad otse faasijuhtmesse.
- vastusuunalised ülelöögid, kui välk lööb piksekaitsetrossi või masti ja löögivool voolab läbi masti, tõstes selle potentsiaali juhtme suhtes, isolatsioonitugevuse ületades tekib isolaatorketil ülelöökk traaversist faasijuhtmesse.

Tuleb arvestada, et alajaamades pingestatakse liin uuesti läbi taaslülituse automaatika (TLA), nii et ca 60-70% välgu põhjustatud ülelöökidest tavaliselt on ajutist laadi, põhjustamata püsivat voolukatkestust. Mitmetest liinide töökindlust mõjutavatest teguritest võib välja tuua järgmist [1]:

- välgulöökide tihedus või alternatiivselt välgulöökide sagedus või äikesetugevus, mis mõõdab keskmist äikesepäevade arvu aastas liini marsruudil (vt 4. peatükk);
- löögi suurus ja lainekuju;
- masti tüüp, kõrgus ja geomeetria;
- piksekaitsetrossi kaitsenurk;
- süsteemi pinge;
- maandustakistus ja pinnase omadused;
- maastiku tüüp ja looduslik piksekaitse puude või mägede näol

Põhiparameeter, mida kasutatakse äikese mõju mõõtmiseks, on katkestuste arv 100 km kohta aastas. Vastav taluvuspinge peaks olema suurem või võrdne pingega, mis võib levida välgulöögi kohast mõne masti kaugusele. Kui puuduvad täpsemad arvutusmeetodid, võib faasi ja maa vahelist taluvuspinget võtta kui isolaatorketi taluvuspinget, st isolaatorketi 90% välgutaluvuspinget  $U_{90}$  taluvuspinget nimetatakse sellisel juhul põhisolatsioonitasemeks (*basic insulation level* BIL), kuna see viitab kiire tõusuga liigpingetele ehk välgu liigpingele.

## 3 VÄHIMATE ÕHKVAHEMIKE ARVUTAMINE

Välgu põhjustatud kiire tõusuga liigpingeid tuleb arvesse võtta õhkvaheemike arvutamisel standardi EN 60071-1 järgse I pingepiirkonna ( $U_s$  üle 1 kV, kuni 245 kV) ja II pingepiirkonna ( $U_s$  suurem kui 245 kV) võrkudes. [6]

Lülitustest põhjustatud aeglase tõusuga liigpingeid tuleb arvesse võtta õhkvaheemike arvutamisel standardi EN 60071-1 järgse II pingepiirkonna ( $U_s$  suurem kui 245 kV) võrkudes. [6]

Käesolevas töös kirjeldatakse lähemalt standardi EVS-EN IEC 60071-1:2020 järgi I pingeklassi ehk 1-245 kV kuuluvate õhuliinide õhkvaheemike arvutamise protseduuri vastavalt standardile EVS-EN 50341-1:2013. [6] [7]

### 3.1 Arvutusteooria I pingepiirkonna võrkudele

Õhkvaheemike sätestamiseks vajaliku tüüpliigpingena tuleb aluseks võtta liigpinge, mis on levinud välgu tabamispunktist mõne masti kaugusele.

- Faasi ja maa vaheliste õhkvaheemike jaoks tuleb selleks pingeks võtta liinile paigaldatud isolaatorketi 90% taluvuspinge välguimpulssidel  $U_{90\%ff\_ins}$ .
- Faasidevaheliste õhkvaheemike jaoks tuleb selleks pingeks võtta  $1,20 U_{90\%ff\_ins}$

Kiire tõusuga liigpingetele vajaminev faasi ja maa vaheline õhkvaheemik  $D_{el}$  on leitav valemiga:

$$D_{el} = \frac{U_{90\%ff\_ins}}{530 \cdot k_a \cdot K_{z\_ff} \cdot K_{g\_ff}} = \frac{1}{K_a} \frac{K_{z\_ff\_is}}{K_{z\_ff}} d_{is} \quad (3.1)$$

kus,  $d_{is}$  – isolaatorketi otspunktide vahelise õhkvaheemiku suurus;

$K_{g\_ff}$  – õhkvaheemiku kujutegur välguimpulssidel, avaldatud lülitusimpulsi kujuteguri  $K_g$  (tabel 3.1) kaudu,  $K_{g\_ff} = 0,74 + 0,26 \cdot K_{g\_sf}$ ;

$K_{z\_ff}$  – õhkvaheemiku taluvuspinge statistilise jaotuse hälbetegur kiire tõusuga liigpingete korral,  $K_{z\_ff} = 0,961$ ;

$K_{g\_ff\_is}$  – isolaatorketi kujutegur välguimpulssidel;

$k_a$  – atmosfääritegur vastavalt tabelile 3.2;

$U_{90\%ff\_ins}$  – liinile paigaldatud isolaatorketi 90% taluvuspinge suurim väärtus välguimpulssidel.



Tabel 3.1 Kujuteguri väärtused aeglase tõusuga liigpingete jaoks [6]

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

Tabel 3.2 Atmosfääriteguri  $k_a$  väärtused [6]

Kõrgus (m)	kuni 200 kV	201 kV kuni 400 kV	401 kV kuni 700 kV	701 kV kuni 1100 kV	Suurem kui 1100 kV
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
100	0,994	0,995	0,997	0,998	0,999
300	0,982	0,985	0,990	0,993	0,996
500	0,970	0,975	0,982	0,987	0,992
1 000	0,938	0,946	0,959	0,970	0,978
1 500	0,904	0,915	0,934	0,948	0,960
2 000	0,870	0,883	0,906	0,923	0,938
2 500	0,834	0,849	0,875	0,896	0,913
3 000	0,798	0,815	0,844	0,867	0,885

Faasidevaheline minimaalne õhkvahemik  $D_{pp}$  on leitav valemiga:

$$D_{pp} = \frac{1,2 \cdot U_{90\%ffins}}{530 \cdot k_a \cdot K_{z,ff} \cdot K_{g,ff}} \quad (3.2)$$

Masti dimensioneerimisel äärmusliku isolaatorketi kõrvalekaldel piirtuulekoormusel ei arvestata eelnevalt kirjeldatud õhkvahemikke peatükis 1.5 toodud põhjustel, vaid dimensioneeritakse vastavalt võrgusageduspingele.

Seega faasi ja maa vaheline minimaalne õhkvahemik  $D_{50Hz.p.e}$  võrgusagedusel on leitav valemiga:

$$D_{50Hz.p.e} = 1,642 \cdot \left( \exp \left( \frac{U_s}{750 \cdot \sqrt{3} \cdot k_a \cdot K_{z,pf} \cdot K_{g,pf}} \right) - 1 \right)^{0,83} \quad (3.3)$$

kus,  $K_{g\_pf}$  – õhkvaheemiku kujutegur võrgusageduspinge jaoks, avaldatuna lülitusimpulsi kujuteguri  $K_g$  kaudu,  $K_{g\_pf} = 1,35 \cdot K_{g\_sf} - 0,35 \cdot K_{g\_sf}^2$ ;

$K_{z\_pf}$  – õhkvaheemiku taluvuspinge statistilise jaotuse hälbetegur võrgusageduspingete korral,  $K_{z\_pf} = 0,91$ ;

$k_a$  – atmosfääritegur vastavalt tabelile 3.2;

$U_s$  – võrgu suurima lubatud pinge efektiivväärtus, kV.

Faasidevaheline minimaalne õhkvaheemik  $D_{50Hz\_p\_p}$  on leitav valemiga:

$$D_{50Hz\_pe} = 1,642 \cdot \left( \exp \left( \frac{U_s}{750 \cdot k_a \cdot K_{z\_pf} \cdot K_{g\_pf}} \right) - 1 \right)^{0,83} \quad (3.4)$$

## 3.2 Näidisarvutus 110 kV nimipingega võrgule

### 3.2.1 Õhkvaheemikud kiire tõusuga liigpingetele

110 kV nimipingega elektrivõrgus on lubatavaks suurimaks võrgupinge efektiivväärtuseks 123 kV, seega võttes isolaatorketi  $U_{90\%ff\_ins}$  väärtuseks lisas 1 esitatud 123 kV vastava standardse välguimpulsspinge taluvuse 550 kV saame kasutades valemeid 3.1 ja 3.2 minimaalsed nõutavad õhkvaheemikud.

Õhkvaheemike väärtused erinevad eri juhtudel õhkvaheemiku kiire tõusuga liigpingete kujuteguri  $K_{g\_ff}$  tõttu, seega avaldatakse kujuteguri väärtused aeglase tõusuga liigpingete väärtustest (tabel 3.1) kasutades valemit 3.5, leitud kujuteguri väärtused esitatud tabelis 3.3.

$$K_{g\_ff} = 0,74 + 0,26 \cdot K_{g\_sf} \quad (3.5)$$

Tabel 3.3 õhkvaheemiku kujutegur välguimpulssidel

	<b>Juhe - liiniväline objekt</b>	<b>Juhe - masti aken</b>	<b>Juhe - masti konstruktsioon</b>	<b>Juhe-juhe</b>
$K_{g\_sf}$	1,3	1,25	1,45	1,6
$K_{g\_ff}$	1,078	1,065	1,117	1,156

Minimaalne siseõhkvaheemik juhtme ja masti konstruktsiooni puhul on seega:

$$D_{el} = \frac{U_{90\%ff\_ins}}{530 \cdot k_a \cdot K_{z\_ff} \cdot K_{g\_ff}} = \frac{550}{530 \cdot 1 \cdot 0,961 \cdot 1,117} = 0,967 \text{ m} \quad (3.6)$$

Muutes valemis õhkvaheemiku kujuteguri väärtust leitakse faasi ja maa vahelise õhkvaheemiku väärtused teistel juhtudel, saadud väärtused on esitatud tabelis 3.4.

Tabel 3.4 faasi ja maa vahelised õhkvaheemikud

<b>Välisõhkvaheemik (m)</b>	Juhe - liiniväline objekt	1,002
<b>Siseõhkvaheemikud (m)</b>	Juhe - masti aken	1,014
	Juhe - masti konstruktsioon	0,967

Faasidevaheline minimaalne õhkvaheemik kasutades valemit 3.2 ja kujuteguri  $K_{g\_ff}$  väärtust "Juhe - juhe" tabelist 3.3:

$$D_{pp} = \frac{550}{530 \cdot 1 \cdot 0,961 \cdot 1,156} = 1,121 \text{ m} \quad (3.7)$$

Arvutustest selgub, et minimaalse õhkvaheemiku väärtus on suuresti sõltuvuses isolaatorketi 90% taluvuspingest  $U_{90\%ff\_ins}$  välguimpulssidel. Ehk kui masti projekteerimisel on arvestatud 123 kV võrgu suurima pinge korral (vastavalt standardile EVS-EN IEC 60071-1:2000) isolaatorketi 550 kV välguimpulsspinge taluvusega ja mastile paigaldatakse isolaatorkett, mille impulsspinge taluvus on suurem, võib välgulöögil juhtmesse olla oht, et ülelööb toimub mitte üle isolaatorketi vaid otse masti konstruktsiooni, põhjustades sellega mastile mehhaanilisi kahjustusi.

### 3.2.2 Õhkvaheemikud võrgusageduspingetele

Nagu eelnevas punktis juba kirjeldatud tuleb õhkvaheemiku kujutegur avaldada aeglase tõusuga liigpinge kujutegurist. Võrgusageduse õhkvaheemiku kujutegur on avaldatav valemiga 3.7 ja tabelile 3.1 vastavate aeglase tõusuga liigpinge väärtustest. Leitud kujuteguri väärtused on esitatud tabelis 3.5.

$$K_{g\_pf} = 1,35 \cdot K_{g\_sf} - 0,35 \cdot K_{g\_sf}^2 \quad (3.8)$$

Tabel 3.5 Õhkvaheemiku kujuteguri  $K_{g\_pf}$  arvutatud väärtused võrgusageduspingel

	<b>Juhe - liiniväline objekt</b>	<b>Juhe - masti aken</b>	<b>Juhe - masti konstruktsioon</b>	<b>Juhe-juhe</b>
$K_{g\_sf}$	1,3	1,25	1,45	1,6
$K_{g\_ff}$	0,230	0,234	0,220	0,214

Kasutades valemit 3.3 leitakse minimaalne õhkvaheemik juhtme ja masti konstruktsiooni vahel võrgusageduspingel:

$$D_{50Hzp_e} = 1,642 \cdot \left( \exp \left( \frac{123}{750 \cdot \sqrt{3} \cdot 1 \cdot 0,91 \cdot 1,222} \right) - 1 \right)^{0,83} = 0,220 \text{ m} \quad (3.9)$$

Muutes valemis õhkvaheemiku kujuteguri väärtust leitakse faasi ja maa vahelise minimaalse õhkvaheemiku väärtused võrgusageduspingel teistel juhtudel, saadud väärtused on esitatud tabelis 3.6.

Tabel 3.6 Minimaalsed õhkvaheemikud võrgusageduspingele

<b>Välisõhkvaheemik (m)</b>	Juhe - liiniväline objekt	0,230
<b>Siseõhkvaheemikud (m)</b>	Juhe - masti aken	0,234
	Juhe - masti konstruktsioon	0,220

## 4 VÄLGUIIMPULSSPINGEKATSEDE VASTAVALT STANDARDILE EVS-EN 60060-1:2010

Kiire tõusuga liigpinge taluvuskatse kuivades tingimustes, mis simuleerib välgulööke, on nõutud iga pingeklassi puhul, samas kui aeglase tõusuga liigpinge taluvuskatse märgades tingimustes, mis simuleerib lülituspingeid, on standardiseeritud nõue isolaatorkettidele ainult II pingeklassi (üle 245 kV) võrkude puhul.

Tavapärase protseduuri taluvuspinge määramiseks seisneb 50% ülelööginge väärtuse arvutamises, mis saadakse „üles-alla“ meetodi abil, nagu on määratletud standardis EVS-EN 60060-1:2010, kus isolaatorkettile rakendatavate impulsside arv ühel pingeniivol  $n=1$  ja tulemuslike katseniivoode arv on  $m \geq 20$ .

„Üles-alla“ meetodil määratakse pingesintervall  $\Delta U$  1,5% kuni 3% oodatavast  $U_{50\%}$  väärtusest. Meetodi rakendamise protseduur seisneb eeldatavast  $U_{50\%}$  väärtusest madalama pinge rakendamisest isolaatorkettile, kui ülelööki ei toimu tõstetakse laadimisinget pingesintervalli  $\Delta U$  võrra, kirjeldatud käiku korratakse kuni tekib isolaatorkettile ülelööki. Alates sellest hetkest hakatakse lugema katsete arvu, mis peab olema minimaalselt 20 korda. Protseduuri järgselt määratakse  $U_{50\%}$  väärtus pingesintervalli  $\Delta U$  tõstmises kui ülelööki ei toimu ja langetamises kui ülelööki toimub. Katsetevaheline ajaline intervall on 60 sekundit. [8]

Katsetustel kasutatakse standardset kiire tõusuga liigpinget kestusega  $1,2/50 \mu s$  (joonis 1.3). Katsetusi teostatakse nii positiivse kui ka negatiivse polaarsusega pingega. Katsetuste tulemusena ei tohi isolaatorid kahjustuda, kuigi pinnal võivad tekkida väikesemad põlenud osakesed ülelöögist.

Käesolevas töös käsitletakse Eesti põhivõrgu 110 kV liinidel enimlevinud klaas-taldrik isolaatorkettide  $U_{50\%}$  parameetri määramist vastavalt standardi EVS-EN 60060-1:2010 „üles-alla“ meetodile.

### 4.1 Katsetulemustel $U_{50}$ määramise teooria

Ülelööki tõenäosusele  $p$  vastavat pinget  $U_p$  on võimalik hinnata valemiga 4.1. [9]

$$U_p = \sum_{i=1}^i \frac{(k_i \cdot U_i)}{m} \quad (4.1)$$

kus  $k_i$  on pingeniivool  $U_i$  rakendatud gruppide arv, millest igaüks sisaldab  $n$  pinge rakendamist, ja  $m$  on kasutuskõlblike gruppide koguarv. Soovitud tõenäosusele  $p$  sobiv  $n$  väärtus on toodud valemities allpool.

Antud olukorras tuleks täpsustada, et kirjeldatud taluvusprotseduur võimaldab hinnata  $U_p$  väärtust sildavlahendusel ehk ülelööki tõenäosusel  $p$ , mis on leitav valemiga 4.2 [9]:

$$p = 1 - (0,5)^{\frac{1}{n}} \quad (4.2)$$

Samal ajal kui lahendusprotseduur annab  $U_p$  väärtuse ülelöögi tekkimiseks vastavalt tõenäosusele 4.3:

$$p = (0,5)^{\frac{1}{n}} \quad (4.3)$$

**Tõlgendus:** Taluvusprotseduur annab tõenäosuse, et sildavlahendust ehk ülelööki ei toimu ja lahendusprotseduur annab tõenäosuse, et ülelööki tekib. Käesolevas töös eelnevalt kajastatud isolaatorketi taluvuspinge  $U_{90\%ff\_ins}$  on tõenäosus, et 90% juhtudest antud pinge juures ülelööki ei toimu, mis on võrdeline isolaatorketi  $U_{10\%}$  ehk 10% sildavlahenduspinge tõenäosusega.

Tabel 4.1 Lahenduse tõenäosused "üles-alla" katsetel [9]

n=	70	34	14	7	4	3	2	1	
p=	0,01	0,02	0,05	0,10	0,15	0,20	0,30	0,50	(taluvus- protseduur)
p=	0,99	0,98	0,95	0,90	0,85	0,80	0,70	0,50	(lahendus- protseduur)

Vastavalt valemile 4.2 on 50% isolatsiooni taluvusprotseduuri hindamiseks  $n=1$  ehk pinge intervalli  $\Delta U$  tõstetakse ja langetatakse peale igat katset. Seega on tegu sümmeetrilise jaotusega ja saab määrata lihtsustatud kujul  $U_{50}$  väärtuse kasutades valemit 4.4. [10]

$$U_{50} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k U_i \quad (4.4)$$

kus  $k$  – vaatluste arv

$U_i$  – mõõdetud pinge väärtus, kV

## 4.2 Atmosfääri parandustegurite arvestamine

Välisolatsiooni sildavlahendus sõltub atmosfääritingimustest. Tavaliselt suureneb sildavlahenduspinge etteantud lahendusteel õhus ükskõik kas rõhu või niiskuse suurenemisel. Kui aga suhteline niiskus ületab 80%, muutub sildavlahenduspinge ebaregulaarseks, eriti kui lahendus toimub isoleerival pinnal. [9]

Sildavlahenduspinge on võrdeline parandusteguriga  $K_t$ , mis on parandusteguri korrutis [9]:

- Õhutiheduse parandustegur  $k_1$
- Niiskuse parandustegur  $k_2$

$$K_t = k_1 \cdot k_2 \quad (4.5)$$

Etalonatmosfääri parameetriteks ehk normaaltingimusteks on:

- Temperatuur  $t_0 = 20 \text{ °C}$ ;
- Absoluutne rõhk  $p_0 = 1013 \text{ hPa}$ ;
- Absoluutne niiskus  $h_0 = 11 \text{ g/m}^3$ .

Kasutades parandustegureid, võib antud katsetingimustel (temperatuur  $t$ , rõhk  $p$ , niiskus  $h$ ) mõõdetud sildavlahenduspinge taandada väärtusele, mis oleks saadud atmosfääri normaaltingimustel ( $t_0$ ,  $p_0$ ,  $h_0$ ). Antud katsetingimustel mõõdetud sildavlahenduspinged  $U$  taandatakse normaaltingimustele vastavateks pingeteks  $U_0$ , jagades neid suurusega  $K_t$  [9]:

$$U_0 = \frac{U}{K_t} \quad (4.6)$$

### 4.2.1 Õhutiheduse parandustegur, $k_1$

Õhu tiheduse parandustegur  $k_1$  sõltub õhu suhtelisest tihedusest  $\delta$  ja võib üldiselt olla väljendatud kui [9]:

$$k_1 = \delta^m \quad (4.7)$$

kus  $m$  on punktis 4.2.2 toodud astmenäitaja.

Kui temperatuurid  $t$  ja  $t_0$  on väljendatud Celsiuse kraadides ja atmosfääri rõhud  $p$  ja  $p_0$  on väljendatud ühesugustes ühikutes, on õhu suhteline tihedus [9]:

$$\delta = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{273 + t_0}{273 + t} \quad (4.8)$$

Parandus on käsitletav usaldusväärseks, kui  $0,8 < k_1 < 1,05$ .

#### 4.2.2 Niiskuse parandustegur, $k_2$

Niiskuse parandustegurit  $k_2$  võib väljendada [9]:

$$k_2 = k^w \quad (4.8)$$

kus  $w$  on tabelis 4.2 toodud astmenäitaja,

$k$  impulsspinge parameeter, mis leitakse kasutades valemit 4.9

$$k = 1 + 0,010 \left( \frac{h}{\delta} - 11 \right) \quad (4.9)$$

##### 4.2.2.1 Astmenäitajad $m$ ja $w$

Kuna parandustegurid sõltuvad eellahenduse tüübist, võib seda fakti arvestada, kasutades parameetrit [9]:

$$g = \frac{U_{50}}{500 \cdot L \cdot \delta \cdot k} \quad (4.10)$$

Kus  $U_{50}$  on sildavlahenduspinge (mõõdetud või hinnanguline) antud atmosfääritingimustel, kV

$L$  - Lühim lahendustee pikkus, m,

$\delta$  - suhteline õhutihedus,

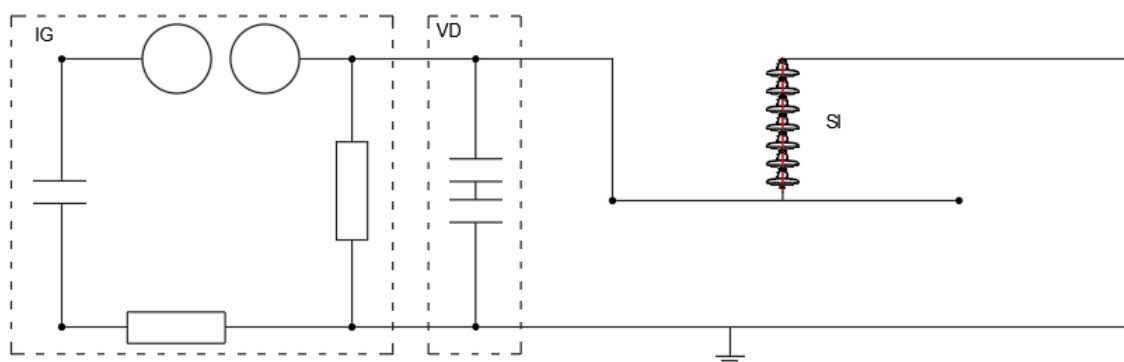
$k$  - punktis 4.2.2 määratletud ühikuta parameeter.

Tabel 4.2 Õhutiheduse paranduse astmenäitaja  $m$  ja niiskuse paranduse astmenäitaja  $w$  väärtused funktsioonina parameetrist  $g$  [9]

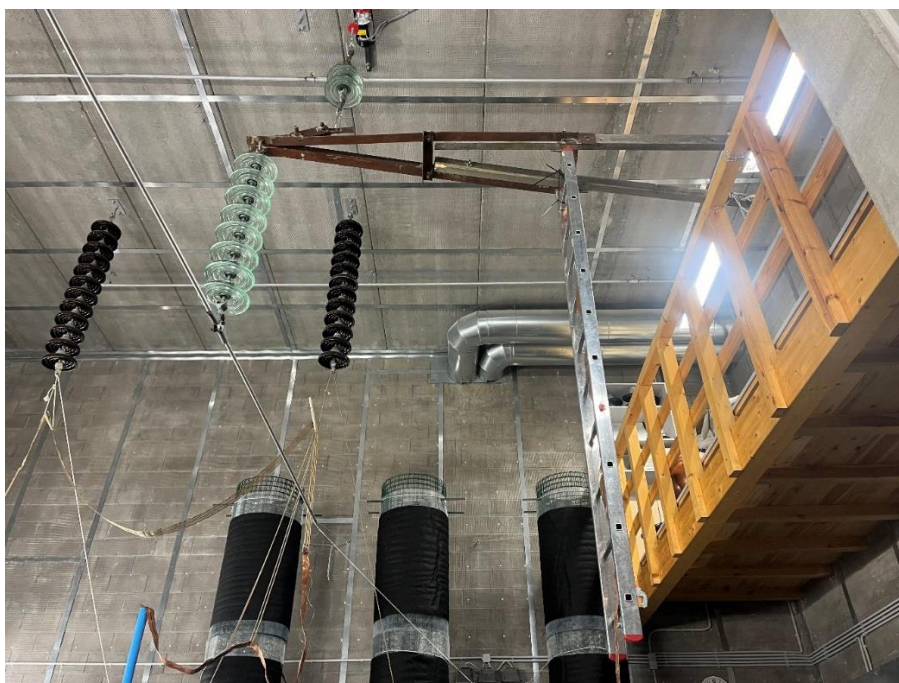
$g$	$m$	$w$
<0,2	0	0
0,2 kuni 1,0	$g(g-0,2)/0,8$	$g(g-0,2)/0,8$
1,0 kuni 1,2	1,0	1,0
1,2 kuni 2,0	1,0	$(2,2-g)(2,0-g)/0,8$
>2,0	1,0	0



## 4.3 Katse põhimõtteskeem



Joonis 4.1 Katse põhimõtteskeem, kus *IG* – impulsspingegeneraator; *VD* – pingejaguriga mõõtesüsteem; *SI* – katseobjekt.

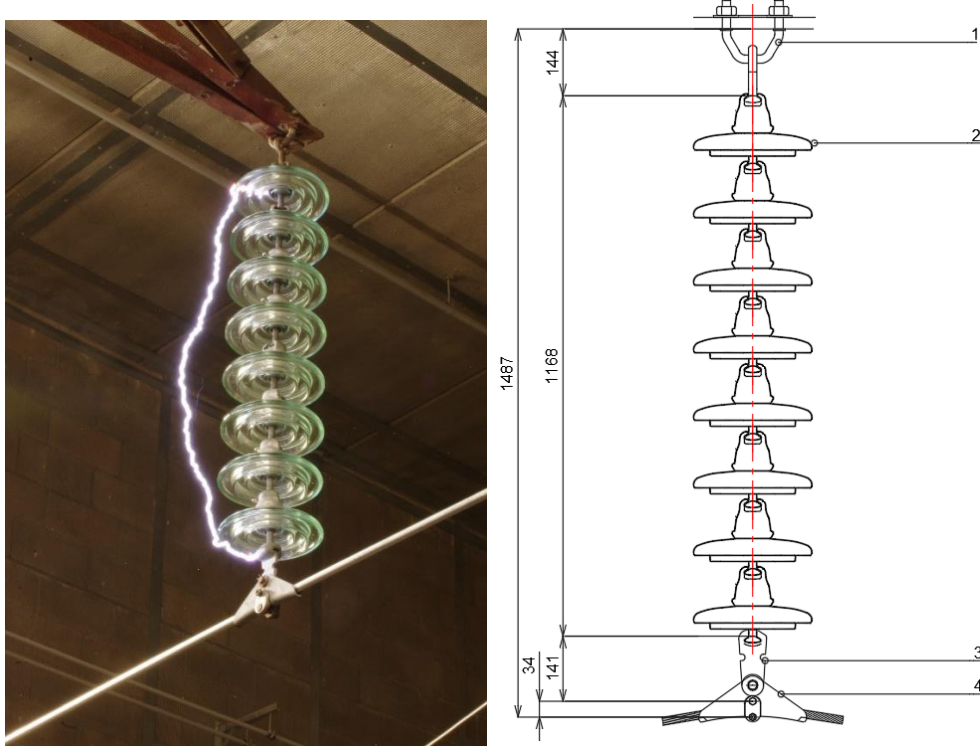


Joonis 4.2 Labori katseinstallatsiooni ülesehitus

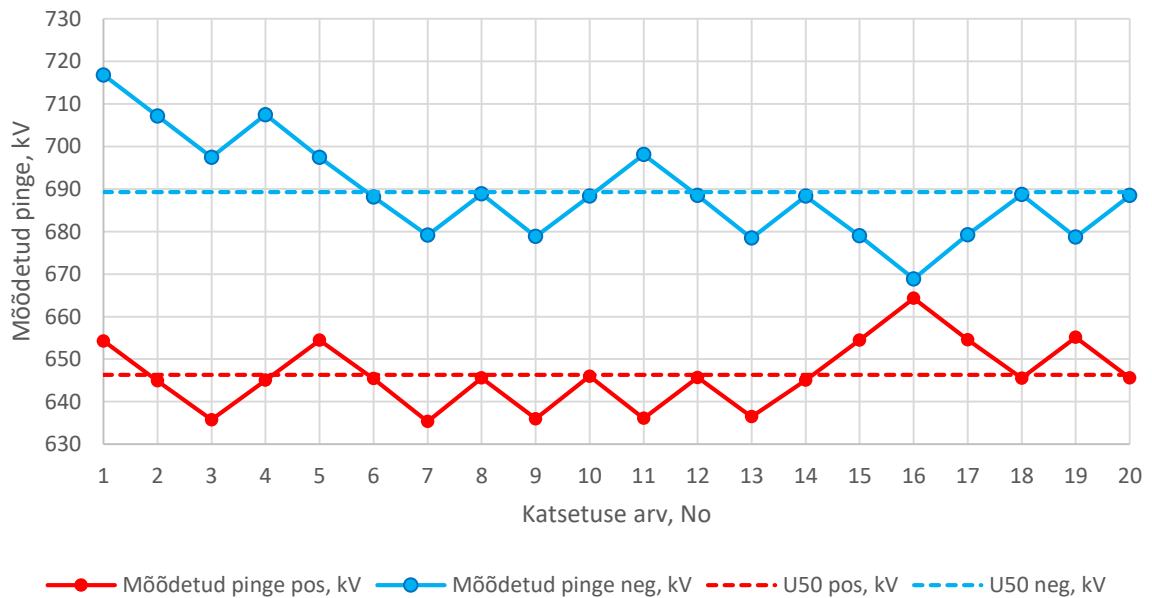
Joonise 4.2 selgitus: Joonisel on näha katseinstallatsiooni ülesehitust, kus on 110 kV raudbetoonmasti ülemise faasi traavers, mille pikkuseks on isolaatorketi kinnituspunktist raudbetoonmasti imiteeriva maandatud redelini 2 m. Traavers on kinnitatud lakke elektrilise taliga, mille küljes on isolatsiooni tagamiseks kaks taldrikisolaatorit. Traaversi külge on kinnitatud puidust prussid, et oleks võimalik füüsiliselt traavers paika fikseerida. Traaversi otsa on kinnitatud isolaatorkett, mille konfiguratsiooni muudeti igal katsel, antud joonisel on isolaatorkett, milles on 8 U70BL isolaatorit. Isolaatorketele on juhtme imiteerimiseks ühendatud alumiiniumlatt, kuhu on omakorda ühendatud impulsspingegeneraatorilt tulev juhe.

# 5 KATSETULEMUSED

## 5.1 Isolaatorkett: 8 U70BL isolaatorit



Joonis 5.1 Isolaatorkett 8 U70BL, kus 1 – U-polt, 2 – U70BL isolaator, 3 – pesaplaat, 4 – kandeklemm.



Joonis 5.2 Isolaatorketti 8 U70BL katsetulemused negatiivse ja positiivse polaarsusega pingega

### 5.1.1 Katsetused positiivse polaarsusega pingega

Katsetulemused on esitatud lisa 2.

Kasutades valemit 4.4 ja lisa 2 esitatud katsetulemusi määratakse hinnanguline  $U_{50}^*$  parameetri väärtus:

$$U_{50}^* = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k U_i = 646,3 \text{ kV} \quad (5.1)$$

Tabel 5.1 Fikseeritud atmosfääriparameetrid positiivse polaarsusega pingega katsel

Temperatuur, °C	Absoluutne rõhk, hPa	Õhuniiskus, %
20,4	996,7	10

Parandusteguri  $K_t$  arvutamine kasutades peatükis 4.2 esitatud protseduuri:

**Õhutiheduse** parandustegur kasutades valemit 4.2:

$$k_1 = \delta^m = 0,982^1 = 0,982 \quad (5.2)$$

kus õhu suhteline tihedus  $\delta$  leitud valemiga 4.8:

$$\delta = \frac{996,6}{1013} \cdot \frac{273 + 20}{273 + 20,4} = 0,982 \quad (5.3)$$

Õhutiheduse paranduse astmenäitaja  $m$  tabelist 4.2 vastava funktsioonina parameetrist  $g$ , mis on leitud valemiga 4.10:

$$g = \frac{U_{50}}{500 \cdot L \cdot \delta \cdot k} = \frac{646,3}{500 \cdot 1,305 \cdot 0,983 \cdot 0,908} = 1,095 \quad (5.4)$$

Kus impulsspinge parameeter  $k$  leitud valemiga 4.9:

$$k = 1 + 0,010 \left( \frac{h}{\delta} - 11 \right) = 1 + 0,010 \left( \frac{2,998}{0,982} - 11 \right) = 0,921 \quad (5.5)$$

Kus suhteline niiskus  $h$  leitud valemiga 5.6:

$$h = \frac{6,11 \cdot R \cdot e^{\frac{17,6 \cdot t}{243+t}}}{0,4615 \cdot (273 + t)} = \frac{6,11 \cdot 17 \cdot e^{\frac{17,6 \cdot 20,4}{243+20,4}}}{0,4615 \cdot (273 + 20,4)} = 2,998 \quad (5.6)$$

**Niiskuse** parandustegur  $k_2$  kasutades valemit 4.8:

$$k_2 = k^w = 0,921^1 = 0,921 \quad (5.6)$$

kus  $k$  impulsspinge parameter, mille väärtus on leitud kasutades valemit 5.5

$w$  niiskuse paranduse astmenäitaja  $w$  väärtus funktsioonina parameetrist  $g$  tabelist 4.2

Seega leitakse parandusteguri  $K_t$  väärtus kasutades valemit 4.5:

$$K_t = k_1 \cdot k_2 = 0,982 \cdot 0,921 = 0,904 \quad (5.7)$$

Seega leitakse normaaltingimustele taandatud  $U_{50}$  väärtus kasutades valemit 5.8:

$$U_{50} = \frac{U_{50}^*}{K_t} = \frac{646,3}{0,904} = 715 \text{ kV} \quad (5.8)$$

### 5.1.2 Katsetused negatiivse polaarsusega pingega

Katsetulemused on esitatud lisas 3

Kasutades valemit 4.4 ja lisas 3 esitatud katsetulemusi määratakse hinnanguline  $U_{50}^*$  väärtus:

$$U_{50}^* = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k U_i = -689,3 \text{ kV} \quad (5.8)$$

Tabel 5.2 Fikseeritud atmosfääriparameetrid negatiivse polaarsusega pingega katsel

Temperatuur, °C	Absoluutne rõhk, hPa	Õhuniiskus, %
20,6	997	10

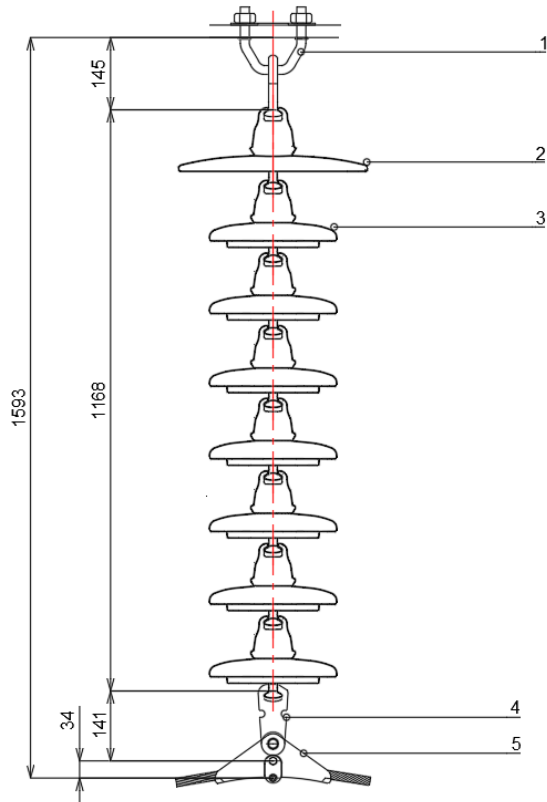
Kasutades peatükis 4.2 kirjeldatud ja punktis 5.1.1 läbi tehtud protseduuri määratakse parandusteguri  $K_t$  väärtus vastavalt tabelis 5.2 esitatud parameetritele:

$$K_t = 0,902 \quad (5.8)$$

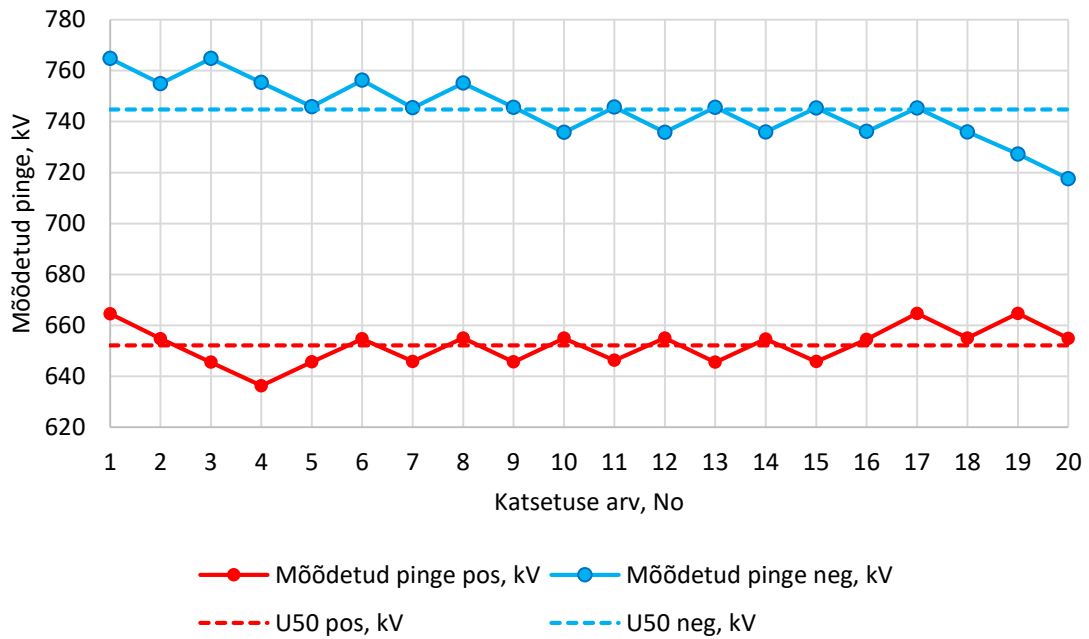
Seega normaaltingimustele taandatud  $U_{50}$  on:

$$U_{50} = \frac{U_{50}^*}{K_t} = \frac{-689,3}{0,902} = -764 \text{ kV} \quad (5.9)$$

## 5.2 Isolaatorkett: 1 U120AD + 7 U70BL isolaatorit



Joonis 5.3 Isolaatorkett 1 U120AD + 7 U70BL, kus 1 - U-polt, 2 - U120AD isolaator, 3 - U70BL isolaator, 4 - pesaplaat, 5 - kandeklemm.



Joonis 5.4 Isolaatorketi 1 U120AD + 7 U70BL katsetulemused negatiivse ja positiivse polaarsusega pingega

### 5.2.1 Katsetulemused positiivse polaarsusega pingega

Katsetulemused on esitatud lisa 4.

Kasutades valemit 4.4 ja lisa 4 esitatud katsetulemus määratakse hinnanguline  $U_{50}^*$  väärtus:

$$U_{50}^* = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k U_i = 652,2 \text{ kV} \quad (5.10)$$

Tabel 5.3 Fikseeritud atmosfääripaameetrid positiivse polaarsusega pingega katsel

Temperatuur, °C	Absoluutne rõhk, hPa	Õhuniiskus, %
20,6	997,6	12

Kasutades peatükis 4.2 kirjeldatud ja punktis 5.1.1 läbi tehtud protseduuri määratakse parandusteguri  $K_t$  väärtus vastavalt tabelis 5.3 esitatud parameetritele:

$$K_t = 0,896 \quad (5.11)$$

Seega normaaltingimustele taandatud  $U_{50}$  on:

$$U_{50} = \frac{U_{50}^*}{K_t} = \frac{652,2}{0,896} = 728 \text{ kV} \quad (5.12)$$

### 5.2.2 Katsetulemused negatiivse polaarsusega pingega

Katsetulemused on esitatud lisa 5.

Kasutades valemit 4.4 ja lisa 5 esitatud katsetulemuse määratakse hinnanguline  $U_{50}^*$  väärtus:

$$U_{50}^* = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k U_i = -745,2 \text{ kV} \quad (5.13)$$

Tabel 5.4 Fikseeritud atmosfääripaameetrid negatiivse polaarsusega pingega katsel

Temperatuur, °C	Absoluutne rõhk, hPa	Õhuniiskus, %
20,6	997,8	13

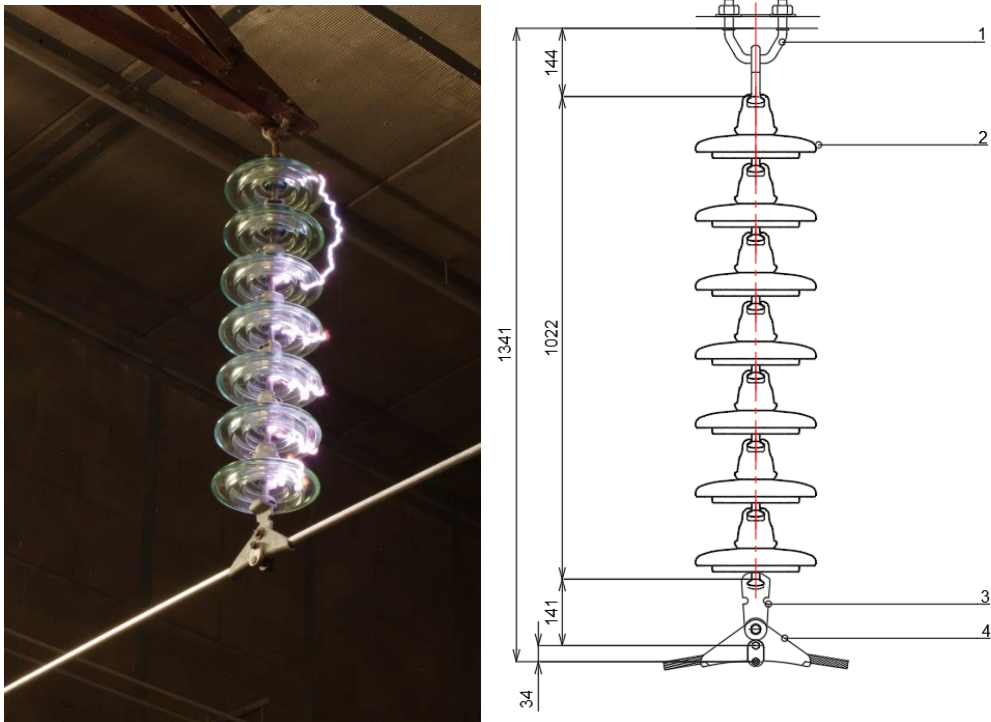
Kasutades peatükis 4.2 kirjeldatud punktis 5.1.1 läbi tehtud protseduuri määratakse parandusteguri  $K_t$  väärtus vastavalt tabelis 5.4 esitatud parameetritele:

$$K_t = 0,914 \quad (5.11)$$

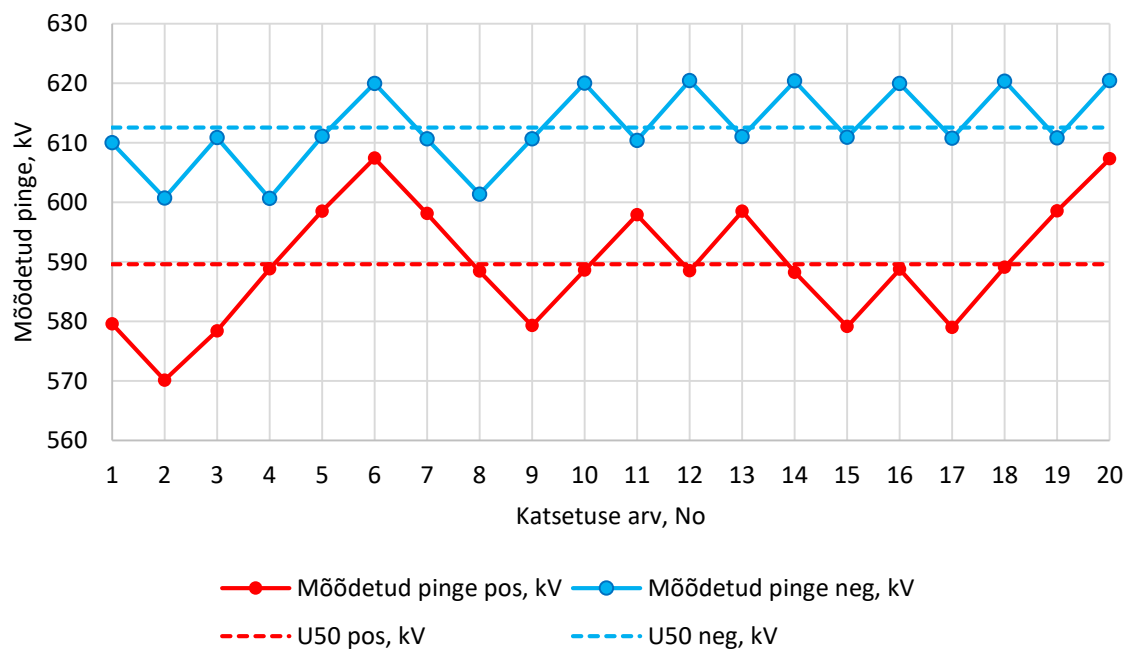
Seega normaaltingimustele taandatud  $U_{50}$  on:

$$U_{50} = \frac{U_{50}^*}{K_t} = \frac{-745,2}{0,914} = -816 \text{ kV} \quad (5.12)$$

### 5.3 Isolaatorkett: 7 U70BL isolaatorit



Joonis 5.5 Isolaatorkett 7 U70BL isolaatorit kus 1 – U-polt, 2 – U70BL isolaator, 3 – pesaplaat, 4 – kandeklemm.



Joonis 5.6 Isolaatorketti 1 U120AD + 7 U70BL katsetulemused negatiivse ja positiivse polaarsusega pingega

### 5.3.1 Katsetulemused positiivse polaarsusega pingega

Katsetulemused on esitatud lisas 6.

Kasutades valemit 4.4 ja lisas 6 esitatud katsetulemusi määratakse hinnanguline  $U_{50}^*$  väärtus:

$$U_{50}^* = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k U_i = 589,6 \text{ kV} \quad (5.13)$$

Tabel 5.5 Fikseeritud atmosfääripaarametrid positiivse polaarsusega pingega katsel

Temperatuur, °C	Absoluutne rõhk, hPa	Õhuniiskus, %
20,6	997,5	12

Kasutades peatükis 4.2 kirjeldatud ja punktis 5.1.1 läbi tehtud protseduuri määratakse parandusteguri  $K_t$  väärtus vastavalt tabelis 5.5 esitatud parameetritele:

$$K_t = 0,905 \quad (5.14)$$

Seega normaaltingimustele taandatud  $U_{50}$  on:

$$U_{50} = \frac{U_{50}^*}{K_t} = \frac{589,6}{0,905} = 651 \text{ kV} \quad (5.15)$$

### 5.3.2 Katsetulemused negatiivse polaarsusega pingega

Katsetulemused on esitatud lisas 7.

Kasutades valemit 4.4 ja lisas 7 esitatud katsetulemusi määratakse hinnanguline  $U_{50}^*$  väärtus:

$$U_{50}^* = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k U_i = -627,6 \text{ kV} \quad (5.16)$$

Tabel 5.6 Fikseeritud atmosfääripaarametrid negatiivse polaarsusega pingega katsel

Temperatuur, °C	Absoluutne rõhk, hPa	Õhuniiskus, %
22	997,2	13

Kasutades peatükis 4.2 kirjeldatud punktis 5.1.1 läbi tehtud protseduuri määratakse parandusteguri  $K_t$  väärtus vastavalt tabelis 5.6 esitatud parameetritele:

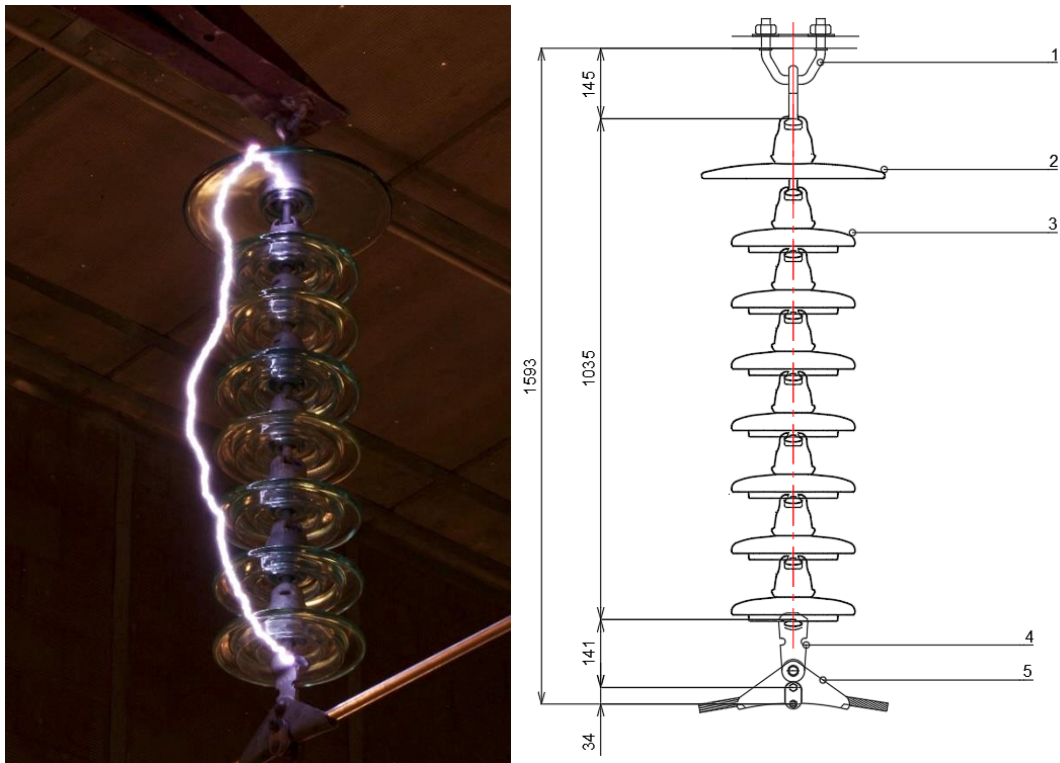
$$K_t = 0,907 \quad (5.17)$$

Seega normaaltingimustele taandatud  $U_{50}$  on:

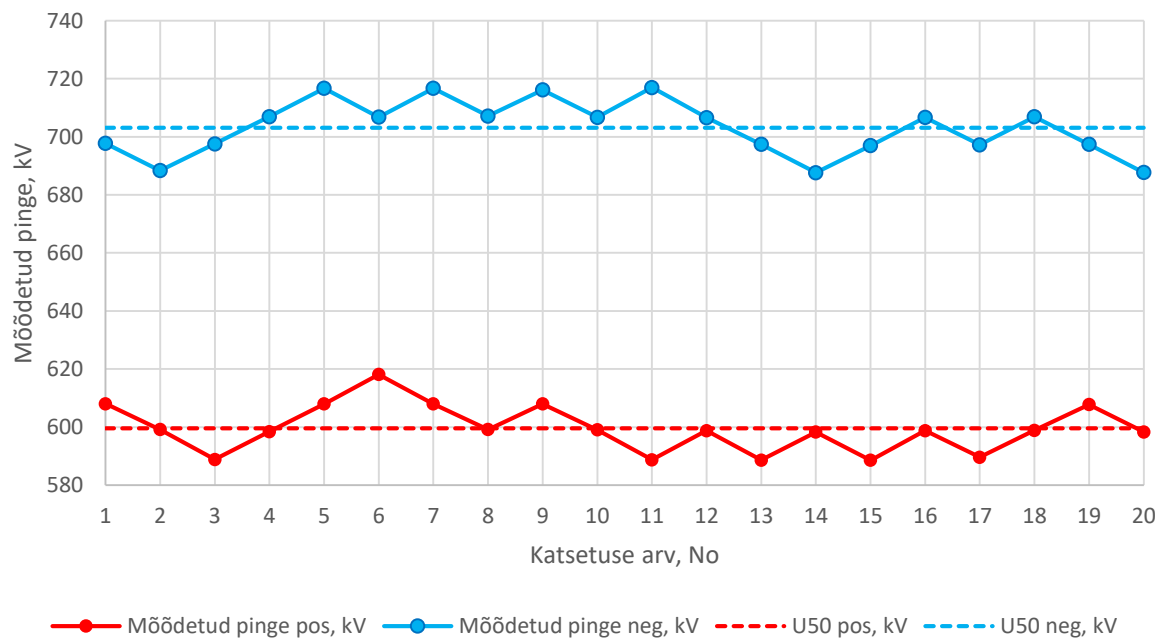
$$U_{50} = \frac{U_{50}^*}{K_t} = \frac{-627,6}{0,907} = -692 \text{ kV} \quad (5.18)$$



## 5.4 Isolaatorkett: 1 U120AD + 7 U70BS isolaatorit



Joonis 5.7 Isolaatorketti 1 U120AD + 7 U70BS isolaatorit, kus 1 – U-polt, 2 – U120AD isolaator, 3 – U70BS isolaator, 4 – pesaplaat, 5 – kandeklemm.



Joonis 5.8 Isolaatorketti 1 U120AD + 7 U70BL katsetulemused negatiivse ja positiivse polaarsusega pingega

### 5.4.1 Katsetulemused positiivse polaarsusega pingega

Katsetulemused on esitatud lisas 8.

Kasutades valemit 4.4 ja lisas 8 esitatud katsetulemusi määratakse hinnanguline  $U_{50}^*$  väärtus:

$$U_{50}^* = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k U_i = 599,6 \text{ kV} \quad (5.19)$$

Tabel 5.7 Fikseeritud atmosfääripaameetrid positiivse polaarsusega pingega katsel

Temperatuur, °C	Absoluutne rõhk, hPa	Õhuniiskus, %
20,6	999,2	33

Kasutades peatükis 4.2 kirjeldatud ja punktis 5.1.1 läbi tehtud protseduuri määratakse parandusteguri  $K_t$  väärtus vastavalt tabelis 5.7 esitatud paameetritele:

$$K_t = 0,935 \quad (5.20)$$

Seega normaaltingimustele taandatud  $U_{50}$  on:

$$U_{50} = \frac{U_{50}^*}{K_t} = \frac{599,6}{0,935} = 641 \text{ kV} \quad (5.21)$$

### 5.4.2 Katsetulemused negatiivse polaarsusega pingega

Katsetulemused on esitatud lisas 9.

Kasutades valemit 4.4 ja lisas 9 esitatud katsetulemusi määratakse hinnanguline  $U_{50}^*$  väärtus:

$$U_{50}^* = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k U_i = -703,1 \text{ kV} \quad (5.22)$$

Tabel 5.8 Fikseeritud atmosfääripaameetrid negatiivse polaarsusega pingega katsel

Temperatuur, °C	Absoluutne rõhk, hPa	Õhuniiskus, %
21,3	999,5	32,3

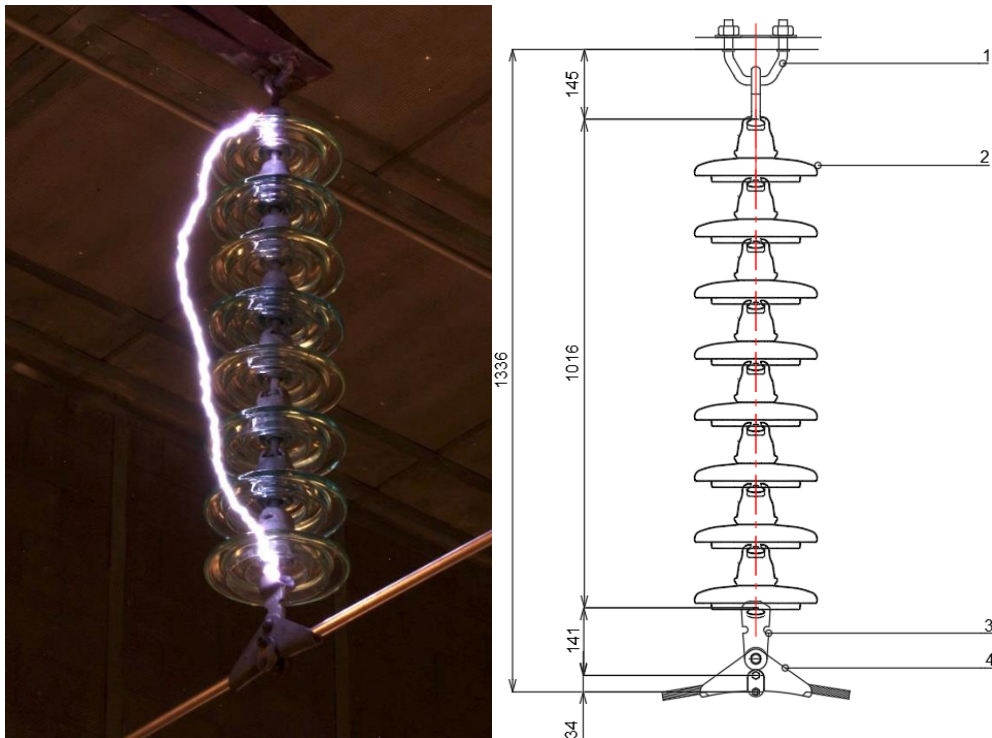
Kasutades peatükis 4.2 kirjeldatud punktis 5.1.1 läbi tehtud protseduuri määratakse parandusteguri  $K_t$  väärtus vastavalt tabelis 5.8 esitatud paameetritele:

$$K_t = 0,943 \quad (5.23)$$

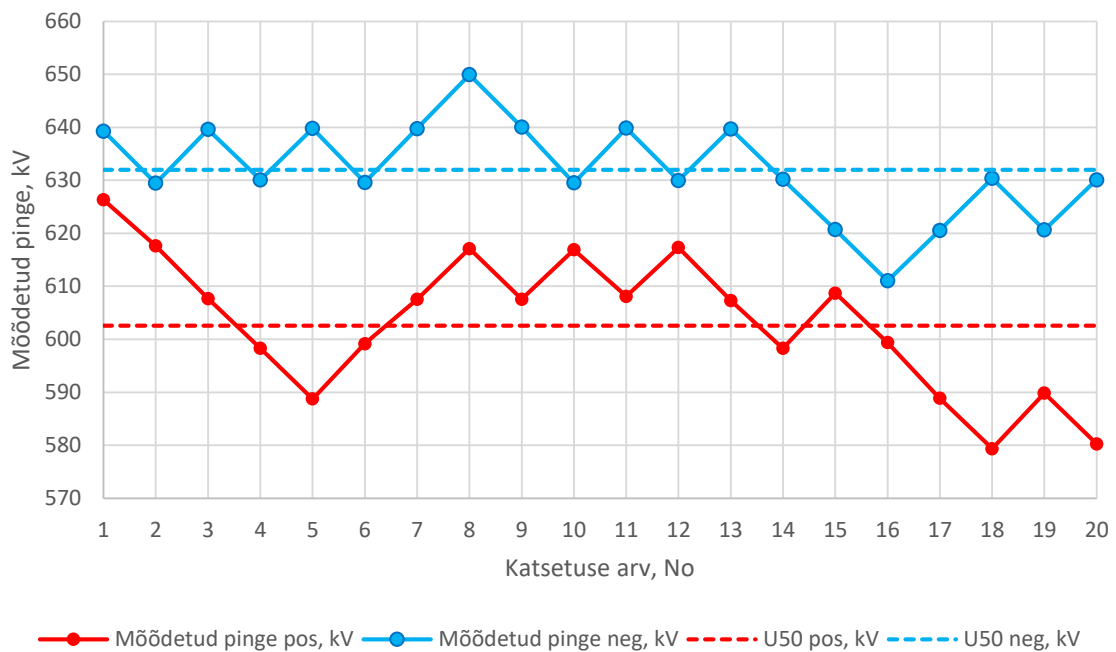
Seega normaaltingimustele taandatud  $U_{50}$  on:

$$U_{50} = \frac{U_{50}^*}{K_t} = \frac{-703,1}{0,943} = -746 \text{ kV} \quad (5.24)$$

## 5.5 Isolaatorkett: 8 U70BS isolaatorit



Joonis 5.9 Isolaatorketti 8 U70BS isolaatorit, kus 1 – U-polt, 2 – U70BS isolaator, 3 – pesaplaat, 4 – kandeklemm.



Joonis 5.10 Isolaatorketti 1 U120AD + 7 U70BL katsetulemused negatiivse ja positiivse polaarsusega pingega

### 5.5.1 Katsetulemused positiivse polaarsusega pingega

Katsetulemused on esitatud lisas 10.

Kasutades valemit 4.4 ja lisas 10 esitatud katsetulemusi määratakse hinnanguline  $U_{50}^*$  väärtus:

$$U_{50}^* = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k U_i = 602,6 \text{ kV} \quad (5.25)$$

Tabel 5.9 Fikseeritud atmosfääripaameetrid positiivse polaarsusega pingega katsel

Temperatuur, °C	Absoluutne rõhk, hPa	Õhuniiskus, %
20,1	999,4	34

Kasutades peatükis 4.2 kirjeldatud ja punktis 5.1.1 läbi tehtud protseduuri määratakse parandusteguri  $K_t$  väärtus vastavalt tabelis 5.9 esitatud paameetritele:

$$K_t = 0,937 \quad (5.26)$$

Seega normaaltingimustele taandatud  $U_{50}$  on:

$$U_{50} = \frac{U_{50}^*}{K_t} = \frac{602,6}{0,937} = 643 \text{ kV} \quad (5.27)$$

### 5.5.2 Katsetulemused negatiivse polaarsusega pingega

Katsetulemused on esitatud lisas 11.

Kasutades valemit 4.4 ja lisas 11 esitatud katsetulemusi määratakse hinnanguline  $U_{50}^*$  väärtus:

$$U_{50}^* = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k U_i = -632,0 \text{ kV} \quad (5.28)$$

Tabel 5.10 Fikseeritud atmosfääripaameetrid negatiivse polaarsusega pingega katsel

Temperatuur, °C	Absoluutne rõhk, hPa	Õhuniiskus, %
20,3	999,3	33

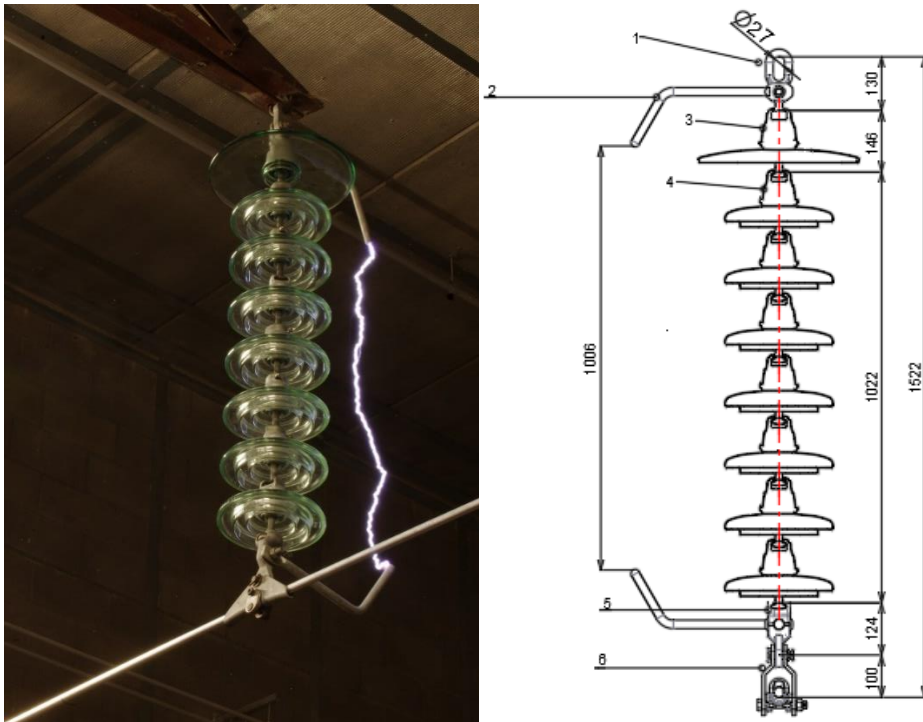
Kasutades peatükis 4.2 kirjeldatud punktis 5.1.1 läbi tehtud protseduuri määratakse parandusteguri  $K_t$  väärtus vastavalt tabelis 5.10 esitatud paameetritele:

$$K_t = 0,938 \quad (5.29)$$

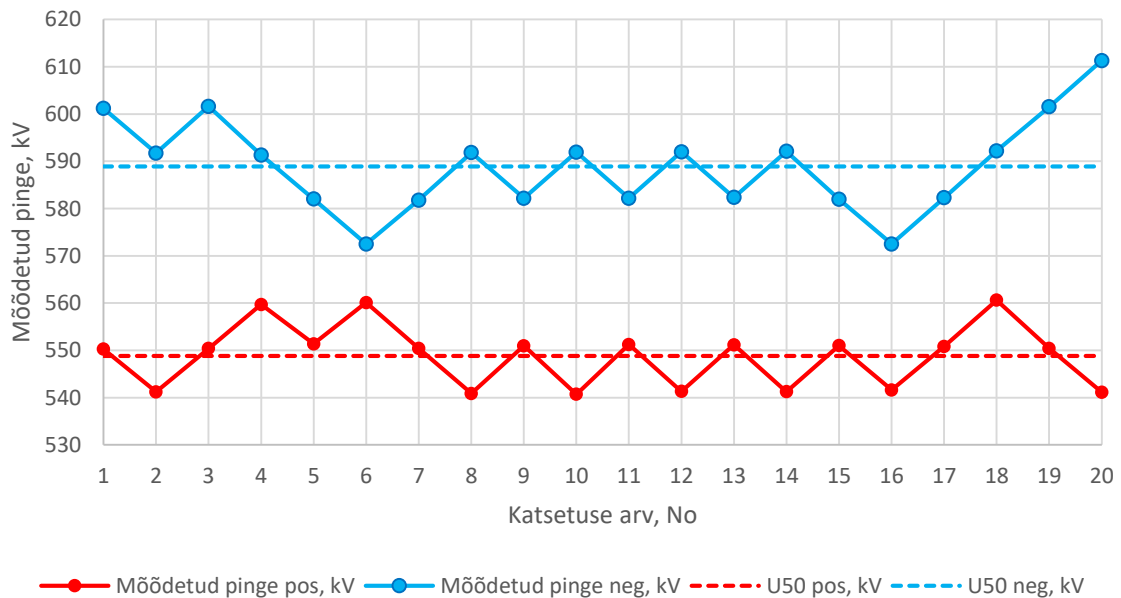
Seega normaaltingimustele taandatud  $U_{50}$  on:

$$U_{50} = \frac{U_{50}^*}{K_t} = \frac{-632}{0,938} = -674 \text{ kV} \quad (5.30)$$

## 5.6 Isolaatorkett: 1 U120AD + 7 U70BL + sädevahemiku sarved



Joonis 5.11 Isolaatorkett 1 U120AD + 7 U70BL + sädevahemiku sarved kus, 1 – kinnitussõlm, 2 – sädevahemik, 3 – U120AD isolaator, 4 – U70BL, 5 – pesaplaat, 6 – kandeklemm.



Joonis 5.12 Isolaatorketti 1 U120AD + 7 U70BL + sädevahemiku sarved katsetulemused negatiivse ja positiivse polaarsusega pingega

### 5.6.1 Katsetulemused positiivse polaarsusega pingega

Katsetulemused on esitatud lisas 12.

Kasutades valemit 4.4 ja lisas 12 esitatud katsetulemusi määratakse hinnanguline  $U_{50}^*$  väärtus:

$$U_{50}^* = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k U_i = 548,8 \text{ kV} \quad (5.31)$$

Tabel 5.11 Fikseeritud atmosfääripaarametrid positiivse polaarsusega pingega katsel

Temperatuur, °C	Absoluutne rõhk, hPa	Õhuniiskus, %
20,4	998,9	11

Kasutades peatükis 4.2 kirjeldatud ja punktis 5.1.1 läbi tehtud protseduuri määratakse parandusteguri  $K_t$  väärtus vastavalt tabelis 5.11 esitatud paameetritele:

$$K_t = 0,899 \quad (5.32)$$

Seega normaaltingimustele taandatud  $U_{50}$  on:

$$U_{50} = \frac{U_{50}^*}{K_t} = \frac{548,8}{0,899} = 610 \text{ kV} \quad (5.33)$$

### 5.6.2 Katsetulemused negatiivse polaarsusega pingega

Katsetulemused on esitatud lisas 13.

Kasutades valemit 4.4 ja lisas 13 esitatud katsetulemusi määratakse hinnanguline  $U_{50}^*$  väärtus:

$$U_{50}^* = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k U_i = -588,9 \text{ kV} \quad (5.34)$$

Tabel 5.12 Fikseeritud atmosfääripaarametrid negatiivse polaarsusega pingega katsel

Temperatuur, °C	Absoluutne rõhk, hPa	Õhuniiskus, %
20,6	998,8	12

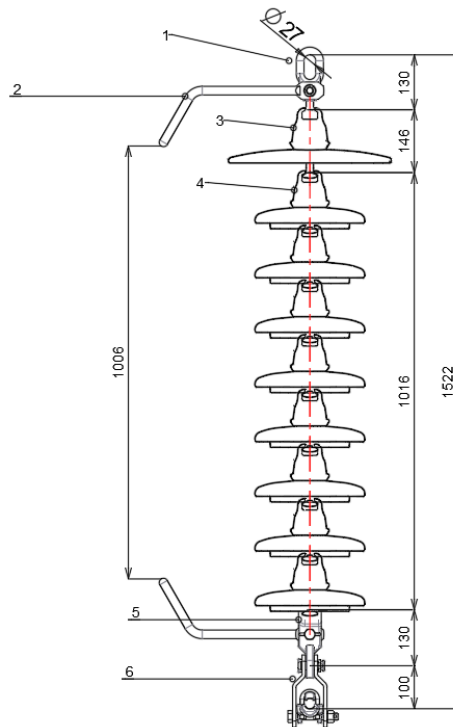
Kasutades peatükis 4.2 kirjeldatud punktis 5.1.1 läbi tehtud protseduuri määratakse parandusteguri  $K_t$  väärtus vastavalt tabelis 5.12 esitatud paameetritele:

$$K_t = 0,916 \quad (5.35)$$

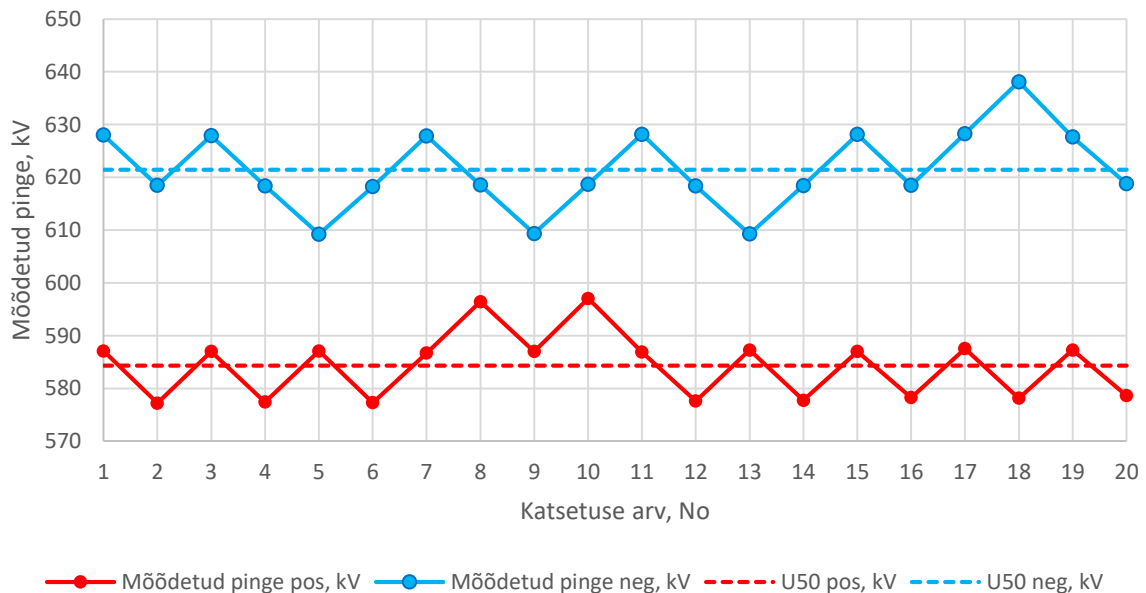
Seega normaaltingimustele taandatud  $U_{50}$  on:

$$U_{50} = \frac{U_{50}^*}{K_t} = \frac{-588,9}{0,916} = -643 \text{ kV} \quad (5.36)$$

## 5.7 Isolaatorkett 1 U120AD + 8 U70BS isolaatorit + sädevahemiku sarved



Joonis 5.13 Isolaatorkett 1 U120AD + 8 U70BS + sädevahemiku sarved kus, 1 – kinnitussõlm, 2 – sädevahemik, 3 – U120AD isolaator, 4 – U70BS, 5 – pesaplaat, 6 – kandeklemm.



Joonis 5.14 Isolaatorketti 1 U120AD + 7 U70BL + sädevahemiku sarved katsetulemused negatiivse ja positiivse polaarsusega pingega

### 5.7.1 Katsetulemused positiivse polaarsusega pingega

Katsetulemused on esitatud lisas 14.

Kasutades valemit 4.4 ja lisas 14 esitatud katsetulemusi määratakse hinnanguline  $U_{50}^*$  väärtus:

$$U_{50}^* = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k U_i = 584,3 \text{ kV} \quad (5.37)$$

Tabel 5.13 Fikseeritud atmosfääripaarametrid positiivse polaarsusega pingega katsel

Temperatuur, °C	Absoluutne rõhk, hPa	Õhuniiskus, %
21,6	999,6	32

Kasutades peatükis 4.2 kirjeldatud ja punktis 5.1.1 läbi tehtud protseduuri määratakse parandusteguri  $K_t$  väärtus vastavalt tabelis 5.13 esitatud parameetritele:

$$K_t = 0,938 \quad (5.38)$$

Seega normaaltingimustele taandatud  $U_{50}$  on:

$$U_{50} = \frac{U_{50}^*}{K_t} = \frac{584,3}{0,938} = 622,7 \text{ kV} \quad (5.39)$$

### 5.7.2 Katsetulemused negatiivse polaarsusega pingega

Katsetulemused on esitatud lisas 15.

Kasutades valemit 4.4 ja lisas 15 esitatud katsetulemusi määratakse hinnanguline  $U_{50}^*$  väärtus:

$$U_{50}^* = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k U_i = -621,8 \text{ kV} \quad (5.40)$$

Tabel 5.14 Fikseeritud atmosfääripaarametrid negatiivse polaarsusega pingega katsel

Temperatuur, °C	Absoluutne rõhk, hPa	Õhuniiskus, %
21,3	999,5	32,3

Kasutades peatükis 4.2 kirjeldatud punktis 5.1.1 läbi tehtud protseduuri määratakse parandusteguri  $K_t$  väärtus vastavalt tabelis 5.14 esitatud parameetritele:

$$K_t = 0,934 \quad (5.41)$$

Seega normaaltingimustele taandatud  $U_{50}$  on:

$$U_{50} = \frac{U_{50}^*}{K_t} = \frac{-621,8}{0,934} = -666 \text{ kV} \quad (5.42)$$



## 6 KATSETULEMUSTEST ISOLAATORKETTIDE TALUVUSPINGE MÄÄRAMINE

Isetaastuva isolatsiooni võimet taluda elektrilisi mõjutusi, mille on põhjustanud etteantud kujuga impulsid, võib kirjeldada matemaatilise statistika abil. Teatud isolatsiooni läbilöögi tõenäosuse  $P$  mingi teatud kindla kuju ja muutuva amplituudiga impulsside puhul saab määrata rakendatud pinge iga võimaliku väärtuse jaoks. Funktsioon  $P$  antakse tavaliselt matemaatilise funktsioonina, mis on täielikult kirjeldatav oma parameetrite  $U_{50\%}$ ,  $\sigma$  ja  $N$  abil. [6]

Standard EN 60071-2 soovib kasutada modifitseeritud Weibulli jaotusfunktsiooni, mille parameetrid on kindlaks määratud nii, et ta vastaks normaaljaotusele 50% ja 16% sildavlahenduse tõenäosuse juures ja see jaotus oleks lõigatud kohal  $U_{50\%} - 3 \cdot \sigma$ . Õhkvaheemiku nõutava taluvuspinge  $U_{rw}$  võib sel juhul avaldada funktsioonina õhkvaheemiku 50% taluvuspinge  $U_{50\%}$  kaudu [6]:

$$U_{rw} = U_{90\%} = U_{50\%} - N \cdot \sigma \quad (6.1)$$

Kus  $U_{90\%}$  – õhkvaheemiku 90% taluvuspinge;

$U_{50\%}$  – õhkvaheemiku 50% taluvuspinge;

$\sigma$  – standardhälve;

$N$  – nõutava taluvuspingele  $U_{rw}$  vastav standardhälvete kordsus.

**Transientliigpingete** (kiire ja aeglase tõusuga liigpingete) puhul on nõutavaks statistiliseks taluvuspingeks  $U_{rw}$  õhkvaheemiku 90% taluvuspinge  $U_{90\%}$ . Õhkvaheemiku 50% taluvuspinge  $U_{50\%}$  kaudu on see avaldatav järgmise seose abil:

$$U_{rw} = U_{90\%} = U_{50\%} - 1,3 \cdot \sigma \quad (6.2)$$

**Võrgusageduspingete** jaoks on vaadeldava õhkvaheemiku nõutav taluvuspinge  $U_{rw}$  määratud valemiga:

$$U_{rw} = U_{100\%} = U_{50\%} - 3 \cdot \sigma \quad (6.3)$$

Kus standardhälve  $\sigma$  on avaldatav 50% taluvuspinge  $U_{50\%}$  kaudu:

$$\sigma = z \cdot U_{50\%} \quad (6.4)$$

Kus variatsiooniteguri  $z$  väärtused on toodud tabelis 6.1

Tabel 6.1 variatsioonitegur z väärtused [6]

Kiire tõusuga liigpinged	Aeglase tõusuga liigpinged	Võrgusageduspinged
$z=0,03$	$z=0,06$	$z=0,03$

Eelnevalt nimetatud standardsete hälvete juures on arvesse võetud atmosfääritingimuste mõju.

Sel juhul võib õhkvaheemiku nõutava taluvuspinge  $U_{rw}$  avaldada hälbeteguri  $K_z$  kaudu:

$$U_{rw} = K_z \cdot U_{50\%} \quad (6.5)$$

Hälbeteguri  $K_z$  väärtused on esitatud tabelis 6.2

Tabel 6.2 Hälbeteguri  $K_z$  väärtused [6]

Kiire tõusuga liigpinged	Aeglase tõusuga liigpinged	Võrgusageduspinged
$K_{z_{ff}} = 0,961$	$K_{z_{sf}} = 0,922$	$K_{z_{pf}} = 0,910$

Seega leitakse isolaatorkettide 90% taluvuspinge  $U_{90\%ff_{ins}}$  väärtus kasutades valemit 6.5 ja hälbeteguri  $K_z$  väärtusi vastavalt tabelile 6.2. Saadud tulemused on esitatud tabelites 6.3 ja 6.4.

Tabel 6.3 Katsetulemustest õhkvaheemiku nõutava taluvuspinge  $U_{rw}$  avaldamine positiivse polaarsusega pingele

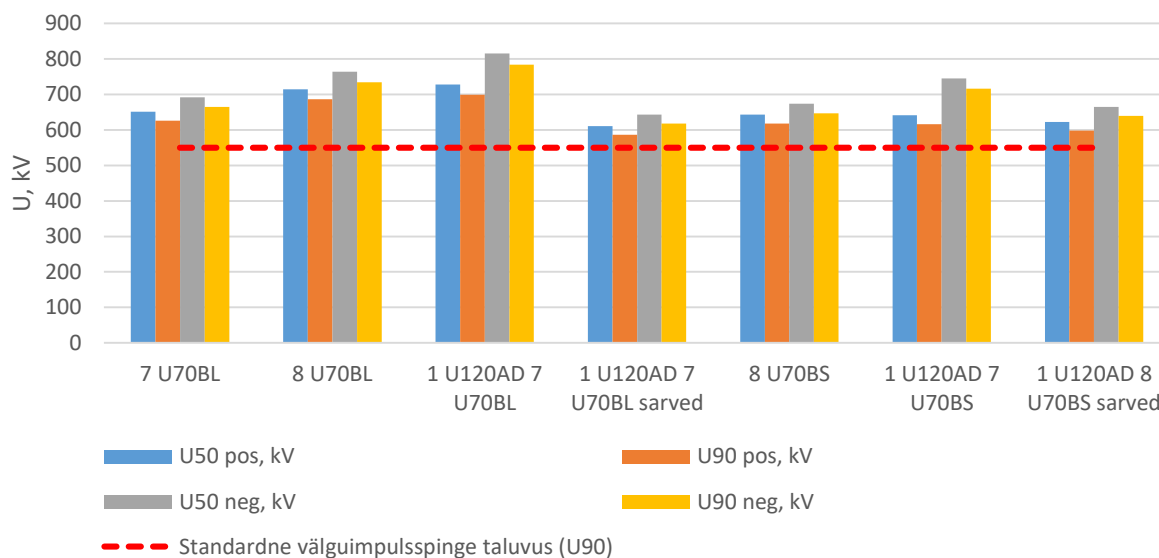
Isolaatorkett	$U_{50\%r}$ kV	$U_{90\%}$ kiire tõus, kV	$U_{90\%}$ aeglane tõus, kV	$U_{100\%}$ võrgusagedus, kV
7 U70BL	651	626	600	593
8 U70BL	715	687	659	650
1 U120AD 7 U70BL	728	699	671	662
1 U120AD 7 U70BL sarved	610	587	563	555
8 U70BS	643	618	593	585
1 U120AD 7 U70BS	641	616	591	584
1 U120AD 8 U70BS sarved	623	598	574	567

Tabel 6.4 Katsetulemustest õhkvaheemiku nõutava taluvuspinge  $U_{rw}$  avaldamine negatiivse polaarsusega pingele

<b>Isolaatorkett</b>	<b><math>U_{50\%r}</math> kV</b>	<b><math>U_{90\%}</math> kiire tõus, kV</b>	<b><math>U_{90\%}</math> aeglane tõus, kV</b>	<b><math>U_{100\%}</math> võrgusagedus, kV</b>
7 U70BL	-692	-665	-638	-630
8 U70BL	-764	-735	-705	-696
1 U120AD 7 U70BL	-808	-776	-745	-735
1 U120AD 7 U70BL sarved	-643	-618	-593	-585
8 U70BS	-673	-647	-621	-613
1 U120AD 7 U70BS	-746	-716	-687	-678
1 U120AD 8 U70BS sarved	-666	-640	-614	-606

## 7 JÄRELDUSED TÖÖ TULEMUSTEST

Katsetulemustest selgub, et ühegi isolaatorketi liigpingetaluvus pole alla lisas 1 kajastatud standardse liigpingetaluvuse 110 kV võrgu korral, ehk alla 550 kV. Sellest võib järeldada, et Eesti 110 kV põhivõrgus kasutusel olevad isolaatorkettid taluvad liigpingeid ka suurematel väärtustel kui standardis nõutud. Sellega võivad kaasneda ka probleemid, nimelt liigpingete puhul, mis ei ületa liigpingetaluvuse väärtust ei teki isolaatorkettidel ülelööki ja liigpingelaine levib edasi alajaama. Alajaamad on küll kaitstud liigpingete eest liigpingepiirikutega, kuid kui liigpingepiirikute dimensioneerimisel on arvestatud standardse liigpingetaluvusega, mitte antud õhuliinil oleva isolatsiooni tugevusega. Suuremad liigpingelained võivad aga põhjustada liigpingepiirikule täiendavaid koormuseid. Siiski antud asjaolu lähemalt ei uuritud, sest see polnud käesoleva töö eesmärgiks.



Joonis 7.1 Töös kajastatud isolaatorkettide  $U_{50}$ ,  $U_{90}$  parameetrite väärtused

Ühtlasi on näha, et isolaatorkettide liigpingetaluvus, millel pole ülemist suuremat isolaatorit (U120AD), erineb positiivse ja negatiivse polaarsusega liigpingetaluvus kõikidel kettidel ca 5-7%. Isolaatorkettidel, millel on paigaldatud ülemiseks isolaatoriks suurema diameetriga U120AD isolaator on antud erinevus seevastu 12-16%. Negatiivse polaarsusega saadud suuremad väärtused on kooskõlas ka varasemate isolaatorite katsetuste tulemustega [10]. Antud asjaolu võib põhjendada ebaühtlaste elektriväljadega elektroodide ümber. Äikselöökidest põhjustatud liigpinged on 90% tõenäosusega negatiivse polaarsusega seega antud olukorras on negatiivse polaarsusega liigpingetaluvuse parameetril veel eriti oluline roll.

Katsetuste vaatlustulemustel fikseeriti kõikide isolaatorkettide nii positiivse kui ka negatiivse polaarsusega katsepingel olukorrad, kus ülelööb toimus kas osaliselt või täielikult mööda isolaatorite pinda. Tabelites 7.1 ja 7.2 on esitatud katsetuste vaatlustulemustel fikseeritud ülelöögil tekkiva elektriikaare asukoht isolaatorketti suhtes. Tabelist on näha, et ilma sädevahemiku sarvedeta toimusid isolaatorkettidel ülelöögid peamiselt kas siis osaliselt või täielikult mööda isolaatorite pinda. Isolaatorketti ülelöögil tekkiv elektrikaar on väga suure temperatuuri ja plahvatusliku lööklainega, mis võib isolaatoreid ning ka isolaatorketti tarvikuid ja faasijuhet kahjustada ning seeläbi nende eluiga vähendada. Siiski katsetustel ükski isolaator ega isolaatorketti tarvik ei kahjustunud.

Tabel 7.1 Ülelöögil tekkiva elektriikaare asukoht isolaatorketti suhtes

Isolaatorkett	Ülelööb				Kokku (tk)
	Osaliselt või täielikult mööda isolaatorite pinda		Isolaatoritest mööda		
	Pos (tk)	Neg (tk)	Pos (tk)	Neg (tk)	
7 U70BL	10	9	0	0	19
8 U70BL	7	12	1	0	20
1 U120AD 7 U70BL	11	19	3	0	33
1 U120AD 7 U70BL sarved	0	0	13	11	24
8 U70BS	5	11	10	0	26
1 U120AD 7 U70BS	5	10	9	1	25
1 U120AD 8 U70BS sarved	0	0	12	10	22
Tabelis on toodud kõik vaatlustulemusel fikseeritud ülelöögid (sh katseseeria välised)					

Tabel 7.2 Ülelöögil tekkiva elektriikaare asukoht isolaatorketti suhtes protsentides

Isolaatorkett	Ülelööb			
	Osaliselt või täielikult mööda isolaatorite pinda		Isolaatoritest mööda	
	Pos (%)	Neg (%)	Pos (%)	Neg (%)
7 U70BL	100	100	0	0
8 U70BL	88	100	13	0
1 U120AD 7 U70BL	79	100	21	0
1 U120AD 7 U70BL sarved	0	0	100	100
8 U70BS	33	100	67	0
1 U120AD 7 U70BS	36	91	64	9
1 U120AD 8 U70BS sarved	0	0	100	100
Tabelis on toodud kõik vaatlustulemusel fikseeritud ülelöögid (sh katseseeria välised)				

Eelneva nähtuse tõkestamiseks on kasutusele võetud sädevahemiku sarved, mis juhivad elektrikaare isolaatorketist kaugemale. Kõikide katse korral, kus isolaatorketile olid paigaldatud sarved, toimusid ülelöögid ainult antud isolaatorkettide sarvede vahel. Seega lisades isolaatorkettidele sädevahemiku sarved võimaldab see pikendada isolaatorketi tarvikute ja faasijuhtme eluiga ning ühtlasi tuua isolaatorketi liigpingetaluvuse väärtust lähemale standardijärgsele 550 kV'le.

Tabel 7.2 Töös kajastatud isolaatorkettide  $U_{50}$ ,  $U_{90}$  parameetrite väärtuste positiivse ja negatiivse polaarsusega võrdlus

Isolaatorkett	Lühim ülelöögitree pikkus (mm)	$U_{50}$ pos, kV	$U_{90}$ pos, kV	$U_{50}$ neg, kV	$U_{90}$ neg, kV	Pos neg erinevus	Erinevus standardsest $U_{90}$ väärtusest (550 kV)
7 U70BL	1051	651	626	-692	-665	6.29%	+13.79%
8 U70BL	1235	715	687	-764	-735	6.97%	+24.86%
1 U120AD 7 U70BL	1287	728	699	-816	-784	12.08%	+27.17%
1 U120AD 7 U70BL sarved	989	610	587	-643	-618	5.37%	+6.64%
8 U70BS	1097	643	618	-673	-647	4.69%	+12.40%
1 U120AD 7 U70BS	1169	641	616	-746	-716	16.26%	+12.05%
1 U120AD 8 U70BS sarved	1006	623	598	-665	-639	6.82%	+8.80%

## KOKKUVÕTE

Käesoleva töö eesmärgiks oli välja selgitada erinevate Eesti 110 kV põhivõrgus kasutusel olevate isolaatorkettide liigpingetaluvus, mis saavutati läbi laboratoorsete mõõtmiste ning nende põhjal tehtud arvutuste ja saadud tulemuste analüüsil.

Lõputöös kirjeldati lähemalt võrgus esinevaid liigpingeid, milleks on aeglase ja kiire tõusuga ning võrgusageduslikud liigpinged. Kiire tõusuga liigpinged on põhjustatud põhiliselt välgulöökidest faasijuhtmesse. Aeglase tõusuga liigpingeteks nimetatakse impulsse, mis on põhjustatud liinide sisse ja välja lülitamistest. Võrgusageduslikud liigpinged on põhiliselt põhjustatud suurte koormuste lülitamistest. Võrgus esinevate eri tüüpi liigpingete tõttu on oluline tagada nõuetele vastav isolatsioon.

Elektrivõrgu täielikult isoleerimine pole majanduslikult otstarbekas ning teatud kohtades tuleb lubada ülelööke. Siiski ei tohi olla ülelöövide esinemise koht võrgus juhuslik. Selleks kasutatakse isolatsiooni koordinaatsiooni protseduuri, tagamaks eelnevalt kirjeldatud liigpingetele aktsepteeritava statistilise isolatsioonitaseme.

Isolatsiooni koordinaatsiooni protseduurist tulenevalt on ülelöövide esinemine statistiline, seega esitatakse õhuliinide isolaatorkettide liigpingetaluvust statistilise väärtusena ehk  $U_{90}$  pingena, mida võib kirjeldada kui pinge väärtust, mille korral 90% tõenäosusega ülelööki ei teki. Antud väärtust arvesse võttes saab teostada minimaalsete õhkvaheemike määramise, millest võib täpsemalt lugeda kolmandas peatükis.

Õhkvaheemike määramiseks vajamineva isolaatorketi  $U_{90\%}$  pinge on avaldatav  $U_{50\%}$  kaudu.  $U_{50\%}$  määramiseks on vaja teostada laboratoorsed katsed, mis antud töö käigus seitsme 110 kV isolaatorketiga läbi tehti.

Põhilisteks töö tulemusteks võib välja tuua järgmist:

- Eesti 110 kV põhivõrgus enim kasutuses olevate isolaatorkettide liigpingetaluvus on suurem, kui standardi EVS-EN IEC 60071-1:2020 järgi 550 kV;
- Lisades isolaatorketile ülemiseks isolaatoriks suurema diameetriga U120AD isolaatori, suureneb negatiivse polaarsusega liigpingetaluvus ca 12-16% ja kui kasutatakse sädevaheemiku sarvi;
- Teistel konfiguratsioonidel on negatiivse polaarsusega liigpingetaluvus 5-7% suurem;
- Isolaatorkettidel, millel pole sädevaheemiku sarvi, toimub ülelööki enamasti mööda isolaatorite pinda.

Töö tegija hinnangul on teostatud tööl suur praktiline väärtus, kuna leitud väärtused on kasutatavad nii õhuliinide projekteerimisel kui ka edaspidistes uuringutes. Näiteks kas võrgus levib liigpingeid, mis on suuremad kui standardne 110 kV võrgu liigpingetaluvus 550 kV ja väiksem kui käesolevas töös määratletud erinevate isolaatorkettide liigpingetaluvus? Juhul kui jah, siis, milline on selle mõju elektrivõrgu talitluskindlusele ning kas selliste liigpingete esinemise tõenäosus on piisavalt suur, et selle põhjal peaks muudatusi tegema?



## KASUTATUD KIRJANDUSE LOETELU

- [1] F. Kiessling, P. Nefzger, J. F. Nolasco ja U. Kaintzyk, *Overhead Power Lines*, Berlin, 2003.
- [2] V. Kamaraju ja M. Naidu, *High Voltage Engineering 2nd Edition*, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1995.
- [3] EVS-EN 50341-2-20:2018, Elektriõhuliinid vahelduvpingega üle 1 kV. Osa 2-20: Eesti siseriiklikud erinõuded (SEN).
- [4] D. C. R. Bayliss, *Transmission and Distribution Electrical Engineering*, Elsevier Ltd, 1999.
- [5] Ü. Treufeldt, *Kõrgepingetehnika loengukonspekt*, 2010.
- [6] EVS-EN 50341-1:2013 Elektriõhuliinid vahelduvpingega üle 1 kV. Osa 1: Üldnõuded. Ühised eeskirjad.
- [7] EVS-EN IEC 60071-1:2020. Isolatsiooni koordineerimine. Osa 1: Määratlused, põhimõtted ja reeglid.
- [8] W. Zaengl ja E. Kuffel, *High Voltage Engineering*, Pergamon press, 1992.
- [9] EVS-EN 60060-1:2010. Kõrgepinge katsetehnika. Osa 1: Üldised määratlused ja katsenõuded.
- [10] I. Kiitam, M. Saarna, P. Taklaja, M. Tealane ja I. Palu, „Electrical and Mechanical Properties of Service-aged Medium Voltage Porcelain Support Insulators,“ *IEEE International Energy Conference (ENERGYCon)*, Gammarth, Tunisia, 2020.

## LISA 1

klassi I ( $1 \text{ kV} < U_m < 245 \text{ kV}$ ) standardsed isolatsiooninivood [7]

Seadmete suurim lubatud pinge $U_m$ kV (efektiivväärtus)	Standardne lühiajaline võrgusagedusega normtaluvuspinge kV (efektiivväärtus)	Standardne välguimpulss-normtaluvuspinge kV (tippväärtus)
3,6	10	20
		40
7,2	20	40
		60
12	28	60
		75
		95
17,5*	38	75
		95
24	50	95
		125
		145
36	70	145
		170
52*	95	250
72,5	140	325
100 <sup>b</sup>	(150)	(380)
	185	450
123	(185)	(450)
	230	550
145	(185)	(450)
	230	550
	275	650
170*	(230)	(550)
	275	650
	325	750
245	(275)	(650)
	(325)	(750)
	360	850
	395	950
	460	1 050

## Lisa 2

### 8 U70BL katsetulemused positiivse polaarsusega pingega

Positiivne polaarsus				
nr	Laadimis- pinge (kV)	Lainekuju	Isolaatori ping tippväärtus (kV)	Lõikeaeg ( $\mu$ s)
1	680	tailchopped	654.275	14.067
2	670	tailchopped	644.91	12.794
3	660	full	635.741	51.109
4	670	full	645.04	51.204
5	680	tailchopped	654.47	17.649
6	670	tailchopped	645.42	16.85
7	660	full	635.34	51.187
8	670	tailchopped	645.571	16.927
9	660	full	635.979	51.074
10	670	tailchopped	645.973	17.622
11	660	full	636.109	51.177
12	670	tailchopped	645.68	17.942
13	660	full	636.467	51.223
14	670	full	645.062	51.333
15	680	full	654.513	51.287
16	690	tailchopped	664.312	16.426
17	680	tailchopped	654.557	16.544
18	670	full	645.539	51.316
19	680	tailchopped	655.142	16.073
20	670	full	645.593	51.305

## Lisa 3

### 8 U70BL katsetulemused negatiivse polaarsusega pingega

Negatiivne polaarsus				
nr	Laadimis- pinge (kV)	Lainekuju	Isolaatori ping tippväärtus (kV)	Lõikeaeg ( $\mu$ s)
1	740	tailchopped	-716.792	10.382
2	730	tailchopped	-707.178	13.969
3	720	full	-697.455	50.947
4	730	tailchopped	-707.46	10.737
5	720	tailchopped	-697.424	14.095
6	710	tailchopped	-688.113	34.266
7	700	full	-679.128	50.983
8	710	tailchopped	-688.861	16.978
9	700	full	-678.835	51.026
10	710	full	-688.319	51.025
11	720	tailchopped	-698.096	11.501
12	710	tailchopped	-688.46	17.695
13	700	full	-678.478	50.981
14	710	tailchopped	-688.308	21.575
15	700	tailchopped	-678.987	24.591
16	690	full	-668.85	51.05
17	700	full	-679.236	51.037
18	710	tailchopped	-688.688	23.256
19	700	full	-678.684	51.025
20	710	tailchopped	-688.46	15.065

## Lisa 4

Isolaatorketi 1 U120AD + 7 U70BL katsetulemused positiivse polaarsusega pingega

<b>Positiivne polaarsus</b>				
nr	Laadimis- pinge (kV)	Lainekuju	Isolaatorketi pinge tippväärtus (kV)	Lõikeaeg ( $\mu$ s)
1	690	tailchopped	664,561	17,309
2	680	tailchopped	654,719	27,989
3	670	tailchopped	645,485	26,622
4	660	full	636,294	51,188
5	670	full	645,669	51,237
6	680	tailchopped	654,676	18,864
7	670	full	645,821	51,31
8	680	tailchopped	655,012	13,86
9	670	full	645,615	51,264
10	680	tailchopped	654,947	16,026
11	670	full	646,276	51,326
12	680	tailchopped	654,99	15,383
13	670	full	645,528	51,287
14	680	tailchopped	654,633	15,203
15	670	full	645,756	51,311
16	680	full	654,503	51,364
17	690	tailchopped	664,68	12,397
18	680	full	654,99	12,397
19	690	tailchopped	664,69	17,693
20	680	tailchopped	654,904	16,845

## Lisa 5

Isolaatorketi 1 U120AD + 7 U70BL katsetulemused negatiivse polaarsusega pingega

Negatiivne polaarsus				
nr	Laadimis- pinge (kV)	Lainekuju	Isolaatorketi pinge tippväärtus (kV)	Lõikeaeg ( $\mu$ s)
1	790	tailchopped	-764,786	9,14
2	780	full	-754,89	51,162
3	790	tailchopped	-764,807	8,097
4	780	tailchopped	-755,334	10,615
5	770	full	-755,872	51,178
6	780	tailchopped	-756,245	6,374
7	770	full	-745,395	51,201
8	780	tailchopped	-755,107	11,562
9	770	tailchopped	-745,601	11,492
10	760	full	-735,749	51,204
11	770	tailchopped	-745,645	9,302
12	760	full	-735,782	51,209
13	770	tailchopped	-745,641	14,961
14	760	full	-735,912	51,241
15	770	tailchopped	-745,33	10,842
16	760	full	-736,15	51,207
17	770	tailchopped	-745,374	8,825
18	760	tailchopped	-735,944	15,712
19	750	tailchopped	-727,295	17,334
20	740	tailchopped	-717,562	12,767

## Lisa 6

Isolaatorketi 7 U70BS katsetulemused positiivse polaarsusega pingega

<b>Positiivne polaarsus</b>				
nr	Laadimis- pinge (kV)	Lainekuju	Isolaatorketi pinge tippväärtus (kV)	Lõikeaeg ( $\mu$ s)
1	600	tailchopped	579,95	14,632
2	590	full	570,145	51,048
3	600	full	570,426	51,111
4	610	full	588,809	51,04
5	620	full	598,51	51,105
6	630	tailchopped	607,409	9,424
7	620	tailchopped	598,131	10,681
8	610	tailchopped	588,441	11,988
9	600	full	579,293	51,08
10	610	full	588,604	51,099
11	620	tailchopped	597,892	11,8
12	610	full	598,495	51,064
13	620	tailchopped	598,488	11,164
14	610	tailchopped	588,246	10,66
15	600	full	579,141	51,037
16	610	tailchopped	588,777	12,885
17	600	full	578,99	51,074
18	610	full	589,124	51,117
19	620	full	598,564	51,139
20	630	tailchopped	607,3	11,27

## Lisa 7

Isolaatorketi 7 U70BS katsetulemused negatiivse polaarsusega pingega

Negatiivne polaarsus				
nr	Laadimis- pinge (kV)	Lainekuju	Isolaatorketi pinge tippväärtus (kV)	Lõikeaeg ( $\mu$ s)
1	630	tailchopped	-610	15,244
2	620	full	-600,732	50,777
3	630	tailchopped	-610,855	18,276
4	620	full	-600,678	50,824
5	630	full	-611,083	50,777
6	640	tailchopped	-619,961	16,742
7	630	tailchopped	-610,646	24,151
8	620	full	-601,371	50,764
9	630	full	-610,66	50,832
10	640	tailchopped	-620,003	17,974
11	630	full	-610,4	50,935
12	640	tailchopped	-620,458	12,179
13	630	full	-611,05	50,91
14	640	tailchopped	-620,382	11,364
15	630	full	-610,942	50,923
16	640	tailchopped	-619,938	12,153
17	630	full	-910,79	50,934
18	640	tailchopped	-620,339	11,039
19	630	full	-610,812	50,864
20	640	tailchopped	-620,447	12,232



## Lisa 8

Isolaatorkett 1 U120AD + 7 U70BS isolaatorit katsetulemused positiivse polaarsusega pingega

Positiivne polaarsus				
nr	Laadimis-pinge (kV)	Lainekuju	Isolaatorketi pinge tippväärtus (kV)	Lõikeaeg ( $\mu$ s)
1	630	tailchopped	608,016	12,921
2	620	tailchopped	599,182	15,618
3	610	full	588,842	50,998
4	620	full	598,423	51,05
5	630	full	608,005	51,134
6	640	tailchopped	618,117	9,472
7	630	tailchopped	607,972	19,538
8	620	full	599,182	51,05
9	630	tailchopped	607,994	16,989
10	620	tailchopped	599,03	18,056
11	610	full	588,734	51,115
12	620	tailchopped	598,781	19,641
13	610	full	588,658	51,057
14	620	tailchopped	598,261	16,152
15	610	full	588,593	51,094
16	620	tailchopped	598,781	16,245
17	610	full	589,641	51,009
18	620	full	598,911	51,085
19	630	tailchopped	607,766	12,824
20	620	tailchopped	598,326	26,793

## Lisa 9

Isolaatorkett 1 U120AD + 7 U70BS isolaatorit katsetulemused negatiivse polaarsusega pingega

Negatiivne polaarsus				
nr	Laadimis-pinge (kV)	Lainekuju	Isolaatorketi pinge tippväärtus (kV)	Lõikeaeg ( $\mu$ s)
1	720	tailchopped	-697,705	16,828
2	710	full	-688,362	50,924
3	720	full	-697,564	50,045
4	730	full	-706,897	51,04
5	740	tailchopped	-716,684	8,83
6	730	full	-706,766	51,075
7	740	tailchopped	-716,695	5,187
8	730	full	-707,146	50,947
9	740	tailchopped	-716,142	6,625
10	730	full	-706,723	51,108
11	740	tailchopped	-716,944	5,73
12	730	tailchopped	-706,593	7,659
13	720	tailchopped	-697,369	11,612
14	710	full	-687,604	11,612
15	720	full	-696,968	51,064
16	730	tailchopped	-706,658	11,842
17	720	full	-697,218	51,084
18	730	tailchopped	-706,886	8,108
19	720	tailchopped	-697,402	11,897
20	710	full	-687,712	51,046

## Lisa 10

Isolaatorketi 8 U70BS katsetulemused positiivse polaarsusega pingega

Positiivne polaarsus				
nr	Laadimis- pinge (kV)	Lainekuju	Isolaatorketi pinge tippväärtus (kV)	Lõikeaeg ( $\mu$ s)
1	650	tailchopped	626,322	9,725
2	640	tailchopped	617,619	10,483
3	630	tailchopped	607,69	17,153
4	620	tailchopped	598,293	14,595
5	610	full	588,755	51,018
6	620	full	599,171	50,87
7	630	full	607,539	51,056
8	640	tailchopped	617,098	10,056
9	630	full	607,582	10,412
10	640	tailchopped	616,892	10,681
11	630	full	608,124	50,94
12	640	tailchopped	617,315	10,61
13	630	tailchopped	607,315	10,61
14	620	full	598,304	51,004
15	630	tailchopped	608,709	12,538
16	620	tailchopped	599,399	11,38
17	610	tailchopped	588,885	14,62
18	600	full	579,358	50,979
19	610	tailchopped	589,853	14,756
20	600	full	580,258	50,948

## Lisa 11

Isolaatorketi 8 U70BS katsetulemused positiivse polaarsusega pingega

Negatiivne polaarsus				
nr	Laadimis-pinge (kV)	Lainekuju	Isolaatorketi pinge tippväärtus (kV)	Lõikeaeg ( $\mu$ s)
1	660	tailchopped	-639,274	19,037
2	650	full	-629,476	50,951
3	660	tailchopped	-639,61	18,662
4	650	full	-630,083	50,854
5	660	tailchopped	-639,794	13,135
6	650	full	-629,617	50,89
7	660	full	-639,751	50,896
8	670	tailchopped	-649,929	20,259
9	660	full	-640,065	10,417
10	650	full	-629,519	50,935
11	660	tailchopped	-639,86	13,573
12	650	full	-629,975	50,925
13	660	tailchopped	-639,686	9,709
14	650	tailchopped	-630,191	11,895
15	640	tailchopped	-620,708	15,522
16	630	full	-611,029	50,83
17	640	full	-620,545	50,892
18	650	tailchopped	-630,354	15,759
19	640	full	-620	50,939
20	650	tailchopped	-630,094	12,197

## Lisa 12

Isolaatorketi 1 U120AD + 7 U70BL + sädevahemiku sarved katsetulemused positiivse polaarsusega pingega

Positiivne polaarsus				
nr	Laadimis-pinge (kV)	Lainekuju	Isolaatorketi pinge tippväärtus (kV)	Lõikeaeg ( $\mu$ s)
1	570	tailchopped	550,267	14,776
2	560	full	541,228	50,817
3	570	full	550,397	50,86
4	580	tailchopped	559,719	13,119
5	570	full	551,373	50,87
6	580	tailchopped	560,098	23,013
7	570	tailchopped	550,441	23,013
8	560	full	540,892	51,068
9	570	tailchopped	550,961	19,258
10	560	full	540,697	51,04
11	570	tailchopped	551,254	13,903
12	560	full	541,304	50,904
13	570	tailchopped	551,189	13,74
14	560	full	541,239	50,943
15	570	tailchopped	550,993	18,651
16	560	full	541,64	50,915
17	570	full	550,82	51,051
18	580	tailchopped	560,607	11,57
19	570	tailchopped	550,419	26,391
20	560	full	541,141	50,905

## Lisa 13

Isolaatorketi 1 U120AD + 7 U70BL + sädevahemiku sarved katsetulemused negatiivse polaarsusega pingega

Negatiivne polaarsus				
nr	Laadimis-pinge (kV)	Lainekuju	Isolaatorketi pinge tippväärtus (kV)	Lõikeaeg ( $\mu$ s)
1	620	tailchopped	-601,198	17,258
2	610	full	-591,736	50,77
3	620	tailchopped	-601,642	10,46
4	610	full	-591,335	13,217
5	600	tailchopped	-582,024	16,742
6	590	full	-572,497	50,801
7	600	full	-581,786	50,844
8	610	tailchopped	-591,855	14,724
9	600	full	-582,176	50,806
10	610	tailchopped	-591,931	12,437
11	600	full	-582,198	50,721
12	610	tailchopped	-592,018	14,341
13	600	full	-582,371	50,74
14	610	tailchopped	-592,115	16,823
15	600	tailchopped	-581,981	17,1
16	590	full	-572,508	50,804
17	600	full	-582,306	50,794
18	610	full	-592,224	50,681
19	620	full	-601,523	50,782
20	630	full	-611,3	50,832

## Lisa 14

Isolaatorketi 1 U120AD + 8 U70BS + sädevahemiku sarved katsetulemused positiivse  
polaarsusega pingega

Positiivne polaarsus				
nr	Laadimis- pinge (kV)	Lainekuju	Isolaatorketi pinge tippväärtus (kV)	Lõikeaeg ( $\mu$ s)
1	610	tailchopped	587,079	10,926
2	600	full	577,19	50,93
3	610	tailchopped	586,99	18,51
4	600	full	577,421	50,956
5	610	tailchopped	587,079	15,39
6	600	full	577,296	50,998
7	610	full	586,697	50,95
8	620	tailchopped	596,417	8,384
9	610	full	587,008	51,042
10	620	tailchopped	597,048	8,443
11	610	tailchopped	586,862	17,798
12	600	full	577,581	50,947
13	610	tailchopped	587,266	11,577
14	600	full	577,75	51,021
15	610	tailchopped	586,99	13,405
16	600	full	578,257	50,925
17	610	tailchopped	587,541	12,753
18	600	full	578,132	50,962
19	610	tailchopped	587,266	12,395
20	600	tailchopped	578,63	14,887

## Lisa 15

Isolaatorketi 1 U120AD + 8 U70BS + sädevahemiku sarved katsetulemused negatiivse  
polaarsusega pingega

Negatiivne polaarsus				
nr	Laadimis- pinge (kV)	Lainekuju	Isolaatorketi pinge tippväärtus (kV)	Lõikeaeg ( $\mu$ s)
1	650	tailchopped	-627,997	12,049
2	640	full	-618,472	50,758
3	650	tailchopped	-627,89	12,054
4	640	tailchopped	-627	13,629
5	630	full	-609,241	50,851
6	640	full	-618,232	50,883
7	650	tailchopped	-627,837	12,158
8	640	tailchopped	-618,543	22,675
9	630	full	-609,339	50,83
10	640	full	-618,694	50,884
11	650	tailchopped	-628,139	15,806
12	640	tailchopped	-618,348	18,295
13	630	full	-609,259	50,918
14	640	full	-618,454	50,802
15	650	tailchopped	-628,13	15,849
16	640	full	-618,49	50,876
17	650	full	-628,264	50,779
18	660	tailchopped	-638,108	11,337
19	650	tailchopped	-627,626	11,551
20	640	full	-618,792	50,806