



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

# **Osalahenduste mõõtmine**

## **keskpingekaablites**

**Elektroenergeetika õppekava**

**Kõrgepingetehnika õppetool**

**Magistritöö**

Õppetooli juhataja

professor Ivo Palu

Juhendaja

vanemteadur Paul Taklaja

Lõpetaja

Jüri Klaassen

**Tallinn 2016**

# Autorideklaratsioon

Deklareerin, et käesolev lõputöö, mis on minu iseseisva töö tulemus, on esitatud Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika instituudile haridusastme lõpudiplomi taotlemiseks elektroenergeetika erialal. Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Lõpetaja (allkiri ja kuupäev) \_\_\_\_\_

# Lõputöö kokkuvõte

<i>Autor:</i> Jüri Klaassen	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> Osalahenduste mõõtmine kaabelliinides	
<i>Kuupäev:</i> 27.05.2016	61 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Energeetikateaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika instituut	
<i>Õppetool:</i> Kõrgepingetehnika õppetool	
<i>Töö juhendaja(d):</i> vanemteadur Paul Taklaja	
<i>Töö konsultant (konsultandid):</i>	
<i>Sisu kirjeldus:</i>	
<p>Käesolev töö on informatiivne lühiülevaade osalahendustest, osalahenduste mõõteviisidest ja osalahenduste mõõtmise rakendamisest keskpinge kaabelliinidel.</p> <p>Parema ülevaate andmiseks on töö esimeses peatükis kirjeldatud osalahenduste olemust, selle tekkeprotsessi tagamaid ja osalahenduste tagajärjel tekkinud defekte kaabelliini isolatsioonis.</p> <p>Teises peatükis on kirjeldatud osalahenduste mõõtemetoodikat. Kirjeldatud on kolme erinevat mõõtemetodit, milleks on 50 Hz võrgupingel osalahenduste mõõtmine, sumbuvate võnkumiste meetodil (DAC) mõõtmine ja väga madala sagedusega (VLF) mõõtmine.</p> <p>Kolmandas peatükis on antud ülevaade rikete statistikast ja näitena toodud ühe kaabelliini osalahenduste mõõtmine Tallinna keskpingevõrgus. Samuti on antud ülevaade osalahenduste rakendusliku piirmäära määramise võimalusest ja kaablimanuste installeerimise kvaliteedi tõstmise meetmetest.</p>	
<i>Märksõnad:</i> osalahendus, muhv, DAC, VLF, mõõtmine	

# Summary of the Diploma Work

<i>Author:</i> Jüri Klaassen	<i>Kind of the work:</i> Master's Thesis
<i>Title:</i> Partial Discharge Measurement of MV Cables	
<i>Date:</i> 27.05.2016	61 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology <i>Faculty:</i> Faculty of Power Engineering <i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering <i>Chair:</i> High Voltage Engineering	
<i>Tutor(s) of the work:</i> Senior Researcher Paul Taklaja <i>Consultant(s):</i>	
<i>Abstract:</i> This work is a brief overview of partial discharges, types of partial discharge measurement techniques and the implementation of partial discharge measurement to a mid-voltage cable. The first chapter describes partial discharge as a phenomenon, propagation of the process and introduces defects in cable insulation caused by partial discharges. In the second chapter, the methods of partial discharge measurement are described. It takes a closer look at the three main methods for electrical measurement of partial discharges: continuous alternating current method (50 Hz AC), damped alternating current method (DAC) and very low frequency method (VLF). The third chapter is a summary of power outages in the distribution grid of Tallinn in the past year. There is an overview of partial discharge measurements implemented to a cable that belongs to the distribution grid of Tallinn. The measures for raising the installing quality of HV apparatus and the ways to set limits of partial discharge occurring in HV apparatus are also discussed in the last chapter.	
<i>Key words:</i> partial discharge, joint, DAC, VLF, measurement	

# Sisukord

<b>Lõputöö ülesanne.....</b>	<b>6</b>
<b>Eessõna.....</b>	<b>8</b>
<b>Sissejuhatus.....</b>	<b>9</b>
<b>1. Osalahendused keskpinge kaablites .....</b>	<b>12</b>
1.1. Osalahenduse definitsioon .....	12
1.2. Ülevaade ajaloost .....	12
1.3. Osalahenduste tekkimine .....	13
1.4. Üldist keskpinge kaablites ja kaabli riketest .....	15
1.5. Kaablite isolatsioon.....	16
1.5.1. Dendriidid kaabli isolatsioonis .....	17
1.5.2. Vesipuud kaabli isolatsioonis .....	18
1.5.3. Tahke dielektriku läbilöög .....	20
<b>2. Osalahenduste mõõtmine.....</b>	<b>22</b>
2.1. Osalahenduste amper-sekund karakteristikud .....	22
2.2. Peamised mõõdetavad suurused .....	24
2.3. Osalahenduste mõõteahelad .....	24
2.4. Osalahenduste mõõtemetodid .....	28
2.4.1. Võrgusagedusliku vahelduvpingelise mõõtmise meetod (50Hz AC).....	28
2.4.2. Sumbuva vahelduvpingelise mõõtmise meetod (DAC).....	28
2.4.3. Väga madala sageduse meetod (VLF) .....	29
2.4.4. Mõõtmine alalispingega .....	31
2.4.5. Akustiline meetod.....	32
2.4.6. Elektromagnetlainete tuvastamine.....	32
2.5. Mõõtemetodite võrdlev analüüs .....	33
2.6. Segava müra vähendamine.....	34
2.7. Keskpinge kaablite osalahenduste mõõtmise protseduur .....	37
2.7.1. Kaabli lahtiühendamine.....	38
2.8. Osalahenduste mõõtmisel kasutatavad seadmed.....	39
<b>3. Osalahenduste mõõtmise rakendamine .....</b>	<b>43</b>
3.1. Rikete statistika .....	43
3.2. Teostatud mõõtmised jaotusvõrgus .....	45
3.2.1. Rakendatud mõõtemetod .....	45
3.2.2. Mõõtetulemused.....	46
3.3. Meetmed paigalduskvaliteedi parandamiseks .....	53
3.4. Osalahenduste rakenduslik piirmäär .....	54
<b>Lõputöö kokkuvõte.....</b>	<b>56</b>
<b>Kirjandus.....</b>	<b>59</b>

# Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:	<b>Osalahenduste mõõtmine keskpingekaablites</b>
Üliõpilane:	<b>Jüri Klaassen, 144156AAVM</b>
Lõputöö juhendaja:	<b>Paul Taklaja</b>
Õppetool:	<b>Kõrgepingetehnika õppetool</b>
Õppetooli juhataja:	<b>Ivo Palu</b>
Lõputöö esitamise tähtaeg:	<b>27.05.2016 kell 15:00</b>

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppetooli juhataja (allkiri)

## Teema põhjendus:

Teema olulisus väljendub praktiliste eesmärkide täitmisel. Tarvilik on selgitada, kas sihipäraste osalahenduste mõõtmisandmete kogumisel on võimalik elektrivõrgu kvaliteeti parandada ja selgitada välja keskpingekaableid, mille elukaar võib lõppeda eeldatavast varasemalt.

## Töö eesmärk:

Töö eesmärgiks on uurida osalahenduste mõõtmise praktilist väärtust ning selgitada välja, kas antud meetodit oleks mõistlik kasutada jaotusvõrgu talitluse parendamiseks.

## Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Osalahenduste mõõtmise mõistlikkus jaotusvõrgu seadmete eluea hindamisel
- Osalahenduste mõõtmiste tulemuste tõepärasus
- Osalahenduste mõõtmise protsessi kirjeldus
- Kas osalahenduste mõõtmisega saab määrata mingi kindla mõõtetulemuse, mille põhjal väita, et kaabli isolatsioon on kriitilisel määral kahjustunud?

**Lähteandmed:**

Plaanis on kasutada kättesaadavaid andmeid, mis pärinevad kirjandusvaramust või on leitud koostöös juhendajaga. Toetavaks materjaliks on Elektrilevi OÜ tellimisel TTÜ tehtud mõõtmised keskpinge kaablitele.

**Lõputöö konsultandid (vajadusel):**

\_\_\_\_\_  
Konsultant nimi (allkiri, kuupäev)

\_\_\_\_\_  
Konsultant nimi (allkiri, kuupäev)

# Sissejuhatus

Jaotusvõrgu elektritarbijate ootus võrguettevõttele on nende kvaliteetse elektrienergiaga varustamine võimalikult väheste elektrikatkestustega. Elektritarbijate ootuste täitmiseks peab võrguettevõtja elektrivõrku pidevalt uuendama ja hooldama. Elektrikatkestuste vältimiseks tehakse jaotusvõrgus igapäevaselt hooldus- ja remonttöid nagu näiteks õhuliini trasside puhastamine või kaabelliinide teimimine. Kui õhuliini trasside puhastamisel on võimalik üsna kindlalt öelda, milline puu kujutab tugeva tuulega liinile ohtu, siis kaabelliinide puhul on taolise hooldustöö tegemine pigem komplitseeritud. Tahtmatu sõnamänguna võib öelda, et ka kaabelliinidel toimuvate lühiste põhjuseks on liinil paiknevad puud, nimelt vesipuud. Tõepärase info huvides peab kohe ära mainima, et vesipuud ei ole siiski ainukesed lühiste põhjustajad kaabelliinidel.

Jaotusvõrgu elektriseadmetele rakendatakse elukaare jooksul erinevaid mõõtmisi nagu ülepingega teimimine, isolatsiooni kontroll, osalahenduste mõõtmine jne. Mõõtmiste tulemusel peab selguma, kas mõõdetav seade on kõlbulik jaotusvõrgu klientide elektrivarustuse tagamiseks. Käesolevas töös on vaadeldud lähemalt osalahenduste mõõtmise protsessi ja selle tulemuste kasutamist praktilistel eesmärkidel, vaadeldi ka teostatud osalahenduste mõõtmisi.

Osalahenduste mõõtmine on Eestis sisuliselt kaardistamata protsess. Lõputöö autorile teadaolevalt viidi esimesed elektrilised osalahenduste mõõtmised jaotusvõrgus läbi 2013. aastal Tallinna Tehnikaülikooli ja Aalto Ülikooli koostööna jaotusvõrguettevõtte Elektrilevi OÜ tellimusel. Antud töö eesmärgiks ongi osalahenduste mõõtemetodite, kasutatavate seadmete ja mõõtmiste tutvustamine. Analüüsitud on ka osalahenduste mõõtemetodite sobivust jaotusvõrgu kaabelliinide mõõtmisel ja nende hinnangu andmisel.

Käesolevat lõputööd võib pidada pigem informatiivseks ja analüütiliseks kokkuvõtteks osalahenduste mõõtmisest. See on lühike, kuid informatiivne ülevaade osalahenduste olemusest, nendega seotud nähtustest, osalahenduste mõõtmisest kekspingekaablites ja kriitilistest tegevustest, millega seoses on võimalik kogu jaotusvõrgu talitluskindlust olulisel määral parandada. Töös on antud ülevaade osalahenduste olemusest ja jaotusvõrgus olevatest peamistest kaablitüüpidest, mille tundmine on äärmiselt oluline kaabelliinis osalahenduste iseloomu määratlemiseks.



Investeeringute suunamisel jaotusvõrgu talitluskindluse parandamiseks on oluline analüüsida investeeringu tulemusel saadavat kasu. Osalahendute mõõtmisel saadav kasu peaks väljenduma rikete arvu kahanemises jaotusvõrgus.

Kaabelliinide testimine algab juba nende projekteerimisfaasis, kus katsetatakse erinevaid kaabli ehitusi näiteks elektrivälja ühtlustamiseks, kõik selle nimel, et kaabelliini eluiga oleks võimalikult pikk ja elukaar kulgeks talitlushäireteta. Järgnevalt viiakse testimised läbi kaabelliinide tootjatehastes, kus testimise põhjuseks on regulaarne kvaliteedikontroll. Pärast keskpinge kaabli tootmist on suur tõenäosus, et see ühendatakse mõne alajaama külge, kuid enne töösse panekut kaabelliin teimitakse. Kui kaabelliinil peaks tekkima lühis või seda vigastatakse kaevetööde käigus, läbib kaabel pärast rikke likvideerimist ja muhvide monteerimist uuesti teimimistsükli. Paraku ei ole võimalik pelgalt teimimisega välja selgitada, kas kaabli otsa- ja jätkumuhvide installatsiooni kvaliteet on rahuldav. Teimimine on kahtlemata äärmiselt oluline mõõteprotsess, selgitamaks välja, kuidas käitub testitava seadme isolatsioon normaaltalitluskorrast tugevamas elektriväljas. Siiski ei anna teimimine täielikku ülevaadet tehtud töö kvaliteedist ja selle abil ei ole võimalik prognoosida kaabelliini eeldatavat elukaare pikkust.

Jätku- ja otsamuhvide kvaliteedi hindamiseks on jaotusvõrgu ettevõttes Elektrilevi OÜ kaalutud osalahenduste mõõtmise kasutuselevõttu. Kui mõõtmised, nagu näiteks kaotangensi mõõtmine, annavad hinnangu kogu mõõdetava kaabelliini isolatsioonile, siis osalahenduste mõõtmine võimaldab avastada lokaalseid defekte. Defektid, mille tõttu tekivad kaabelliinis osalahendused, kipuvad enamjaolt ilmema just ebakvaliteetselt paigaldatud otsa- või jätkumuhvides.

Osalahenduste tekke ja mõjude protsessi paremaks mõistmiseks on esimeses peatükis defineeritud osalahenduse mõiste kui ka antud ülevaade osalahenduse tekkeprotsessist. Samuti on käsitletud osalahenduste mõõtmise ajalugu – millal osalahendused kui füüsikaline nähtus avastati ja millal oldi valmis osalahenduste olemasolu mõõtma. Kuna käesoleva töö teema hõlmab osalahenduste mõõtmist keskpingeliinides, on esimeses peatükis antud lühiülevaade Eesti jaotusvõrgus põhiliselt kasutusel olevatest kaabelliinide konstruktsioonidest – ristsillatud poüetüleeni ning paber-õli isolatsiooniga kaabelliini konstruktsioonist.

Osalahenduste kirjeldamiseks on sobilik paradoksaalse kõlaga väljend „põhjuslik tagajärg“, kuna uute või suurema laengutega osalahendustele loovad keskkonna esmased osalahendused. Osalahenduste tekkeprotsess on plastikisolatsiooniga kaabelliinides pöördumatu, kuid paber-

õli isolatsiooinga kaablites võib ka isolatsioonimaterjaliks olev õli valguda osalahenduse poolt tekitatud süvikusse ja edasiste osalahenduste tekkimine samas asukohas ei ole garanteeritud. Osalahenduse protsessi lõpp on isolatsiooni täielik läbilööök. See protsess on pöördumatu, aga aega, kui kaua läheb osalahenduste tekkimisest isolatsiooni täieliku degradeerumiseni on pea võimatu prognoosida. Esimeses peatükis on antud ülevaade osalahenduste poolt tekitatavatest nähtustest nagu vesipuud ja dendriidid.

Teises peatükis on tutvustatud osalahenduste mõõteprotsessi olemust, mõõtmisprotsessi mõjutavaid kitsendusi ja erinevaid mõõtemetodeid. Kuna osalahenduste mõõtmine on küllaltki uus ja jõudsalt moodus isolatsiooni seisukorra hindamiseks, ei ole üheselt selge, millised on erinevate mõõtemetodite eelised ja puudused. Eelnevale küsimusele vastuse leidmiseks on teises peatükis tutvustatud erinevate mõõtemetodite metoodikat ja püütud ka teadaolevate muutujate põhjal anda vastus, milline on jaotusvõrgus sobiv lahendus osalahenduste mõõtmiseks.

Kolmandas peatükis vaadeldakse toimunud sündmusi jaotusvõrgus ja seda, milliseid meetmeid võrgu olukorra parendamiseks on rakendatud. Antakse ülevaade ühel Tallinnas paikneval kaabelliinil teostatud osalahenduste mõõtmisest. Samuti käsitletakse vast valulisima osalahenduste põhjustaja, kaablite otsa- ja jätkumuhvide paigaldamise, kvaliteedi tõstmise meetmeid. Käsitletakse ka antud lõputöö olulisimat küsimust – kas osalahenduste mõõtmisel on võimalik sätestada mingisugune rakenduslik piirmäär?

# 1. Osalahendused keskpinge kaablites

## 1.1. Osalahenduse definitsioon

Mõistet „osalahendus“ defineeritakse vastavalt standardile IEC 60270, kui lokaalset elektrilahendust, mis osaliselt sildab dielektriku elektroodide vahel ning mis võib, kuid ei pruugi toimuda elektroodi vahetus läheduses. Osalahendus on piiratud läbilööök, mis ei põhjusta elektrivõrgus lühist – näiteks faasidevahelist või faasijuhi ja neutraali vahelist lühist. [1]

## 1.2. Ülevaade ajaloost

Osalahenduste kui füüsikaliste nähtuse esmaseks mainimiseks võib pidada 1777. aastal Georg Christoph Lichtenbergi poolt seletatud elektrilahendusi dielektrilistel pindadel. Pea sada aastat hiljem avastati, et Lichtenbergi poolt seletatud nähtuse tagajärjel tekivad dielektriku pinnale lahenduskanalid. Eelmise sajandi algusest on sääraseid elektrilisi lahendusi peetud elektriseadmete isolatsiooni degradeerumise põhjuseks. Siis kasutati tänapäevase osalahenduse mõiste asemel mõistet koroonalahendus. [12]

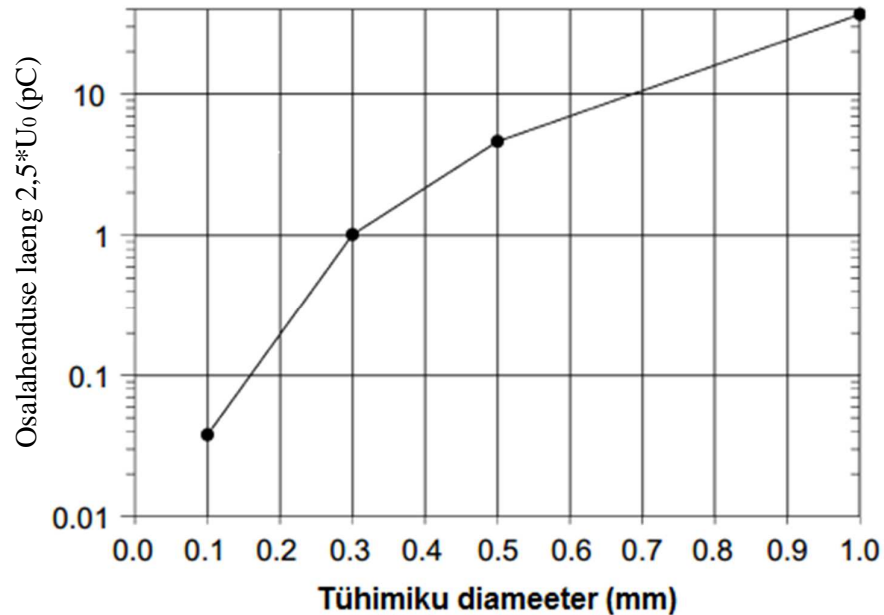
Seoses elektrivarustuse tagamiseks loodud võrgu kiire kasvuga tekkis vajadus ka paremate isolatsioonimaterjalide järele. Eelneva sajandi alguses tutvustati esmakordselt elektriliste osalahenduste tuvastamise võimalust. Osalahenduste kui füüsikaliste suuruste järjepideva uurimise tulemusel loodi esimesed süsteemid osalahenduste mõõtmiseks eelneva sajandi keskpaigas, mille tagajärjel tekkis suur arenguhüpe osalahenduste mõõtmise kasutamisel elektriseadmete isolatsiooni seisukorra hindamisel. [12]

1970-ndatel hakati mõõtma osalahenduste poolt tekitatavate laengute suurust. Tänu sellele leiti võimalus osalahenduste allika lokaliseerimiseks pikkades maakaablites. Alates seitsmekümnendatest, kui analoogseadmed hakkasid asenduma uute ja täpsemate digitaalseadmetega, hakati üha paremini mõista seni küllalt stohhastiliseks peetud osalahenduste olemust. [12]

Tänapäeval nähakse osalahenduste mõõtmises tõhusat vahendit elektriseadmete isolatsiooni kontrollimiseks ja hinnangute andmiseks. Uuritakse võimalusi osalahenduste mõõtmise rakendamises, hindamaks installeeritud kaablite ja muhvide kvaliteeti. Seadmed, mille abil osalahendusi mõõta ja diagnostikat läbi viia, arenevad väga kiirelt. Uusima tehnoloogiana võib välja tuua süsteemi, mis kogub andmeid töös olevatelt kaablilt ja saadab need andmed wifi kaudu jälgimiseks elektrivõrgu juhtijatele.

### 1.3. Osalahenduste tekkimine

Osalahendused tekivad tahkete dielektrikute gaasitühimikkudes (gaasimullides) või vedelate dielektrikute kihististes. Gaasitühemikud võivad tekkida dielektriku valmistamisel või käidus. Gaasitühemiku suurus ei ületa tavaliselt 1 mm ja moodustab dielektrikust tühise osa. [2]

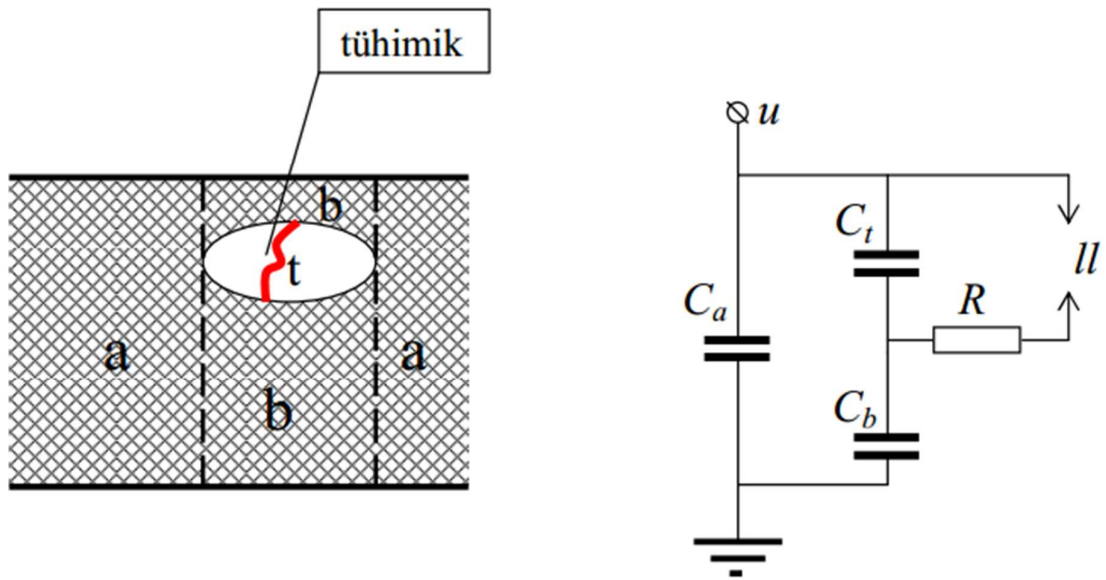


Joonis 1.1. Tühimiku diameetrist sõltuv osalahenduse laeng [1]

Osalahendused tekivad esmalt gaasimullides [2]:

- nende elektriline tugevus on väiksem kui ümbritseval tahkel dielektrikul,
- elektrivälja tugevus on gaasimulli sees suurem kui teda ümbritsevas dielektrikus erineva dielektrilise läbitavuse tõttu.

Tegelikes isolatsioonimaterjalis on tühimike arv ja suurus juhuslik. Seega on osalahenduste protsessi iseloomustavad parameetrid juhuslikud suurused ja võivad väliselt sarnastes isolatsioonimaterjalides olla täielikult erinevad. Osalahenduste alguspingeeks loetakse sel juhul kõige väiksemat tühimiku osalahenduse alguspinget. [2]



**Joonis 1.2. Gaasimulliga dielektrik ja selle askeem [2]**

Joonisel 1.1. on kujutatud gaasimulliga dielektriku ehk praeguses käsitluses näiteks kaabelliini isolatsioonis esineva tühimiku askeemi, kus:

$C_a$  – isolatsiooni mahtuvus, F

$C_t$  – tühimiku mahtuvus, F

$C_b$  – tühimiku ja elektroodi vahele jääva isolatsioonimaterjali mahtuvus, F

$u$  – rakendatav pinge, V

$I$  – on tühimikku modelleeriv lahendi, mille läbilöögipinge  $U_{II}$  võrdub tühimiku läbilöögipingega [2]

$R$  – imiteerib tühimikus tekkiva lahenduskanali takistust,  $\Omega$



kaitstakse vigastuste eest kaitsesoomusega, kaabli kaitsesoomust ja metallmantlit korrosiooni eest välismantliga [4].

Kaablite jätkamiseks ja ühendamiseks teiste liinide ning seadmetega kasutatakse jätku- ja otsamuhve. Sõltuvalt kaabli margist võib muhvide konstruktsioon erineda. Jätkumuhvi konstruktsioon sõltub ennekõike sellest, kas on vaja omavahel ühendada kahte polümeerkaablit, kahte paberkaablit või paber- ja polümeerkaablit [4].

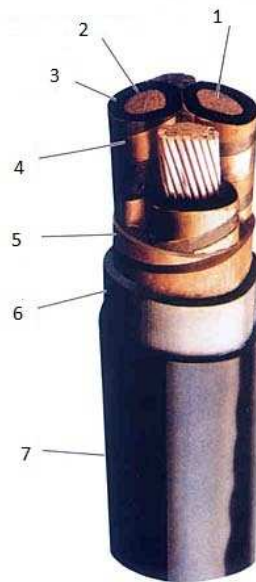
## 1.5. Kaablite isolatsioon

Kaablates kasutatavaid isolatsioonimaterjale [2]:

- Paberõli
- Õli
- PE – polüetüleen
- PELD – madala tihedusega polüetüleen
- PEHD – suure tihedusega polüetüleen
- PEX/XLPE – ristsillatud polüetüleen
- PVC – polüvinüülkloriid
- HFFR – halogeenivaba tulekindel polümeerisegu
- LSZH – vähese suitsueritusega halogeenivaba plast

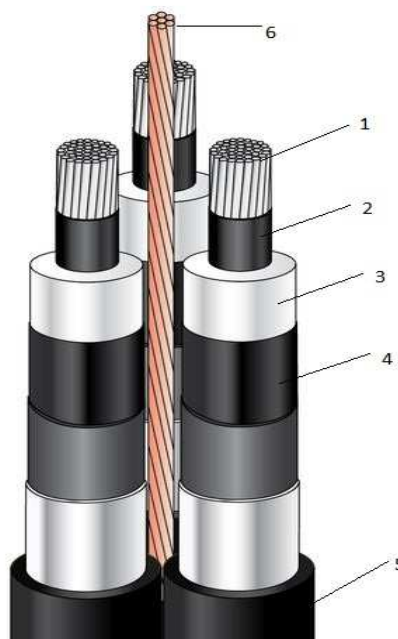
Immutatud paberisolatsiooniga kaabel on Eestis üks enimkasutatud kaablitüüpe (Joonis 1.4.). Inglisekeelses kirjanduses kasutatakse loetletud kaablite kohta lühendit PILC (*Paper Insulated Lead Coated*) kaablid [5]. PILC kaabli kaablisooned on isoleeritud viskoosse õliga immutatud paberiga [4].

Teine Eestis laialdaselt kasutatud kaablitüüp on kolmesoonelise keskjuhtmega AHXAMK-W, mis on tuntud ka kui Wiski kaabel ( Joonis 1.5.). Selline kaabel on ette nähtud paigaldamiseks maa alla ning kohakindlana sise- ja välisruumidesse. Konstruktsiooniliselt on tegemist alumiiniumist valmistatud ümara, keerutatud ja tihendatud veekindla kaabliga, mida ümbritseb pooljuhtiv kopolümeerkompaund [4].



- 1 – kaablisoon
- 2 – soonekate (isolatsioon)
- 3 – sooneisolatsioon
- 4 – vasklint
- 5 – täidis
- 6 – alumiiniumkest
- 7 – välismantel

**Joonis 1.4. Kolmesoonelise PILC kaabli kihid [6]**



- 1 – kaablisoon
- 2 – pooljuhtiv juhikate
- 3 – isolatsioon
- 4 – pooljuhtiv isolatsioonikate
- 5 – välismantel
- 6 – keskjuhe

**Joonis 1.5. Kolmesoonelise Wiski kaabli kihid [7]**

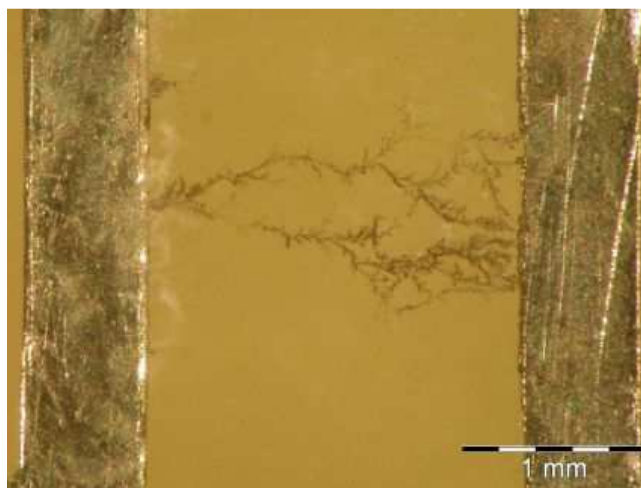
### 1.5.1. Dendriidid kaabli isolatsioonis

Dendriidid ja vesipuud tekivad tahke isolatsiooni pikaajalisel degradeerumisel. Osalahendused on nii degradeerumise põhjustajad kui ka tagajärg. Kõrgetest temperatuuridest tekivad pika aja jooksul isolatsioonikihti mikropraod, kus arenevad osalahendused. Lahenduskanali kiired elektronid pommitavad dielektriku väikest pinda, selles osas dielektrik laguneb [2]. Kasvufaasis



kujuneb puutaoline võrgustik esialgsest tühimikust osalahenduste tõttu. 5 pC suured osalahendused on piisavad põhjustamaks polümeeri ulatuslikku soojuslikku degradeerumist. Dendriidi kasvukiirus sõltub isolatsioonile rakendatud elektriväljast, temperatuurist ja keskkondlikest ning mehaanilistest pingetest [9].

Korduvate osalahenduste tagajärjel tekivad dielektrikus kohalikud süvendid, seetõttu koonduvad lahendused süvenditesse ja tekivad söestunud “puukujulised” kanalid ning lõhed, ehk dendriidid. Aja jooksul “puu” kasvab kuni dielektriku täieliku läbilöögini. Dendriidid on XLPE isolatsiooni rikete peamiseks põhjustajateks. Dendriidid võivad tekkida ka paberisolatsioonis. Kanalid arenevad esmalt mööda üksiku paberikihi pinda ja tungivad sealt siis järgmistele paberikihtidele, läbi paberikihtide vaheliste pilude [2].



**Joonis 1.6. Dendriidid immutatud paberisolatsioonis [8]**

### **1.5.2. Vesipuud kaabli isolatsioonis**

1960-ndate aastate lõpust alates on ristsillatud polüetüleen (XLPE) isolatsioonimaterjalina kaablites üha ulatuslikumalt kasutusele võetud. Sisuliselt kõik uued kaablid ja vanade kaabelliinide rekonstrueerimised teostatakse XLPE kaablitega. XLPE tootmises kasutatakse toormaterjalina madaltihedat polüetüleeni.[9]

Enamus XLPE isolatsiooniga maakaableid on mõjutatud niiskusest ja nendes võivad selle tõttu tekkida vesipuud. On avastatud, et vesipuud tekivad ja arenevad XLPE isolatsioonis, mida mõjutab niiskus ja vahelduv elektriväli. Ebapuhtused isolatsioonis suurendavad vesipuude tekke riski. Polüolefiinid on võimelised imama 2000 – 5000 ppm vett sõltuvalt nende

kristallstruktuurist, mis polüetüleenil korral on otseselt seotud materjali eritihedusega. Vesi võib imbuda isolatsiooni väliskeskkonnast kui kaablil puuduvad veekindlad väliskihid. Vesi võib samuti siseneda kaablisse otsa- või jätkumuhvide rikke tagajärjel. [9]

Vesipuud tekivad siis, kui vesi on mingil põhjusel tunginud polümeeri amorfse tsooni. Eristatakse kaht tüüpi vesipuud - põõsakujulised puud ja rosettpuud [2].

- Põõsakujulised vesipuud - hakkavad arenema dielektriku servast. Ohtlik pikkus saavutatakse 10...15 aastaga. Põõsakujulised puud esinevad tavaliselt massiliselt.
- Rosettpuud – tekivad isolatsiooni sees. Rosettpuud kasvavad kiiresti (10x kiiremini kui põõsakujulised puud). Kaabli läbilööki võib põhjustada juba 1,5 aastane rosettpuu.

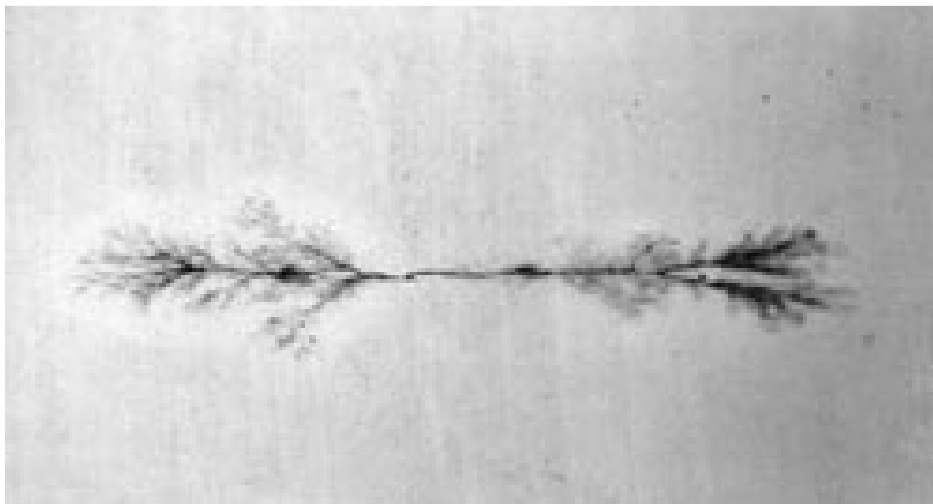
Rosettpuude kasv peatub peale teatud pikkuse saavutamist, kuid põõsakujulised puud kasvavad pidevalt ja võivad lõpuks katta kogu isolatsiooni paksuse. Selle tõttu peetakse põõsakujulisi vesipuud kahjulikumaks võrreldes rosettpuudega. Vesipuud põhjustavad lokaalset elektrivälja tugevuse kasvu, mille tõttu võib hakata arenema dendriit. Samas võib vesipuudes toimuda oluliselt intensiivsem oksüdatsioon kõrgemal temperatuuril, mis viib suurema veeimavuse, suurema juhtivuse ja viimaks soojusliku läbilöögini. [9]

XLPE kaabli tootmisel ristsildamise protsessi käigus tekkinud jääniiskusest võivad samamoodi tekkida väikesed vesipuud, kuid neid ei peeta kahjulikeks. Vesipuude ja dendriitide vahe seisneb selles, et vesipuud ei tekita tingimata isolatsiooni jäädavat ja nähtavat kanalit. Kui elektriväli lakkab ja niiskus eemaldada, võivad vesipuud näiliselt kaduda. Isolatsiooni täielik läbilööki võib toimuda siis, kui vesipuu haru sildab elektrodid. Mõnel juhul võib kaabel talitleda normaalpingel ka lõpuni arenenud vesipuuga. Vesipuude areng kestab aastaid. Nende kasvu kiirus sõltub vee kontsentratsioonist, elektrivälja tugevusest ja sagedusest, isolatsiooni materjalist, temperatuurist ja mehaanilistest pingetest. Vesipuud tekivad väiksema elektrivälja tugevuse juures kui dendriidid. On ilmne, et kaableid, mis paigaldatakse niiskesse keskkonda, tuleks kaitsta niiskuse tungimise eest isolatsiooni.[9]

XLPE omaduste pikaajaliseks parendamiseks kasutatakse lisandeid. Need parandavad kaabli vastupidavust vesipuude tekkele. Antioksidante lisatakse selleks, et siduda väga aktiivseid ja kahjulikke vabu radikaale. [9]



**Joonis 1.7. Põõsaskujuline vesipuu plastikisolatsioonis [10]**



**Joonis 1.8. Rosettpuu plastikisolatsioonis [11]**

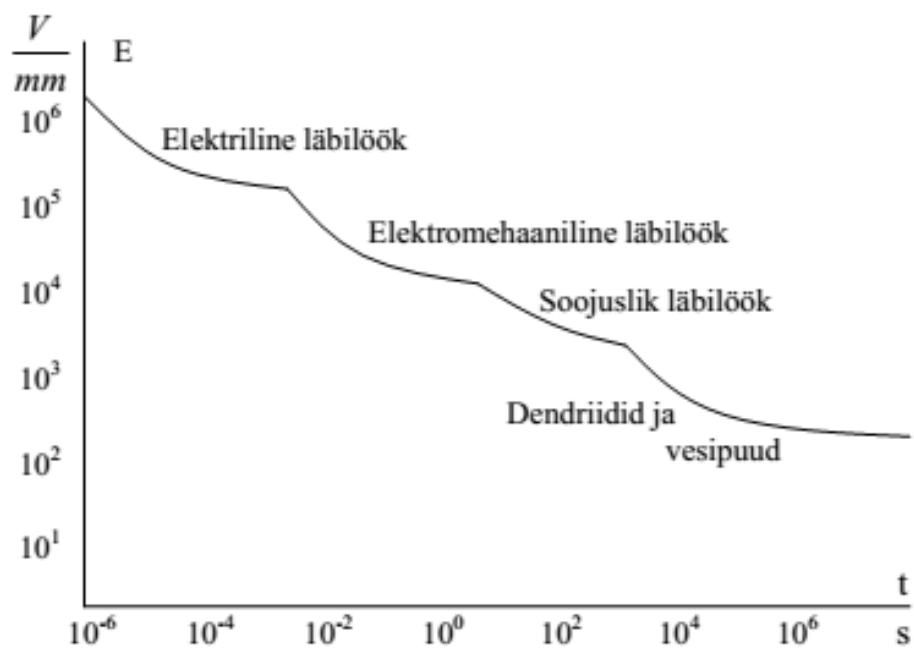
### **1.5.3. Tahke dielektriku läbilöök**

Tahkete dielektrikute elektriline tugevus sõltub oluliselt dielektriku degradeerumisest. [2] Dielektriku degradeerumise põhjuseks ja teisalt ka tagajärjeks on eelkirjeldatud dendriidid ja vesipuud.

Tahke dielektriku elektriline läbilöök toimub tahke dielektriku elektrilist tugevust ületava välja toimel. Tahkete dielektrikute tugevust hinnatakse põhiliselt katsetulemuste alusel empiiriliste valemite ja graafikutega. [2]

Tahke dielektriku elektriline tugevus sõltub oluliselt [2]:

- isolatsiooni konstruktsioonist
- valmistamistehnoloogiast
- kasutatavatest materjalidest
- materjalide puhtusest



Joonis 1.9. Tahke dielektriku elektrilise tugevuse sõltuvus pinge kestusest [2]

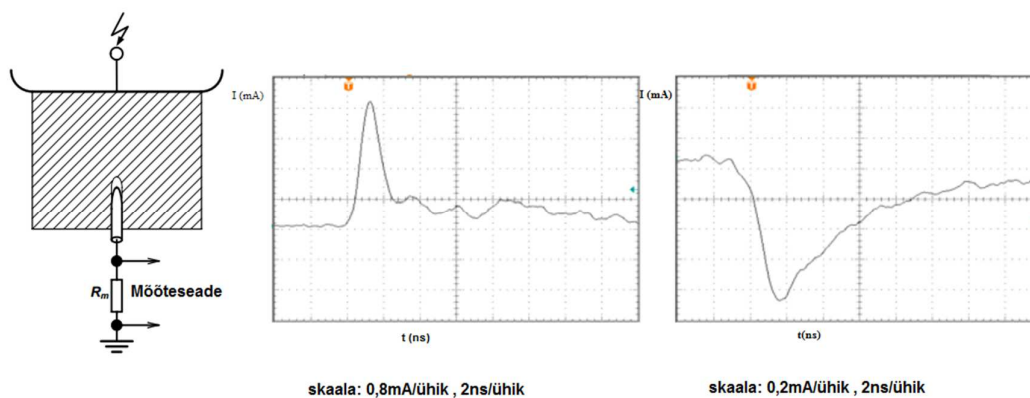
## 2. Osalahenduste mõõtmine

On olemas erinevaid meetodeid, mille rakendamisel saab kindlaks teha osalahenduste olemasolu kaablites ja nende iseloomu. Osalahendusi saab mõõta elektriliselt, akustiliselt, elektromagnetiliselt, keemiliselt, termograafiliselt või muude kaamerameetoditega või nende meetodite võrdluse ja kombineerimisega. Kaasajal kasutatakse osalahenduste mõõtmisi peamiselt kaabelliinide diagnostikas. Jõukaablites on osalahenduste tuvastamine ja lokaliseerimine võimaliku isolatsioonirikke varajases staadiumis oluline remonttööde planeerimiseks ja võimalike rikke tagajärjel tekkinud katkestuste vähendamiseks. [9]

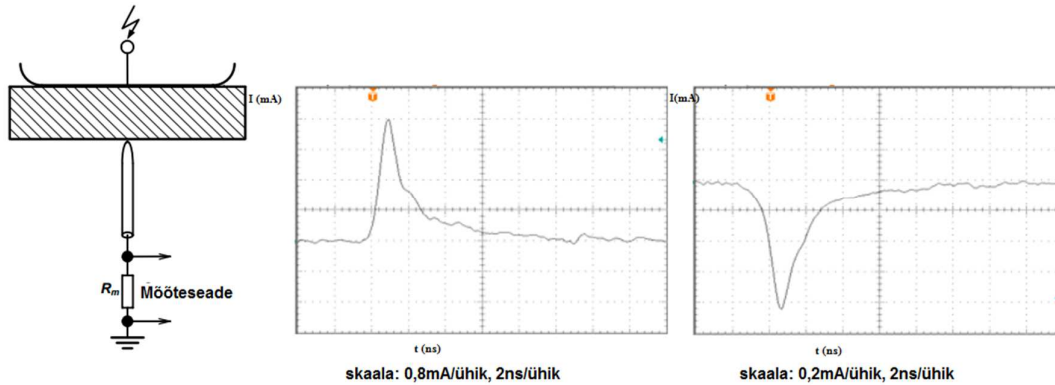
Osalahenduste mõõtmise metodikaid on võimalik jaotada ka *online* (onlain) ja *offline* (lahtiühendatud) mõõtmiseks, millest esimesel juhul kogutakse andmeid töösoleva kaabli või muu elektrivõrgu elemendi kohta. *Offline* mõõtmiste alla liigituvad põhiliselt elektrilised mõõtemetodid, mille läbiviimiseks on vajalik mõõdetav võrguelement tööst välja viia.

### 2.1. Osalahenduste amper-sekund karakteristikud

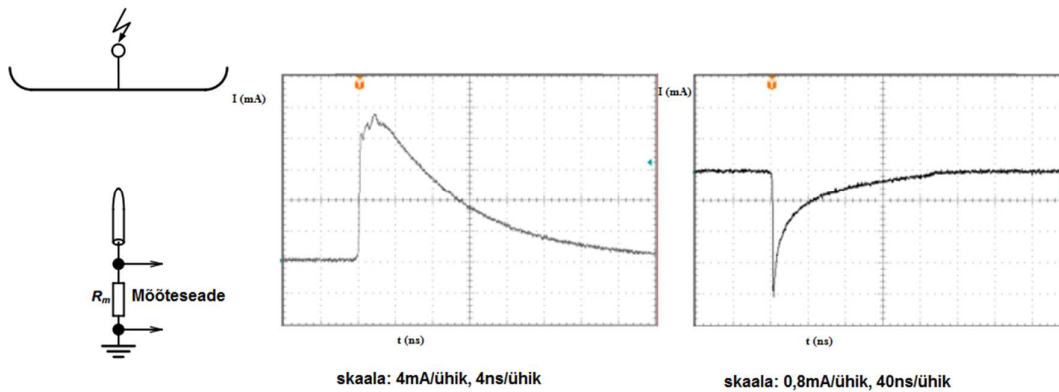
Järgnevalt on kujutatud katseliselt saadud amper-sekund karakteristikuid ja kasutatud mõõtesüsteemi. Nendes näidetes on ühe elektroodina kasutatud plaati, mis on ühendatud pingeaallikaga ja teine elektrood on teravatipuline, mis on maandatud läbi mõõteseadme takistuse  $R_m$ . Negatiivse vooluimpulsi karakteristikuid saamiseks on elektroodid ümber ühendatud. [12]



**Joonis 2.1. Positiivse ja negatiivse osalahenduse vooluimpulsi karakteristik XLPE isolatsiooni tühimikus [12]**



**Joonis 2.2. Positiivse ja negatiivse osalahenduse vooluimpulsi karakteristik liuglahenduse korral [12]**



**Joonis 2.3. Positiivse ja negatiivse vooluimpulsi karakteristik koroonalahenduse korral elektroode ümbritsevas õhus [12]**

Joonistelt 2.1. – 2.3. nähtub, et osalahenduse impulsid toimuvad ligikaudu nanosekundi jooksul ja erinevate osalahenduste puhul on selgelt eristatavad ka nende karakteristikud. Oluline on aga märkida, et selliseid iseloomulikke osalahenduste karakteristikuid elektriseadmete isolatsioonis on võimalik saada vaid laboratoorses tingimustes, sest näiteks töös olevale kaablile taolise mõõtesüsteemiga ligi ei pääse, seda enam, et osalahenduse ilmumise koht ei ole enne kaabelliini testimist teada. See tähendab, et osalahenduste tekitatud transiendid on tuvastatavad vaid läbi fiidriterminalide kaablite otste. Järelikult on mõõdetav vaid murdosa osalahenduse näivlaengust. Seetõttu on kriitiline osalahenduste laeng määratud erinevates standardites ja juhendites mitte tulenevalt arvutuslikest suurustest vaid pigem mõõteelektrikute pikaajalisele kogemusele toetudes. [12]

Tulenevalt eelnevast võib väita, et osalahenduse intensiivsuse või kriitilisuse määramiseks ei ole oluline mitte osalahenduse tekitatud vooluimpulsi maksimaalväärtus vaid osalahenduse näivlaeng. Seda seetõttu, et vooluimpulsi mõõtmise täpsus ei ole piisav. Näivlaengu mõõtmise eeliseks on selle invariantsus ja suhteliselt pikk kestus võrreldes vooluimpulsi kestusega.[12]

## 2.2. Peamised mõõdetavad suurused

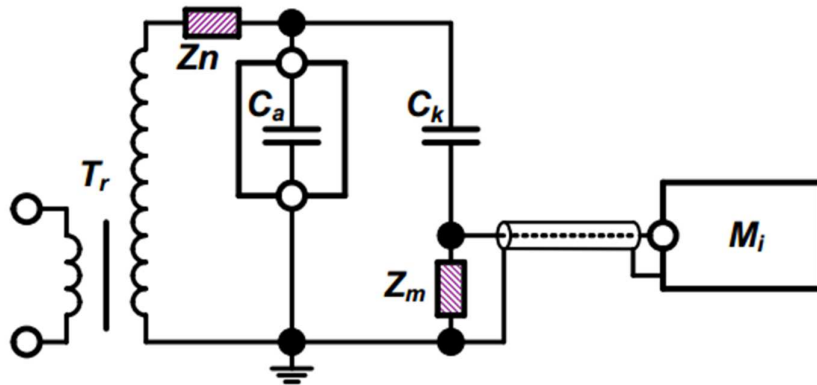
**Näivlaeng  $q_0$ .** Laengu muutus isolatsioonile ühendatud elektroodides on osalahenduse näivlaeng. Osalahenduste käigus tegelikult edastatavat laengu suurust ei ole võimalik otseselt mõõta. Näivlaengut saab mõõta isolatsiooniväliselt ja see on võrdeline osalahenduse võimsuse ja energiaga ning näitab osalahenduste poolt tekitatava kahju suurusjärku. Näivlaeng ei ole võrdne osalahenduse käigus liikuva laengu tegeliku suurusega, vaid on sellest palju väiksem. [9]

**Algpinge (süttimispinge)  $U_i$ .** See on pinge väärtus, mille korral avalduvad korduvalt osalahendused kui pinget tõstetakse kõrgemale tasemest, mille juures osalahendusi ei esinenud. Kui osalahenduste algpinge on madalam võrgupingest, on see eriti ohtlik, kuna osalahendused kahjustavad pidevalt isolatsiooni. [9, 12]

**Kustumispinge  $U_e$ .** Pingetase, mille juures korduvad osalahendused lakkavad, kui pinget vähendatakse tasemest, mille juures osalahendused toimuvad. Korras isolatsiooni puhul peaksid osalahendused kustuma võrgupingest kõrgemal pingel, vastasel juhul kahjustavad need pidevalt isolatsiooni. [9, 12]

## 2.3. Osalahenduste mõõteahelad

Usaldusväärsete ja võrreldavate mõõteandmete kogumiseks on elektriliselt osalahenduste mõõtmiseks kasutatavad mõõteahelad määratletud standardiga IEC 60270, kus on kirjeldatud kolme erinevat osalahenduste mõõteahelat, mis erinevad üksteisest mõõteimpedantsi  $Z_m$  asukoha poolest. [12]



**Joonis 2.4. Mõõteimpedantsi ja sidestuskondensaatori jadaühendus [12]**

Joonisel 2.4. on kujutatud mõõteimpedantsi ja sidestuskondensaatori jadaühendust, kus:

$C_k$  – sidestuskondensaator

$Z_m$  – mõõteimpedants

$T_r$  – kõrgepinge toitrafo

$C_a$  – testitava objekti mahtuvus

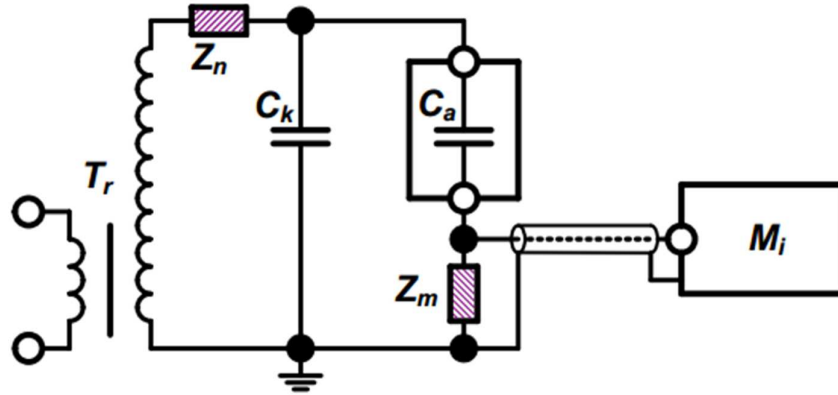
$Z_n$  – müra blokeeriv filter

$M_i$  – osalaheduste mõõtmise seade

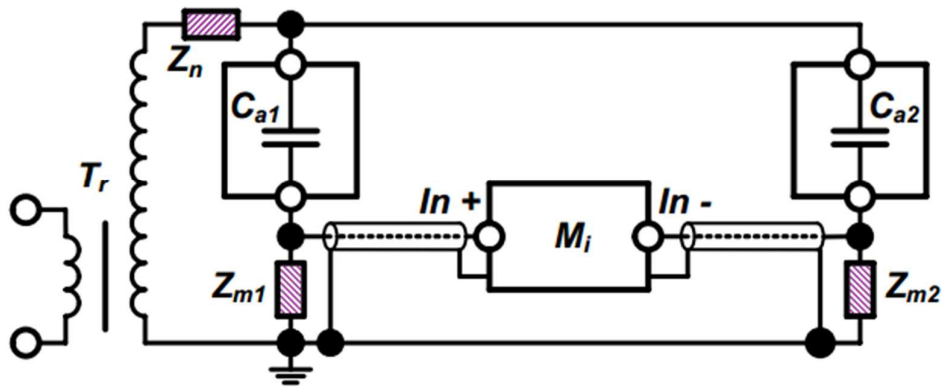
Joonisel 2.4. kujutatud mõõteahelas on jadamisi ühendatud sidestuskondensaator  $C_k$  ja mõõteimpedants  $Z_m$ . Müra blokeerivat filtrit  $Z_n$  kasutatakse vähendamaks mõõteseadme trafo  $T_r$  poolt genereeritavat elektromagneetilist müra. Filter aitab vältida ka seda, et mõõdetavad osalahenduste signaalid ei suunduks trafo poole. Silmas peab pidama, et mõõteseadme trafo kaablite konstruktsioon ja ehitus oleks sellised, et need ei tekita täiendavaid osalahendusi. Samuti peavad trafo maandusjuhtmed olema võimalikult lühikesed, et nende induktiivsus oleks minimaalne ja need ei tekitaks täiendavat müra, mis mõjutaks osalahenduste mõõtetulemusi. [12]

Joonisel 2.5. on kujutatud mõõteimpedantsi ja testitava objekti mahtuvuse jadaühendust. Sellise ühenduse abil on võimalik tõsta osalahenduste mõõtmise tundlikkust. Sellist ühendust kasutatakse vaid erijuhtudel, kuna see seab ohtu mõõteseadmed, juhul kui mõõdetav objekt testimise käigus peaks vigastuma (n-ö katseobjekti isolatsiooni täielik läbilöök). [12]





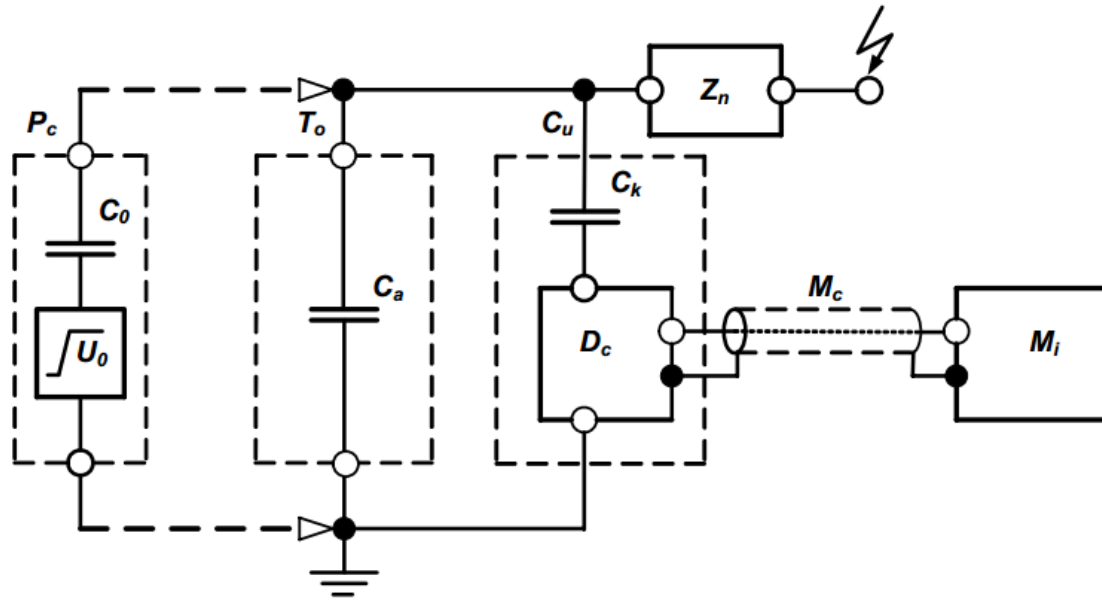
Joonis 2.5. Mõõteimpedantsi ja testitava objekti jadaühendus [12]



Joonis 2.6. Sümmetriline sildühendus [12]

Joonisel 2.6. on kujutatud sümmetrilise sildühendusega mõõteskeemi, mida kasutatakse juhul, kui elektromagnetilist müra on liiga palju usaldusväärsete mõõtetulemuste saamiseks. Sellise skeemi puhul ei kasutata sidestuskondensaatorit ja sild seadistatakse sümmetriliseks mõõteimpedantside muutmise teel. Mõõtetulemus saadakse läbi mõõteseadme diferentsiaalvõimendi. [12]

Olenemata joonistel 2.5. ja 2.6. kujutatud mõõteahelate suuremast tundlikkusest kasutatakse enamasti siiski joonisel 2.4. kujutatud mõõteimpedantsi ja sidestuskondensaatori jadaühendust. [12]



**Joonis 2.7. Osalahenduste mõõteahel koos peamiste komponentidega [12]**

Joonisel 2.7. on kujutatud osalahenduste mõõteahelat koos peamiste komponentidega, kus:

$P_c$  – osalahenduse kalibraator

$C_0$  – kalibreeriv kondensaator

$U_0$  – sammupinge generaator

$T_0$  – mõõdetav objekt

$C_a$  – mõõdetava objekti mahtuvus

$Z_n$  – müra blokeeriv filter

$C_u$  – osalahenduse sidestuskomponent

$C_k$  – sidestuskondensaator

$D_c$  – sidestusseade

$M_c$  – mõõtekaabel

$M_i$  – osalahenduste mõõtmise seade

## 2.4. Osalahenduste mõõtemetodid

Osalahenduste tuvastamiseks kasutatavad mõõtemetodid ja mõõtetulemuste usaldusväärsus on tugevalt seotud mõõdetava elektrivõrgu seadmega. Osalahenduste mõõtmisel kasutatakse erinevaid osalahendustega kaasnevaid füüsikalisi nähtusi. Näiteks on võimalik mõõta kaasnevaid elektrilisi impulsse, valgust, soojust, keemilisi muutusi ja elektromagnetilist kiirgust. [13] Kõiki neid eelmainitud füüsikalisi nähtusi on võimalik mingil moel mõõta, keerukam küsimus seisneb selles, kas mõõdetud andmete põhjal on võimalik määrata isolatsiooni täpset seisukorda.

Osalahenduste olemasolu elektriliseks mõõtmiseks kasutatakse kolme põhilist meetodit. 50 Hz vahelduvvoolu AC mõõtmine (AC – *alternating current*), mille abil on võimalik osalahenduste olemasolu edukalt määrata. Tihtipeale ei ole see mõõtemetod praktilisest ja majanduslikust küljest otstarbekas, kuna eeldab suure mahtvusliku võimsuse olemasolu. Eelnevate kitsenduste tõttu on välja töötatud süsteeme, mis töötavad teistel sagedustel ja ei nõua sedavõrd suuri seadmeid mõõteseadmete kasutamiseks. Elektriliseks mõõtmiseks kasutatakse väga madala sageduse meetodit (VLF – *very low frequency*) ja sumbuva vahelduvpingelise mõõtmise meetodit (DAC – *damped AC voltage*). [13]

### 2.4.1. Võrgusagedusliku vahelduvpingelise mõõtmise meetod (50Hz AC)

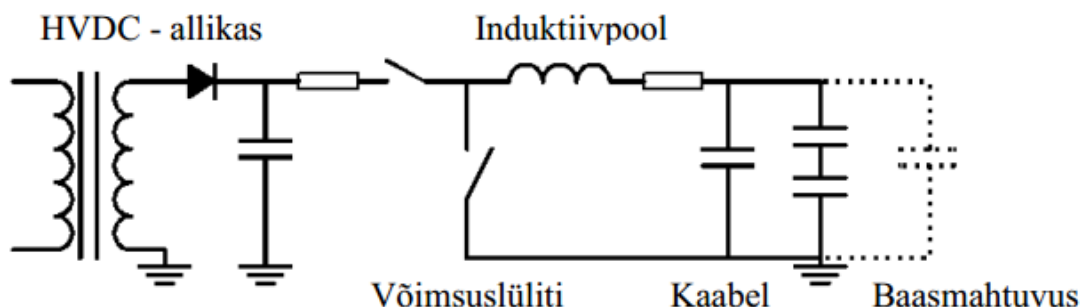
50Hz AC mõõteahelate põhimõtteskeeme on kirjeldatud alajaotises 2.3. 50 Hz AC mõõtmist kasutatakse peamiselt laborites osalahenduste määramiseks katsealustel seadmetel, mille mõõtmiseks ei ole vaja väga suurt mahtvuslikku võimsust. Mahtvusliku võimsuse vajadus seab piirid 50Hz AC mõõtemetodi kasutamiseks, kui on vaja mõõta osalahenduste olemasolu pikkades kaablites ja mõõteseadmeid peab transportima alajaamadesse.

### 2.4.2. Sumbuva vahelduvpingelise mõõtmise meetod (DAC)

Sumbuva vahelduvpingelise võnkumise (DAC – *damped alternating voltage*) meetodi korral toimub osalahenduste (PD – *partial discharge*) määra mõõtmine kaabli mahtvuse ja katseseadme induktiivsuse vahel toimuva sumbuva võnkumise alusel. [14] Üldjuhul jäävad selliste seadmete korral – sõltuvalt mõõdetava kaabli mahtvusest ja seadme induktiivsusest – tekkivad võnkumissagedused suurusjärku 20 – 1000 Hz. [15] See tähendab, et DAC seadme katse- ja mõõtmisagedused võivad võrgusagedusest erineda 1 – 20 korda. Et saada DAC mõõtmisel võrreldavaid tulemusi 50 Hz võrgusageduslikul vahelduvpingel mõõtmisega, peaks vahelduvpingelise võnkumise sagedus jääma alla 500 Hz. [15]

Võnkumissagedus ( $f$ ) sõltub mahtuvuse ( $C$ ) ja induktiivsuse ( $L$ ) omavahelisest korrutisest, võnkumise sumbumise määra mõjutavad peamiselt kaabli isolatsioonis tekkivad kaod (kaotangens –  $\tan \delta$ , osalahendused –  $PD$ ). [14] Eelloetletud seosed on kirjeldatud valemiga 2.1.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.1.)$$



**Joonis 2.8. Sumbuva vahelduvpingelise võnkumise seadmestiku põhimõtteskeem [14]**

Kaabel laetakse tõusva alalispinge (HVDC – allika) abil ette seatud määrani (üldjuhul kuni  $2U_0$ ). Kui kaabel on laetud soovitud tasemeni, ühendatakse alalispinge toiteallikas lahti. Seejärel lülitatakse võimsuslülitit abil induktiivpool ja laetud mahtuvusega kaabel omavahel paralleelselt ning pooli ja kaabli vahel hakkab toimuma kindla sagedusega sumbuv võnkumine. [14]

Osalahenduste mõõtmisel kasutatakse erinevaid laadimispingeid (üldjuhul  $U_0$ ,  $1,3U_0$ ,  $1,5U_0$  ja  $2U_0$ ) selgitamaks välja pinge mõju osalahenduste määrale. Osalahendusi mõõdetakse eraldi igast kaabli faasijuhist. Enne lõplikke mõõtmisi kalibreeritakse iga kord mõõtesüsteem kalibraatori abil. Kalibreerimisseadmega saab mõõtesüsteemile ette anda erinevaid osalahenduste referentsväärtuseid (nt  $0,1pC$ ,  $10pC$ ,  $1000pC$ ). [14]

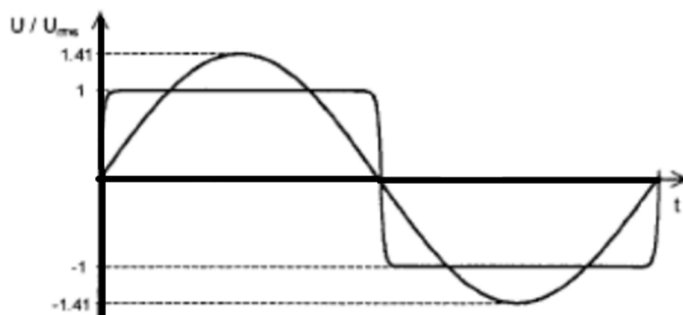
DAC mõõtemetodit rakendatakse osalahenduste mõõtmisel ja võrguseadme isolatsiooni hindamisel kaabelliinidele ja pöörlevate elektriagamite staatoritele. [15]

### 2.4.3. Väga madala sageduse meetod (VLF)

Väga madala sagedusega mõõtmisi tehakse üldjuhul  $0,1$  Hz sagedusega, juhul kui testitava objekti mahtuvus on väga suur võib mõõtmisel kasutatav sagedus olla kuni  $0,01$  Hz. Seda mõõtemetodit kasutatakse eelkõige XLPE isolatsiooniga kaabelliinide teimimiseks. [15] See

tähendab, et VLF seadme katse- ja mõõtmisagedused võivad võrgusagedusest erineda 500 – 5000 korda.

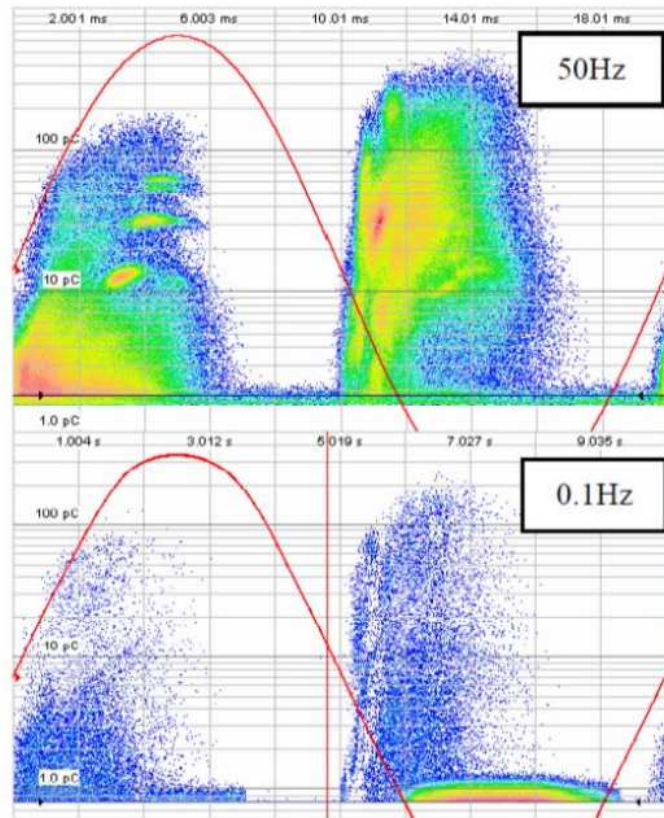
Väga madala sagedusega kaabelliini mõõtes kasutatakse samuti erinevaid laadimispingeid ja osalahenduste poolt tekitatud võnked tuvastatakse. Väga madala sagedusega testides on võimalik testitavat objekti koormata erinevate kujuga siinuselise pingega, kujutatud joonisel 2.9. Seda võib välja anda koosinusrüütpinget kui ka siinuspinget. [15]



**Joonis 2.9. VLF pingekujud [15]**

VLF mõõtemetodi eeliseks on seadmete väikesest kaalust tulenev eelis transportimisel kui ka väike võimsusvajadus ja madal hind. Väga madalal sagedusel mõõtmisega on testimiseks võimalik rakendada suuremaid pingeid ja pikemat testimise aega. See loob eelise võrgusagedusel testimise ees. [15]

VLF mõõtemetodi puuduseks on katse- ja mõõtesageduse suur erinevus (500 – 5000 korda) võrgusagedusest. Suur sageduste erinevus avaldab mõju mõõtetulemustele. Joonisel (Joonis 2.10) on toodud tulemused 0,1 ja 50 Hz mõõtmiste korral. Jooniselt nähtub, et kuigi piltidel on sarnasusi siis leidub seal ka erisusi, nt. osalahenduste kontsentratsioonid erinevate poolperioodide ajal. Ühtlasi võib väga aeglaselt muutuva pinge (0,01 või 0,1 Hz) korral kaabli muhvides elektrivälja kaju ning jagunemine isolatsioonikihtide erinevates ülemineku kohtades olulisel määral erineda sellest millele need 50Hz korral talitama planeeritud on. Suureneb läbilöögi oht kaablimanustele ehk muhvidele, seda eriti joonisel (Joonis 2.9) toodud koosinusrüütpinge korral kuna see sarnaneb poolperioodil alalispingele, mille korral nimetatud elektrivälja jagunemise muutuse mõju on suurim. [15]



**Joonis 2.10. 50Hz ja VLF mõõtmise tulemusel saadud faasimustrid [15]**

Joonisel 2.10. on kujutatud VLF ja 50Hz mõõtmistega saadud tulemusi. Mõõdetud on 110kV nimipingega defektiga kaablimuhvi. Graafikult nähtub, et mõõtetulemused on sarnased kuid leidub ka erisusi. VLF mõõtmisel on katse aeg aga kordades pikem.

#### **2.4.4. Mõõtmine alalispingega**

Minevikus viidi installatsioonijärgsed katsed läbi alalispingega. Katseseade on kompaktne ja katsetamine lihtne. Paber-õliisolatsiooniga kaablitele on alalispingega katsetamine kasutust leidnud mitmeid aastaid ja saadavad tulemused on rahuldavad. [9]

Alalispingetestid ei ole seevastu sobilikud PE/XLPE isolatsiooniga kaablitele, sest elektrivälja jaotumine isolatsioonis erineb vahelduvpinge korral jaotumisest. Katsekogemus on näidanud, et isegi tõsised defektid (näiteks isolatsiooni tunginud nõel, niinimetatud tahtlikult tekitatud defekt, mis imiteerib installatsiooniviga) võivad jääda märkamatuks alalispinge kasutamisel. Ka vesipuid ei saa tuvastada alalispingega. On teada, et terve XLPE isolatsioon võib saada kannatada alalispingekatse käigus isolatsiooni tekkinud nõrkade kohtade tõttu, mida tekitab elektrostaatiline mahulaeng. See võib viia läbilöögini katse käigus või pärast kaabli

pingestamist vahelduvpingega. Kaabli tööiga võib väheneda oluliselt. Alalispingekatsed on sobilikud alalispinge ülekandesüsteemidele. [9]

Osalahenduste mõõtmisi on võimalik teha ka alalispinget kasutades. Alalispinge abil mõõtes tuleb silmas pidada, et osalahenduste esinemissagedus on sellel juhul tunduvalt väiksem, kuna polaarsuse muutumist ei toimu. Samuti on väiksem osalahenduse laengu suurus. Kuna osalahengute esinemistihedus on alalispingega mõõtmisel alternatiivsetest võimalustest tunduvalt väiksem, pikeneb selle tõttu oluliselt testitava objekti mõõtmiseks kulunud aeg. Osalahenduste mõõtmisi sooritatakse alalispingega 30-60 minutit faasi kohta. [27]

#### **2.4.5. Akustiline meetod**

Osalahendusi on võimalik tuvastada ka akustilisel meetodil. Akustilise meetodiga tuvastatakse osalahenduste olemasolu isolatsioonis osalahenduse poolt tekitatud heli- või vibratsioonilainete tuvastamise teel. Helisignaali püüdmiseks kasutatakse piesoelektrilisi muundureid, kiiberoptilisi sensoreid, kiirendusmõõtureid ja kondensaatormikrofone. Osalahenduse lühikese kestuse tõttu ei tuvastata mitte kuuldava heli olemasolu vaid pigem osalahenduse poolt kinnises õhumullis tekkivat lahenduse tekitatud vibratsiooni. Tekkiva vibratsiooni sagedus jääb vahemikku 10 kHz kuni 300 kHz. Osalahenduste poolt tekitatava vibratsiooni mõõtmine ja mõõtmise usaldusväärsus sõltub suuresti mõõdetava objekti ehituslikust geometriast samas ka objekti materjalist. Õlis või metallis avaldub selline vibratsioon erinevalt. [15]

Akustilisel meetodil on võimalik osalahenduste olemasolu tuvastada seadmetes, millele pääseb ligi – nagu näiteks kaablite otsamuhvid.

Selle meetodi puuduseks on helilainete sumbumine kaablikihtide läbimisel. Lisaks võivad peegeldunud helilained segada huvipakkuvat OL signaali ja viia valede järeldusteni OL suuruse ja allika asukoha suhtes. Väikseid või suuremaid hästi varjatud osalahendusi on keeruline avastada. Seadmeid kasutatakse normaaltalitluses tavapingel. Akustiline sensor peab olema füüsiliselt kontaktis katseobjektiga. [9]

#### **2.4.6. Elektromagnetlainete tuvastamine**

Elektromagnetiline osalahenduste tuvastamine põhineb osalahenduse tekkimise käigus kiirguvate elektromagnetlainete avastamisel. Katseseadmed katavad osalahenduste tüüpilisi sagedusvahemikke: HF (3 MHz - 30 MHz), VHF (30 MHz - 300 MHz) ja UHF (300 MHz - 3000 MHz). HF ja VHF vahemikku kasutatakse peamiselt kaablimanuste korral, kus elektromagnetilised siirdeprotsessid leitakse induktiivseid ja mahtuvuslike sensoreid ning

eriotstarbelisi väljasonde kasutades. Jõutrafode korral kasutatakse VHF ja UHF vahemikke, et eraldada elektromagnetilisi osalahenduste signaale sensorite abil. [9]

## 2.5. Mõõtemetodite võrdlev analüüs

Mõõtemetodid osalahenduste mõõtmiseks võib jagada kaheks – elektrilised mõõtmised ja muid kaasnevaid füüsikalisi parameetreid mõõtvad meetodid. Ka *online* ja *offline* liigituse järgi jagunevad erinevad mõõtemetodid samal moel kaheks. Elektrilisi mõõtemetodeid rakendatakse tavapäraselt kaablitele, mis on füüsiliselt elektrivõrgust lahti ühendatud, niinimetatud *offline* mõõtemetodid. Viimasel ajal on arendatud ka onlain mõõtmistel põhinevad osalahenduste mõõteseadmeid, mille abil on võimalik mõõta samasid parameetreid nagu *offline* mõõtemetodite puhul. Näiteks võib tuua siinkohal ettevõtte Prysmian Group poolt toodetava Pry-Cam Grids [28] mõõtesüsteemi, mis ühendatakse elektrivõrgu seadmele, mille kohta vastavasisulist infot koguda soovitakse. Onlain mõõtesüsteemide hulka kuuluvad ka akustilised osalahenduste mõõtemetodid ja elektromagnetlainete tuvastamise põhjal töötavad osalahenduste mõõtemetodid.

Kaabelliinide diagnostika läbiviimiseks on mõistlik kasutada elektrilisi mõõtemetodeid, kuna nende abil on võimalik saada kõige põhjalikumaid andmeid mõõdetava liini kohta. Kaablite otsamuhvide osalahendusi võib mõõta ka akustilise ja elektromagnetlainete meetodiga, kuid ülevaadet nende abil terve kaabli kohta ei saa.

Elektriliste osalahenduste mõõtemetoditena on võimalik rakendada alalispingega osalahenduste mõõtmist (DC), võrgusagedusliku vahelduvpingega mõõtmist (50Hz AC), sumbuvat vahelduvpingelist mõõtmist (DAC) ja väga madalal sagedusel mõõtmist (VLF). Neljast loetletud meetodist on selgelt kõige väiksema potentsiaaliga alalispingega osalahenduste mõõtmine, seda meetodit XLPE isolatsiooniga kaabelliinidel rakendada ei saa ja takistavaks asjaoluks on ka antud mõõtemetodi vähene kasutatavus, mille tõttu ei ole kuigi palju infot selle kasutusvõimaluste ja üldise usaldusväärsuse kohta.

Järele jäänud kolme elektrilise mõõtemetodiga osalahenduste mõõtmisel on võimalik saada täpseid tulemusi kaabelliinide seisukorra kohta. Kõige usaldusväärsemaks ja kaabelliine vähem kahjustavaks peetakse võrgusageduslikku vahelduvpingelist mõõtmist. Sellise mõõtmise korral on pinge ja sagedus vastavuses reaalsete parameetritega, mida kaabelliinile igapäevaselt rakendatakse. Üksikutel kaablitel elektrivõrgus seab piirid 50 Hz AC mõõtemetodi rakendamiseks vajamineva võimsuse genereerimisel kasutatava tehnika füüsiline suurus.



Eelnevat arvesse võttes jääb võrgus keskpinge kaablite mõõtmiseks järele kaks elektrilist mõõtemetodit. VLF ja DAC. Nende mõõtemetodite eeliseks on suhteliselt väike vajaminev võimsus ja seadmete kompaktsus, millest tulenevalt on neid võimalik vähese vaevaga mõõdetava kaabli juurde transportida. VLF kahjuks räägib fakt, et selle mõõtemetodi rakendamisel avalduvad kriitilised isolatsiooni defektid väga kõrge pingega testides, mõõdetavale kaablile rakendatakse pinget kuni  $4,2 \cdot U_0$  maksimaalselt 15-ks minutiks. [26] Niivõrd kõrge pingega kaabelliini testides osutub tõenäoliseks, et kaabli isolatsioon saab kahjustada. Samuti võib antud mõõtemetodi miinusena välja tuua juba eelpool mainitud elektrivälja ebaühtlase jaotuse koosinus-ruutpinge korral ja sellest tulenevad ohud kaablimuhvidele.

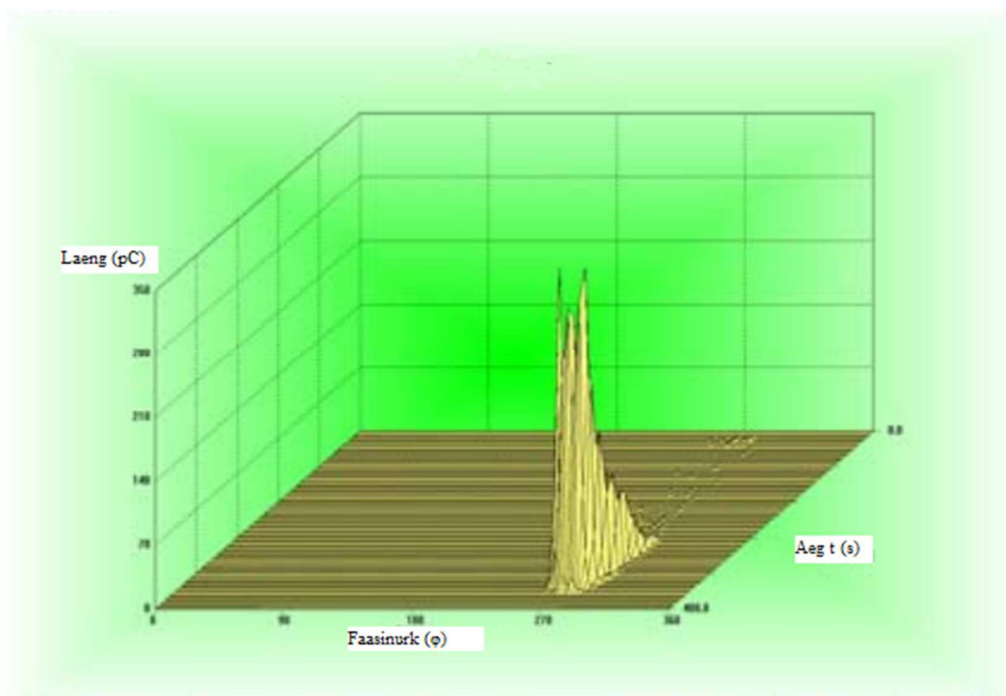
Kuna kaabelliinidel osalahenduste mõõtmine on soovitatav läbi viia võimalikult lähedaste parameetritega tavaolukorrale, [26] osutub loetletud mõõtemetoditest sobivaimaks sumbuva vahelduvpingelise mõõtmise meetod. Peamine eelis DAC mõõtmise ees seisneb mõõtmisel kasutatavate sageduste väiksemas erinevuses kaabelliini nimiparameetritest. DAC puhul on mõõtesageduse vahemik 20-1000 Hz ehk mõõtesagedus erineb 1-20 korda võrgusagedusest, VLF puhul on mõõtesageduste vahemik 0,01-0,1 Hz ehk mõõtesagedus erineb 500-5000 korda võrgusagedusest. Lähtudes soovitusel teha mõõtmisi võimalikult lähedaste parameetritega võrgu nimiaandmetele, ei ole valiku langetamine sellest aspektist lähtuvalt kuigi keerukas. DAC eeliseks VLF mõõtmise ees võib pidada ka suhteliselt lühikest katse kestust ja väiksemat rakendatavat pinget katse läbiviimisel.

## **2.6. Segava müra vähendamine**

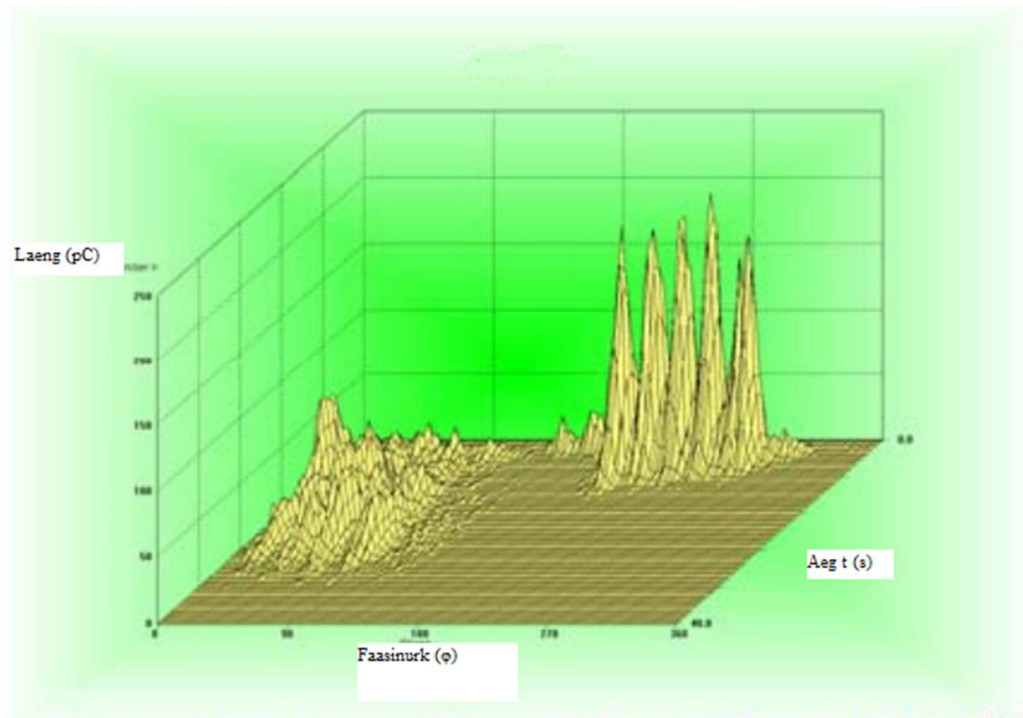
Osalahenduste mõõtmise tulemuste usaldusväärsus sõltub suuresti sellest, palju müra tulemustesse sisse indutseerub. Müraallikateks võivad olla nii võrguseadmed kui ka seadmed, mis elektrivõrgu koosseisu ei kuulu. Osalahenduste mõõtmise kaablites teeb keerukaks asjaolu, et koht, kuhu osalahendused on koondunud, võib osalahenduste mõõteseadmest asuda kilomeetrite kaugusel. Sellises olukorras sõltub mõõdetud andmete usaldusväärsus suuresti kõrvalise müra tasemest, kaablistesse indutseerunud segava müra äratundmisest ja selle kõrvaldamisest mõõtetulemuste hulgast. Kuna kaabelliinid on üldjuhul pikad, võib nendes mõõtmise käigus indutseeruda palju ja erinevate allikate poolt tekitatud mõõtmist segavat müra. Kogu müra kõrvaldamine mõõtetulemustest osutub raskesti saavutatavaks, seega mõõdetakse enne osalahenduste mõõtmist ära müratase. Väärtusi, mis jäävad sellest allapoole, mõõtmisel ei arvestata. Müratase jääb üldjuhul vahemikku 10-200 pC. [15]

Segavat müra osalahenduste mõõtmisel võivad tekitada [15]:

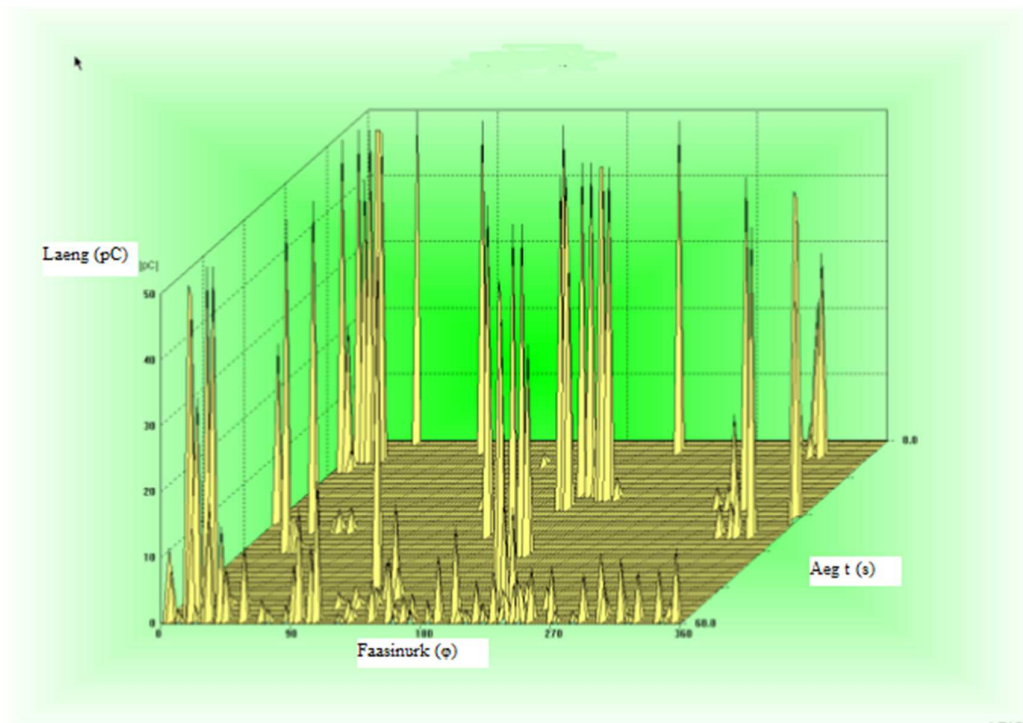
- Osalahendused, mis lähtuvad mõõteseadmetest. Näiteks ebatasasused mõõtekaablite kestas (Joonis 2.11) või vabalt liikuvate mõõtesüsteemi osade vahel tekkivad osalahendused (Joonis 2.12).
- Mõõtmispaigale lähedalasuvate objektide ehitustööd, kus kasutatakse masinaid, mis võivad tekitada väga kõrge sagedusega häireid, nagu näiteks lööktrell (Joonis 2.13).
- Elektrivõrgus tehtavad lülitamised, mille käigus opereeritakse mingi võrguelemendiga. Näiteks võimsuslülitiga.
- Raadiosageduslikud signaalid, mis võivad tekkida objektil kasutatavast raadiosidest. Raadiolained võivad indutseeruda ka maanduskontuuridesse ja seeläbi mõõteseadeldisse.
- Raadiosignaalid, mis tulenevad massimeediakanalite edastamisest või mobiiltelefonidelt (Joonis 2.14).
- Segavad impulsid, mis lähtuvad sagedusmuundurilt ja lülititelt.
- Osalahenduste transiendid, mis lähtuvad alajaamas paiknevast elektriseadmestikust.
- Huum-, luminofoor- või muud gaaslahenduslambid.



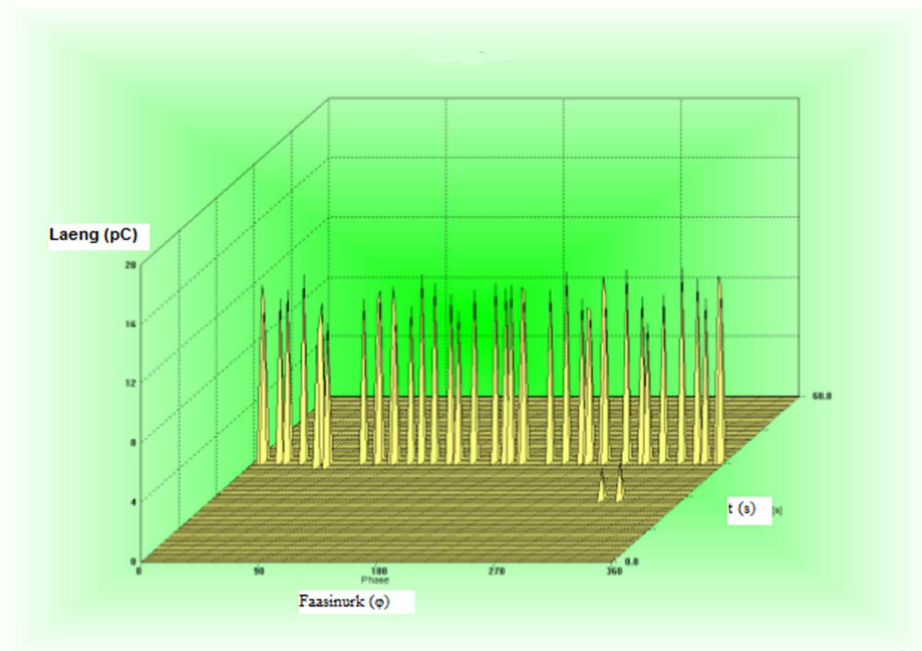
**Joonis 2.11. Mõõteseadme juhtmetest lähtuvate osalahenduste häiring [15]**



Joonis 2.12. Vabalt liikuvate mõõteseadme osade poolt tekitatud häiring [15]



Joonis 2.13. Lööktrelli poolt tekitatud häiring [15]



**Joonis 2.14. Mobiiltelefoni signalidest tekitatud häiring [15]**

Joonistel 2.11 – 2.14 on kujutatud erinevatel põhjustel tekitatud mõõtehäiringuid osalahenduste mõõtmisel. Joonistel on x-teljel faasinurk  $\phi$ , y-teljel impulsside arv ja z-teljel häiringu poolt tekitatud laengu suurus.

Eelpool loetletud häiringute vähendamiseks või kaotamiseks kasutatakse elektroonilisi filtreid, mille abil vähendatakse näiteks mõõteseadme sagedusmuunduri poolt tekitatud müra. Selliseid filtreid on laialdaselt kasutuses kõrgepingelaborites ja sobivad ka osalahenduste mõõtmisel häiringute vähendamiseks. [15]

Taustamüra vähendamiseks, mis häirivad osalahenduste elektrilisi mõõtmisi, tuleb kasutada kvaliteetsset ja hästi ühendatud sidestuskondensaatorit, mis on ühendatud mõõteimpedantsiga. Mõlemad peavad olema testitavale objektile võimalikult lähedal. [15]

## **2.7. Keskpingekaablite osalahenduste mõõtmise protseduur**

Keskpingekaablites on osalahenduste mõõtmiseks tarvilik järgida kindlaid protseduure, mis tagavad töötajate ohutuse ja usaldusväärsed mõõtetulemused. Suurimat tähelepanu vajavad algandmed, kuna need loovad eeldused tõepärase mõõtetulemuse saamiseks. Osalahenduste mõõtmise protseduur on kirjeldatud järgneva kümne punktiga [14].

- 1) Keskpinge kaabli põhiandmete väljaselgitamine
  - kaabli tüüp
  - kaabli kogupikkus
  - jätkumuhvide arv ja asukoht kaablis
- 2) Kaablite pingetuks tegemine ja lahti ühendamine elektrivõrgust (lahklülitide abil) 3.
- 3) Kaabli faasijuhtide maandamine 4.
- 4) Vajadusel – dielektrikust kaitseekraanide paigaldamine
- 5) Vajadusel – kaabli faasijuhtide lahti ühendamine lülitusseadmest
- 6) Kaabli töömaanduse eemaldamine ja kantavmaandusega asendamine
- 7) Osalahenduste mõõtmine sumbuva vahelduvpingega; ~ 20 min / üks faas
  - mõõtesüsteemi kalibreerimine
  - mürataseme mõõtmine (üldjuhul pingel 2 kV) - testpinget tõstetakse 1 – 2 kV astmetena kuni osalahenduse tekkeni
  - osalahenduste tekkepinge määramine
  - osalahenduste mõõtmine ja tulemuste salvestamine pingetel  $U_0$ ,  $1,3U_0$ ,  $1,5U_0$  ja  $2U_0$  juhul kui kaabliomanikuga muudes testpinge väärtustes kokku ei lepita
- 8) Mõõtetulemuste kiiranalüüs kohapeal
- 9) Kaabli võrku ühendamine ja taaspingestamine
- 10) Mõõtetulemuste mahukam analüüs ja kirjaliku aruande koostamine kaabli omanikule

Enne mõõtmist tuleb kaabel eraldada muudest elektrivõrgu komponentidest. Kaabel tuleb lahti ühendada mõlemast otsast. Välised lisakomponendid võivad raskendada või välistada mõõtmise teostamist ning halvimal juhul põhjustada ka väära mõõtmistulemuste tõlgendamist. [14]

Enne katse alustamist kalibreeritakse kogu mõõteahel, sealhulgas mõõteobjekt. Tuntud suurusega laeng suunatakse katseobjekti ja mõõtesüsteem kohandatakse selle suurusega laengut näitama. Kalibraator peab alati olema ühendatud paralleelselt katseobjektiga. [9]

### **2.7.1. Kaabli lahtiühendamine**

Mõõdetavale kaablile ei tohi olla ühendatud [14]:

- liigpingepiirikuid
- induktiivseid pingetrafosid (kahe faasi vahele ühendatud trafo paistab mõõteseadmele kui maaühendus)

- kombineeritud sensoreid (kus on ühendatud pinge ja voolu mõõtmine)
- reaktoreid (kaarekustutuspool)
- kondensatoreid
- pöörlevaid jõuajameid
- sulavkaitsmeid

1) Kaabel on ühendatud õhkisolatsiooniga seadmestikku:

Kui kaabli otsad on ühendatud õhkisolatsiooniga seadmestikku kus on lahküliti, pole üldjuhul vajalik kaablit lahkülitist lahti ühendada. Enne mõõtmiste alustamist ühendatakse kaabel võrgust lahti lahkülitite avamisega. Kui seadmestikus pole lahkülitit tuleb kaabli faasijuhid seadme lattidelt mehaaniliselt lahti ühendada. [14]

2) Kaabel on ühendatud SF<sub>6</sub> isolatsiooniga seadmestikku:

Kui kaabli otsad on ühendatud SF<sub>6</sub> seadmestikuga, tuleb kaabli faasijuhid (nt Raychem RICS T-adapter) seadmestikust füüsiliselt lahti ühendada. Kaabel tuleb SF<sub>6</sub> seadmestikust lahti ühendada kuna neis olevad mahtuvuslikud pingeindikaatorid põhjustavad elektrilisi lahendusi mis raskendavad kaablite osalahenduste mõõtmisi.[14]

3) Kaabel on ühendatud õhuliiniga:

Kui kaabel on otse (ilma lahkülitita) ühendatud õhuliiniga, tuleb kaabel õhuliini juhtidest lahti ühendada. Kui kaabli ja õhuliini vahel on õhkisolatsiooniga lahküliti, piisab lahküliti avamisest, eeldades, et muid väliseid komponente nagu liigpingepiirikuid ei jää ühendatuks mõõdetava kaabliga.[14]

## **2.8. Osalahenduste mõõtmisel kasutatavad seadmed**

Osalahenduste mõõtmiseks pakuvad suuremad ja tuntumad mõõteseadmete tootjad küllalt kompaktseid ning mitmeotstarbelisi mõõteseadmeid. Nende mitmeotstarbelisus seisneb võimekuses ühe seadme abil läbi viia mitmeid erinevaid mõõtmisi testitava kaabli seisukorra hindamiseks.

Antud töös on vaadeldud saksa tootja Seba KMT pakutavad mõõteseadet, kuna Eestis kasutatakse sama ettevõtte toodangut ka kaablirikete lokaliseerimisel ja kaabelliinide

teimimisel [16]. Teise mõõteseadmena on vaadeldud Austria mõõteseadmete tootja BAUR GmbH poolt pakutavat mõõteseadeldist.



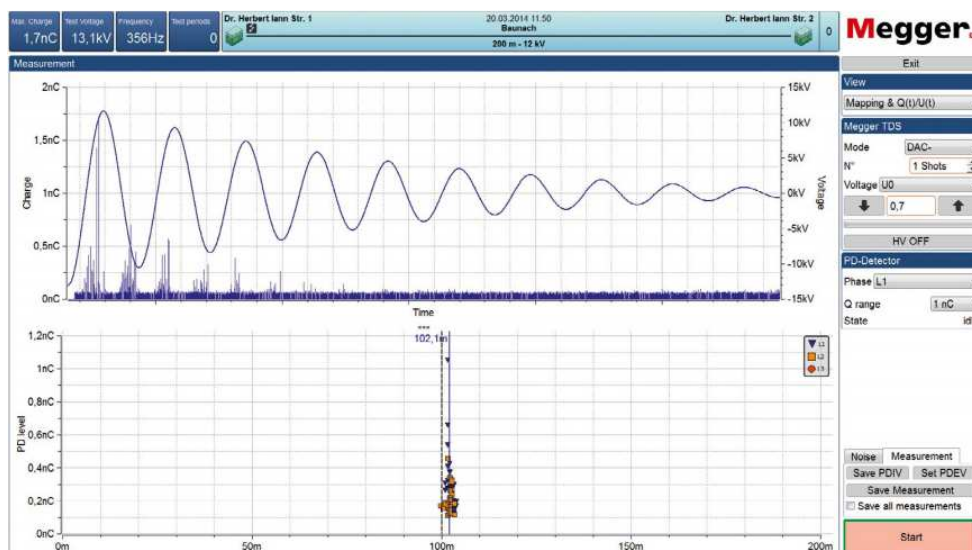
**Joonis 2.15. Seba TDS 40/60 [17]**

Joonisel 2.15 on kujutatud Seba KMT mõõteseadeldist TDS 40. Tootelehe andmetel on antud seadmega võimalik sooritada väga madala sagedusega (VLF) kaabelliinide teimimist, DAC testimist, alalisvoolutesti, kaotangensi mõõtmist ja kaablikesta terviklikkuse teste. Mudeli TDS 40/60 väljundpinge ulatub 40-60kV-ni (vastavalt seadmele) ja DAC sagedust on võimalik mõõta vahemikus 50-500 Hz. Koosneb kahest komponendist, mis kaaluvad vastavalt 55 kg ja 48 kg. [17]



**Joonis 2.16. Seba PD detector PDS 60 [17]**

Joonisel 2.16 on kujutatud SebaKMT osalahenduste mõõtjat PDS 60. Seade võimaldab mõõta osalahendusi pingel kuni 60kV. Mõõta saab osalahendusi nii DAC kui ka VLF mõõtemetodiga. Võimaldab mõõta kuni 16 km pikkuseid kaabelliine. Kaalub 31 kg. [17]



**Joonis 2.17. SebaKMT seadme osalahenduste mõõtetulemuste näide DAC meetod [17]**



**Joonis 2.18- Baur PD-TaD 60 [18]**

Joonisel 2.18 on kujutatud Austria tootja Baur osalahenduste mõõtesüsteemi PD-TaD 60. Võimaldab teostada mõõtmisi kuni 60kV pingeni. Osalahenduste mõõtmine toimub VLF meetodil, samuti on võimalik teostada kaotangensi ja kaablikesta terviklikkuse teste. Kaalub 32 kg. [18]





**Joonis 2.19. Pry-Cam Portable [28]**

Joonisel 2.19. on kujutatud firma Prysmian Group toodet Pry-Cam Portable. See seade mõõdab osalahendusi elektromagnetilise sensori abi. Kasutatakse peamiselt alajaama seadmetes või kaablite otsamuhvides osalahenduste mõõtmisel. Ühe seadme mõõtmine kõnealuse seadmega võtab aega umbes 10-20 minutit. Eriliseks teeb selle seadme Wifi liides, mille kaudu toimetatakse andmed otse seadmest arvutisse ja mõõdetud andmeid analüüsivad Prysmian Group-i eksperdid, kes koostavad mõõtetulemuste alusel protokollid mõõdetud seadme kohta. [28]



**Joonis 2.20. Pry-Cam Grids [28]**

Joonisel 2.20 on kujutatud firma Prysmian Group toodet Pry-Cam Grids, mille abil saab mõõta osalahendusi parasjagu võrgus töötaval elemendil. Mõõteandmete kogumiseks ühendatakse seade võrguelemendi külge. Mõõteandmete kogumine toimub üle Wifi võrgu ja seda on võimalik kuvada reaajas otse võrgujuhtimisprogrammidesse. [28]

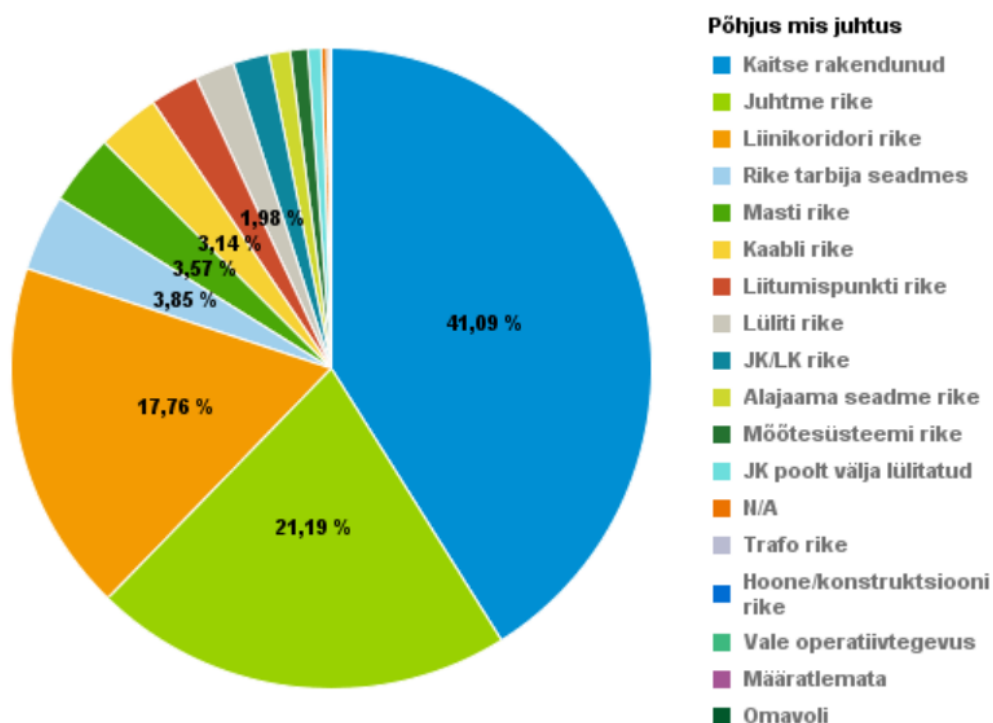
### 3. Osalahenduste mõõtmise rakendamine

Osalahenduste mõõtmises nähakse head võimalust jaotusvõrgu kvaliteedi parandamiseks läbi kaabelliinide testimise. Osalahenduste mõõtmist võib rakendada juba mõnda aega töös olnud kaablitele, kuid suuremat potentsiaali omab ehitusjärgne mõõtmine, mida tuleks teostada enne kaabelliini töösse laskmist.

#### 3.1. Rikete statistika

Rikete statistikas on aluseks võetud Elektrilevi OÜ juhitud jaotusvõrgus 2015 aastal toimunud sündmused. Antud statistika põhineb jaotusvõrgu dispetšerite poolt võrgujuhtimissüsteemi sisestatud andmetel. Tegemist on esialgse infoga ja kõikide rikete täpse põhjuse selgumisel selles süsteemis parandusi ei tehta, seda peab arvestama kõnealuste statistiliste näitajate hindamisel.

2015. aastal toimus Elektrilevi OÜ juhitud võrgus 20114 riket. Rikete põhjuslik jaotus on kujutatud joonisel 3.1.



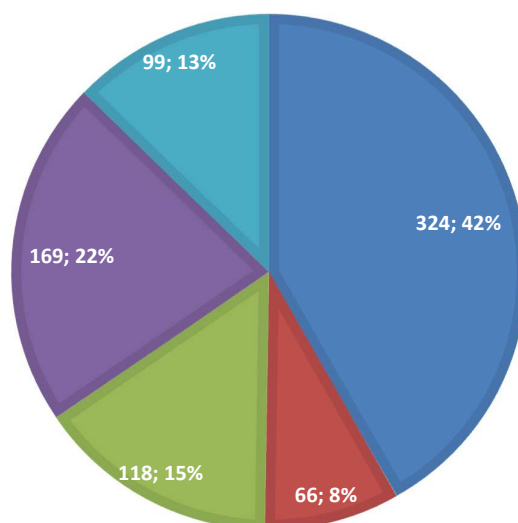
Joonis 3.1. Rikete põhjuslik jaotus [23]

Jaotusvõrgus toimunud 20114 rikkest 776 põhjuseks on määratud kaabli rike. Edasised jaotused on kujutatud tabelis 1.1. ja joonisel 3.2.

**Tabel 1.1. Kaablirikete põhjused [23]**

Kaabli rike	776
Isolatsiooni rike	324
Otsamuhvi rike	66
Kaevetööd	118
Kontakti rike	169
Muu põhjus	99

■ Isolatsiooni rike ■ Otsamuhvi rike ■ Kaevetööd ■ Kontakti rike ■ Muu põhjus



**Joonis 3.2. Kaablirikete põhjuslik jaotus**

Eelnevas statistikas on koos nii madal- kui ka keskpinge võrgus toimunud sündmused, seega ei saa võtta seda statistikat üks-ühesena keskpinge kaablite kvaliteedi kohta jaotusvõrgus. Siiski annab see üsna hea pildi kaablirikete osakaalust kogu rikete arvust ja nende põhjuslikust jaotusest. Puudulikust kaabelliinide või nende manuste installatsioonist annaks aimu täpsem algandmete sisestamine ja rikete tegelike põhjuste selgumisel andmebaasidesse sisestatud info parandamine.

## 3.2. Teostatud mõõtmised jaotusvõrgus

Elektrilevi OÜ võrgus on osalahenduste mõõtmisi XLPE isolatsiooniga kaabelliinidel teostatud aastatel 2013 ja 2014. 2013. aastal mõõdeti kuus XLPE isolatsiooniga kaabelliini Tallinnas, mille paigaldamise aastad jäävad vahemikku 1990-2004. [19] 2014. aastal mõõdeti 8 XLPE isolatsiooniga kaabelliini, millest üks asub Tallinnas ja oli mõõdetavate kaabelliinide seas ka aastal 2013. [20] Tulemuste võrdlemiseks ongi võetud vaatluse alla kahel järjestikkusel aastal mõõdetud kaabelliin numbriga 11612.

### 3.2.1. Rakendatud mõõtemetod

Mõõtmiste läbiviimisel rakendati sumbuva vahelduvpingelise mõõtmise meetodit (DAC). 10kV tööpingega kaabelliini puhul võeti  $U_0$  väärtuseks 5,8kV. Katse algpinge oli  $0,1U_0$ , sellel pingel mõõdeti ära müratase. Hilisema mõõteandmete analüüsi käigus jäeti mõõtetulemuste seast välja osalahendused, mille suurus oli väiksem mõõdetud müratasemest. Pinget tõsteti sammuga  $0,1U_0$  kuni osalahenduste tekkimiseni. Mõõtetulemused salvestati vähemalt järgnevatel pingeastmetel – osalahenduste tekkimise algpinge,  $1,0 U_0$ ,  $1,5U_0$ ,  $1,7U_0$  ja  $2,0U_0$ . [19]  $U_0$  väärtuseks on võetud liini tööpinge faasi kohta, standardi järgi peaks rakendama kaabelliini nimipinge järgi arvutatud  $U_0$ .

Enne mõõtmisi kalibreeriti katseskeem. Teadaoleva suurusega laeng suunati katseseadmesse kasutades kalibreeritud kalibraatorit CAL1E Sn: 398 (tootja Power Diagnostix). Mõõtesüsteemi võimendus seadistati vastavalt kalibreerimisel saadud tulemustele. [9]

Peale mõõtmisi teostati tulemuste järeltöötlus OWTS-explorer tarkvaraga. OL põhjuseid otsiti analüüsides allikate asukohta kaablis. Näiteks arvestati, et OL, mis toimuvad positiivsetel ja negatiivsetel pinge tippväärtustel, viitavad koroonalahendustele. [9]

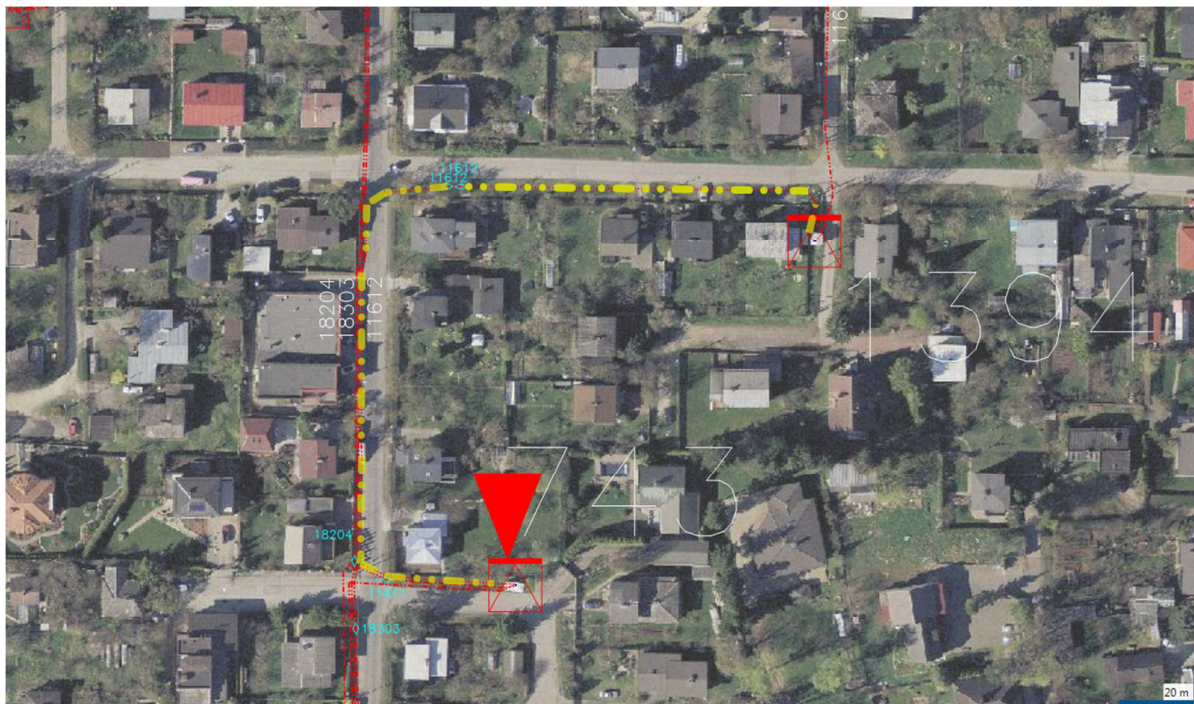
Osalahenduste allikas leitakse reflektomeetria (TDR, *Time Domain Reflectometry*) abil. Meetodi põhimõte seisneb selles, et leitakse kaablis liikuvad pulsipaarid, millest üks liigub OL allika poolt mõõteotsa poole ja teine liigub kaabli vastasotsa poole ning pärast peegeldumist jõuab mõõteseadmesse. OL allika asukoha määramise täpsus on 1% kaabli pikkusest. Meetodi täpsus sõltub olulisel määral kaabli pikkusandmete täpsusest. Ebatäpne pulsi liikumise kiiruse kalibreering, mis tuleneb vales kaabli pikkusest, võib põhjustada suuri ebatäpsusi OL asukoha määramisel. [9]



**Joonis 3.3. Osalahenduste mõõtmine Navesti alajaamas [9]**

### **3.2.2. Mõõtetulemused**

Tehtud mõõtmiste tulemusi on mõistlik kajastada Tallinnas asuva kaabelliini 11612 näitel, mis asub alajaamade 1394 ja 743 vahel. Antud kaablile tehti osalahenduste mõõtmisel aastatel 2013 ja 2014.



**Joonis 3.4. Kaabelliini 11612 (AJ 1394 – AJ 743) paiknemine looduses [21]**

Joonisel 3.4. on kujutatud mõõdetavat kaabelliini 11612 (joonisel kollasega). Tabelis 3.2. on andmed mõõdetava kaabelliini kohta. Tabelis 3.3. on toodud tootjapoolsed parameetrid kaablile AHXAMK-W.

**Tabel 3.2. kpl 11612 andmed [19,20]**

Kaabli number	11612
Alajaamast	1394
Alajaama	743
Kaabli tüüp	AHXAMK-W 3x120+Cu35
Paigaldamise aasta	1994
Pikkus	264 meetrit (354)
Jätkumuhvide asukoht	106 meetrit
Otsamuhvid	Rayhem
Mõõtmiste kuupäev	11.09.2013, 2.10.2014

**Tabel 3.3. AHXAMK-W parameetrid [22]**

Kaabli tüüp	AHXAMK-W 3x120+CU25
Diameeter	72 mm
Takistus	0,253 $\Omega$ /km
Südamiku takistus	0,524 $\Omega$ /km
Mahtuvus	0,22 $\mu$ F/km
Nimipinge	20 kV
Tööpinge	10.5 kV

Esimesel mõõtmisel avaldusid osalahendused kaabelliini kõikides faasides, kui sellele rakendati mõõteseadmega pinget  $1 \cdot U_0$ , osalahenduste esinemise tihedus kasvas, kui pinget tõsteti. [19]

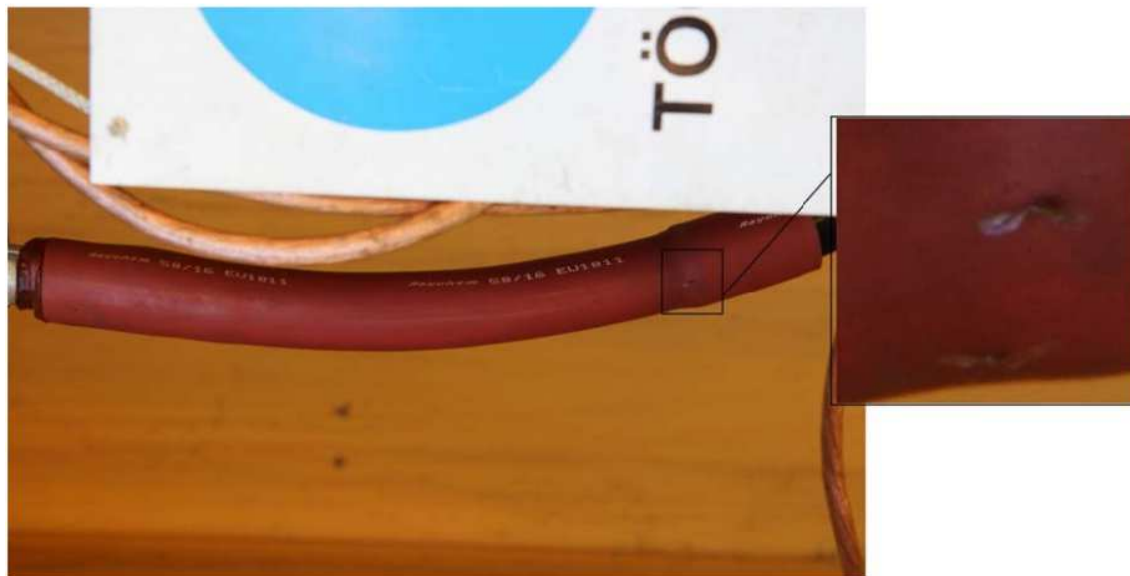
Kõikides faasides avaldusid osalahendused kolmes erinevas kohas – mõõteseadme poolse kaabli otsamuhvis, jätkumuhvis, mis asetseb 106 meetri kaugusel mõõteseadmest ja 255 meetril kaabelliini kaugemas otsas. Osalahenduse suur ja üheselt mõistetav kontsentratsioon ühes asukohas annab selge vihje, et tegemist võib olla kaabelliini isolatsiooni degradeerumisega selles kohas. [19]

Vastavalt mõõdetud osalahenduste parameetritele anti nende põhjal soovitus kaabelliini preventiivseks remondiks [19]





Joonis 3.5. kpl 11612 alajaamas 1394 [19]



Joonis 3.6. kpl 11612 ühe faasi otsamuhvi defekt alajaamas 1394 [19]

Joonisel 3.5. on kujutatud kaabelliini 11612 ots alajaamas 1394. Joonisel 3.6 on kujutatud fotomaterjali põhjal avastatud isolatsiooni riket, millest tõenäoliselt lähtusid ka osalahendused.

2014. aastal tehti samale kaabelliinile uus osalahenduste mõõtmise protseduur. Mõõtmised viidi läbi 2. oktoobril 2014. Kahe osalahenduse mõõtmise vahel ei olnud kaabelliini seisukorra parandamiseks meetmeid kasutusele võetud.

2014. aasta mõõtmistulemuste kohaselt tuvastati osalahendused kaabelliini 11612 ajalaam 1394 poolses otsamuhvis ja jätkumuhvis, mis asus umbes 105 meetri peal. Mõõtetulemused on võrreldavad 2013. aastal sooritatud mõõtmistega. [20]

Mõõteseadmete kalibreerimise käigus tuvastati XLPE kaabli kohta ebatavaliselt madal impulsi liikumise kiirus. Mõõdetud impulsi liikumise kiirus oli 123 m/μs. Tavapärase impulsi levimise kiirus XLPE isolatsiooniga kaabelliinides jääb vahemikku 160-170 m/μs. Tavapärasest madalam impulsi liikumise kiirus võib viidata algandmetesse valesti sisestatud kaabelliini pikkusele. Mõõtmiste järgselt arvutati üle kaabelliini pikkus ja viidi see vastavusse tavapärase impulsi liikumise kiirusega XLPE isolatsiooniga kaabelliinides. Impulsi liikumise kiiruseks võeti 165 m/μs ja selle näitaja alusel tuli kaabelliini arvutuslikuks pikkuseks 354 meetrit. Arvutusliku kaabelliini pikkusega tehti uued mõõtmised ning nende tulemusel tuvastati osalahendused kaabelliini mõlemas otsamuhvis ja vahemikus 135-140 meetrit. [20]

**Tabel 3.4. Kaabelliinis 11612 mõõdetud osalahendused [19]**

Cable from	1394 to 743	Year	1994
CableSection	11612	Length	264 m
Phase to Ground Voltage	6 kV (RMS)		

	L1	L2	L3
GroundNoise [pC]	-	-	-
PDIV [kV RMS]	-	-	-
PDEV [kV RMS]	-	-	-
PDmax [pC] (PDIV)	-	-	-
PDlevel [pC] (PDIV)	-	-	-
PDmax [pC] (U <sub>o</sub> )	400	1108	887
PDlevel [pC] (U <sub>o</sub> )	188	898	490
PDmax [pC] (1.7*U <sub>o</sub> )	3416	2333	1978
PDlevel [pC] (1.7*U <sub>o</sub> )	1269	1421	733
PDmax [pC] (2*U <sub>o</sub> )	3416	3028	2515
PDlevel [pC] (2*U <sub>o</sub> )	1435	1557	1273
Capacitance [uF]	0.091	0.092	0.090
Frequency [Hz]	659.38	655.74	670.43
Diel. Losses	2.76E-3	2.84E-3	2.79E-3



**Tabel 3.5. Kaabelliinis 11612 mõõdetud osalahendused kaabelliini korrigeeritud pikkusega [20]**

Cable from	1394 to 743	Year	1994
CableSection	11612	Length	354 m
Phase to Ground Voltage	6 kV (RMS)		

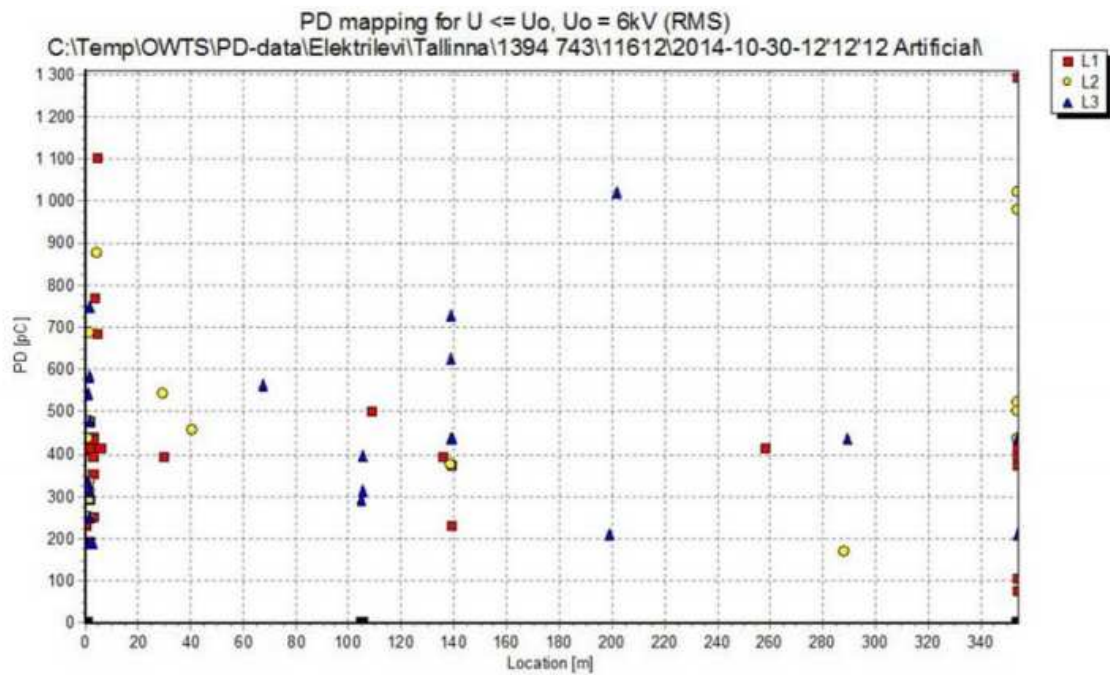
  

	L1	L2	L3
GroundNoise [pC]	-	-	-
PDIV [kV RMS]	-	-	-
PDEV [kV RMS]	-	-	-
PDmax [pC] (PDIV)	-	-	-
PDlevel [pC] (PDIV)	-	-	-
PDmax [pC] (U <sub>o</sub> )	977	836	407
PDlevel [pC] (U <sub>o</sub> )	791	753	330
PDmax [pC] (1.7*U <sub>o</sub> )	1419	925	727
PDlevel [pC] (1.7*U <sub>o</sub> )	825	833	475
PDmax [pC] (2*U <sub>o</sub> )	3430	3159	1036
PDlevel [pC] (2*U <sub>o</sub> )	1157	983	603
Capacitance [uF]	0.092	0.092	0.094
Frequency [Hz]	666.67	666.67	655.74
Diel. Losses	2.28E-3	2.29E-3	2.35E-3

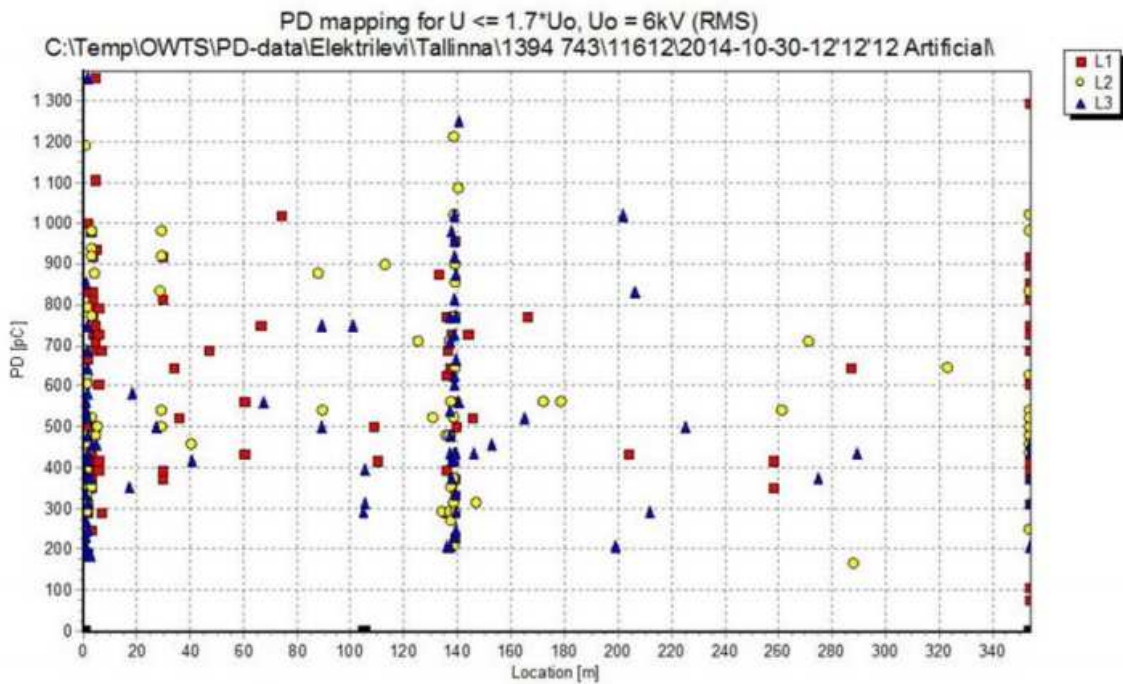
**Tabel 3.6. Kaabelliini 11612 mõõtetandmed [19]**

	PDIV (kV)	PDlevel at PDIV (pC)		PDlevel U<U <sub>o</sub> (pC)		PDoccurrence U<U <sub>o</sub>	PDlevel U <sub>o</sub> <U<2U <sub>o</sub> (pC)		PDoccurrence U <sub>o</sub> <U<2U <sub>o</sub>
		Max	Avg	Max	Avg		Max	Avg	
Whole Cable	5	358	264	1084	325	5	1701	618	24
L1:	8	124	82	124	82	2	1642	584	22
Termination	8	84	84	84	84	1	884	316	4
Cablepart	8	63	63	63	63	1	1600	741	13
Joint	8	124	88	124	88	1	1642	458	4
Cablepart	12	412	201				463	196	2
Termination									
L2:	7	1042	445	1084	424	8	1701	757	24
Termination	7	63	63	63	58	1	1134	470	3
Cablepart	7	1042	951	1084	966	3	1546	923	16
Joint	8	295	179	295	179	3	1701	504	4
Cablepart	7	95	67	95	67	2	619	191	2
Termination									
L3:	5	358	264	395	309	6	1326	501	27
Termination	10	53	53				737	384	4
Cablepart	5	358	335	395	333	5	1326	536	19
Joint	12	821	589				1200	642	3
Cablepart	5	53	53	53	53	1	653	156	2
Termination									

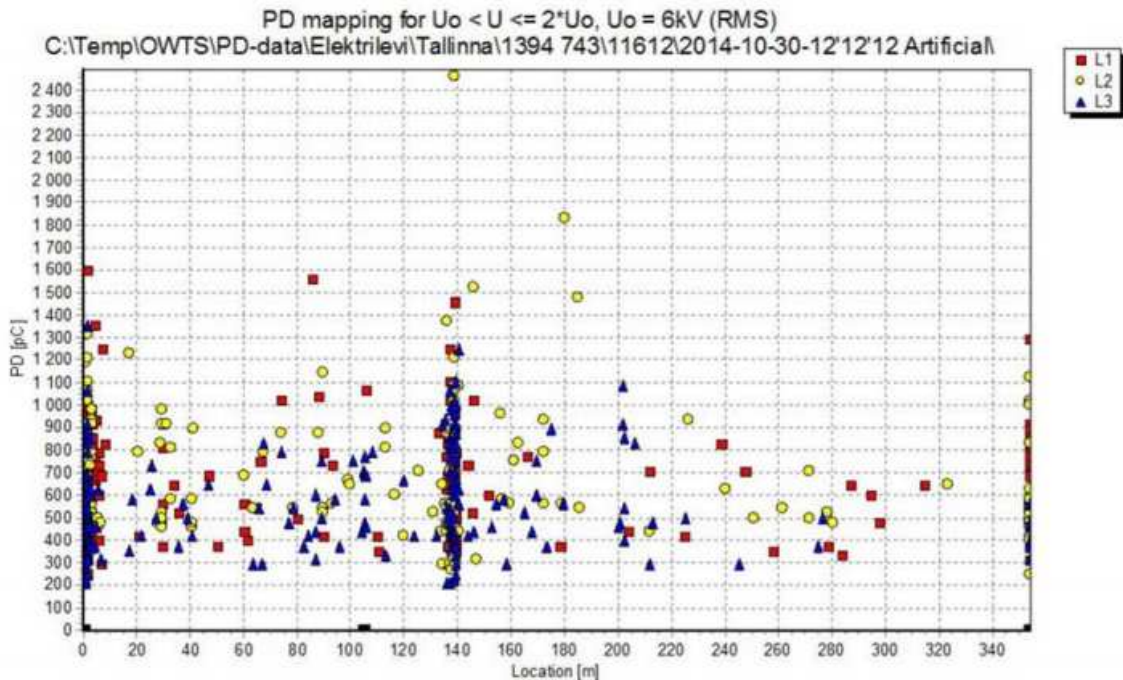
Tabelis 3.6. on toodud andmed kaabelliini 11612 mõõtetulemuste kohta. Tabelis on toodud osalahenduste alguspinge, laengute suurused ja arvilised suurused nii kaabelliini, jätkumuhvi kui ka otsamuhvide kohta.



Joonis 3.7. Osalahenduste laengud kaabelliinis 11612 pingel  $U_0$  [19]



Joonis 3.8. Osalahenduste laengud kaabelliinis 11612 pingel  $1,7 \cdot U_0$  [19]



**Joonis 3.9. Osalahenduse laengud kaabelliinis 11612 pingel  $2 \cdot U_0$  [20]**

Joonistel 3.7. – 3.9. on kujutatud kaabelliini 11612 mõõtmised erinevatel pingetel. Antud joonistest nähtub otseselt, et osalahenduste tekkimise määr isolatsioonis on tugevas sõltuvuses mõõtmise käigus rakendatava pingega kaablile. Näha on ka seda, et osalahendused esinevad antud kaablis juba tööpingel.

Mõõtmiste tulemusena Eesti jaotusvõrgus tuleb välja osalahenduste mõõtmistulemuste varieeruvus. Isegi väiksem viga lähteandmete sisestamisel võib mõjutada oluliselt tulemuste tõepärasust. Eelnäidatud juhul seisnesid erisuses peamiselt osalahenduste põhjustaja asukoha määramises.

Kõnealusel liinil on praeguseks mõõtmistulemuste põhjal välja selgitatud puudused likvideeritud. Esialgselt paigaldatud jätkumuhvi asemele installeeriti 2015. aasta novembris kaks Rayhemi jätkumuhvi. Välja vahetati ka kaabelliini otsamuhvid. Remonttööd antud kaabelliinil jõuti ära teha preventiivselt, antud defektid kaabelliini esialgsel installatsioonil rikut põhjustada ei jõudnud. [23] Tõenäoline põhjus selleks on kaablitüübi nimipinge, milleks on 20kV. Praeguse tööpinge juures peab järelikult pikemat aega (21 aastat) vastu ka puudulikult installeeritud kaabelliin koos oma manustega.

### 3.3. Meetmed paigalduskvaliteedi parandamiseks

Eelnevas alajaotises tutvustatud mõõtetulemuste põhjal võib väita, et kõige tõenäolisemalt tekivad osalahendused puudulikult installeeritud kaablimanustes. Monoliitse kaabelliini isolatsioonis osalahenduste tekkimine on pigem erandlik. Et tõsta kaabelliinide ja selle manuste installatsiooni kvaliteeti on Eesti suurim jaotusvõrguettevõtte sätestanud võrgus kaablitööde tegijatele antud valdkonnas töökultuuri tõstmiseks vastavasisulised nõuded ja eeskirjad.

Nõuded on eraldi välja toodud nii plastisolatsiooniga keskpinge kaablite jätku- ja otsamuhvidele ning nende kasutamisele kui ka personali kvalifikatsioonile, kes keskpinge kaablitele jätku- ja otsamuhve valmistavad.

Nõuete eesmärgiks on tagada elektrivõrguga funktsionaalselt sobivate ja ühilduvate, pika kasutusega, töökindlate, optimaalsete omaduste ja hooldusvajaduse, keskkonnaga arvestavate seadmete ning põhimaterjalide hankimine. Nõuded põhinevad Eesti ja üldtunnustatud rahvusvahelistel standarditel, arvestavad Eesti ja Euroopa Liidu seadusandlust, kohalikke keskkonnaolusid ning parimat võrgupraktikat meie regioonis. [24]

Otsa- ja jätkumuhvide paigaldamise tähtsaimaks nõudeks on see, et kaablimuhv peab tagama kaabliga samaväärse elektrilise ja mehaanilise tugevuse. Kõikide muhvide tegemine on lubatud ainult toote paigaldusjuhendis toodud paigalduskeskkonda järgivatel tingimustel. Kõigi muhvide montaažil tuleb tagada kaitse välismõjude eest (sademed, tolmu jne). Otsa- ja jätkumuhvid peavad olema peale nõuetekohast paigaldust veekindlad nii piki- kui ristisuunas. Peab olema tagatud elektriline väljauhtlustus siirdemuhvi abil ühendatavate kaablite vahel. Kinni tuleb pidada tootja juhendis nõutud painderaadiustest ja minimaalsetest õhkvahemikest. [24]

Üldjuhul tehakse iga kaablimuhv kaheisikuliselt: vastutav muhvipaigaldaja ja tööühme liige. Ehitatavatel või remonditavatel kaabelliinidel võivad vastutava muhvipaigaldajatena töötada isikud, kes on [25]:

saanud tootjapõhise vastava pingeklassi väljaõppe, 1-20kV töödel sooritanud testi ja tööoskuste/võtete tõendamiseks teinud praktilise tööna 12kV üleminekumuhvi (plast + õliisolatsiooniga kaabel) ning 35kV ja kõrgema pingega töödel lisaks teinud praktilise tööna välisotsamuhvi.

Kui eksamineeritav soovib saada õigust mitme tootja toodete paigaldamiseks, peavad eksamineeritaval olema vastavate tootjate toodete koolitustunnistused. Praktilise eksamitöö

konkreetne üleminekumuhv loositakse tootjate toodete seast kelle koolitustunnistused on eksamineeritava poolt esitatud. Eksamineerija teeb pärast koostekvaliteedi kontrollimist analüüsiakti ning annab hinnangu- vastab nõuetele või ei vasta nõuetele. [25]

Kaablipaigaldajad peavad enne tööle asumist läbima Elektrilevi OÜ poolt aktsepteeritava programmiga koolituse, mis sisaldab kaablite paigaldamise viise ja nõudeid. Koolituse läbinud kaablipaigaldajale peab pärast koolituse läbimist olema väljastatud vastavasisuline tunnistus. Kvalifikatsiooni säilitamiseks peab muhvi paigaldaja läbima iga kolme aasta järel täiendõppe koos kirjaliku kontrolltestiga ja sooritama praktilise töö. [25]

Muhvi paigaldusjuhendi esmakordsel eiramisel rakendub lepingujärgne leppetrahv ja uue muhvi paigaldamise kohustus. Teistkordsel rikkumisel lisandub vastutava muhvi paigaldaja õiguste kustutamine. [25]

### **3.4. Osalahenduste rakenduslik piirmäär**

Osalahenduste rakendusliku piirmäära määratlemine on vast kõige olulisem küsimus selle parameetri mõõtmise mõistlikkuse kohta. Osalahenduste mõõtmiste kaudu on võimalik selgeks teha, kas mõõdetaval seadmel esineb osalahendusi või mitte, küsimus on selles, kas nende osalahenduste iseloomu järgi on võimalik näiteks kaabelliinile määrata järelejäänud eluiga või mingil moel prognoosida, kui kaua see kaabel ilma tõrgeteta veel talitleb.

Küsimus, kas tuvastatud osalahendus kaabelliinis on elektriseadme elukaare jooksul kahjutu või võib tõenäoliselt häirida lähemal ajal elektrivõrgu tööd on mõõtetulemusi analüüsides olulisim. Palju on uuritud osalahenduste tekkepõhjuste määratlemise meetodeid. Kindel on see, et kui juurutada süsteemi, mille abil saab osalahenduste mõõtetulemuste alusel liigitada kaabelliinil esinevad osalahendused ohtlikuks või mitte, peab sellise süsteemi loomisel kindlasti lähtuma mõõdetavast elektriseadmest. Ei ole universaalset rakendatavat „osalahenduste piirmäära“ ja selle tekkimist ei nähta ka praeguste mõõtemetodite juures lähimas tulevikus. Rakenduslikku piirmäära on võimalik tuletada ainult mõõdetavat süsteemi silmas pidades ja lokaalselt. [1] Tuleb luua mõõdetud osalahenduste tulemuste andmebaas, mille alusel on võimalik selekteerida andmeid kaabli ja muhvide tüübi järgi, paigaldaja järgi, paigaldamise aja järgi jne. Pikaajalise andmete kogumise käigus kogutav suur andmete maht aitab teha statistika põhjal järeldusi. Sellisel juhul on võimalik järeldusi teha nii kaabli või muhvi tüübi käitumise kohta või muhvipaigaldaja töö kvaliteedi kohta. Mõõdetud andmete baasil on võimalik anda täpsemaid hinnanguid tehtavale tööle.

XLPE isolatsiooniga kaabelliinide osalahendusi mõõdetakse tootjatehases, mõõtmise käigus ei tohi pingel  $1,73 \cdot U_0$  esineda osalahendusi, mille laeng ületab 5 pC (vastavalt standardile IEC 60502-2). Kaablitel, mida mõõdetakse installatsioonijärgselt, ei tohi ilmnedu osalahendusi (mürataset arvesse võttes) kuni tööpingeni. [9] Kui installatsioonijärgselt esineb taustamürast suurema laenguga osalahendusi, viitab see installatsiooniveale või transpordi käigus tekkinud defektile.

Kui osalahenduse alguspinge on väiksem kaabli tööpingest, tähendab see seda, et osalahendus degradeerib pidevalt kaabli isolatsiooni. Osalahendus on kaabli jaoks ohutu, kui selle alguspinge väärtus on suurem kui kaabli tavapärase tööpinge. [9] Siin peab siiski arvestama ka seda, et isoleeritud neutraaliga võrgus võib tekkida olukord, kus maaiühenduse korral tõuseb kahes faasis pinge liinipingeni. Et sellises olukorras osalahendus kaabli isolatsioonile ohtu ei kujutaks, võiks osalahenduste alguspinge olla suurem võrgu nimipingest.

Mõõtetulemuste alusel mingisuguse osalahenduste kriitilise piiri sätestamine ei ole veel võimalik. Siin mängib rolli suur muutujate hulk nagu taustamüra, algandmete täpsus jne, mis kõik võivad mõõtetulemusi mõjutada. Osalahenduse poolt põhjustatud defektide arenemise kiiruse määramine pole seega kuigi tänuväärne tegevus. Läbilöögi võimalikkuse hindamiseks peab arvesse võtma defekti parameetreid nagu näiteks selle asukohta, niiskuse olemasolu süvikutes ja rakendatavat pinget. [26]

## Lõputöö kokkuvõte

Osalahenduste kahjulik mõju sai selgeks juba eelmise sajandi alguses. Alates sellest on järjepidevalt arendatud osalahenduste mõõtmise meetodikaid ja kasutatavate mõõtemetoodikate põhjal elektriseadmete isolatsioonile hinnangute andmist. Osalahenduste mõõtmise abil on võimalik välja selgitada, kas kaabelliinis esineb osalahenduste allikaid või mitte. Osalahendust võib pidada indikatsiooniks kaabelliini isolatsiooni degradeerumisele.

Osalahenduste tuvastamisel kasutatavate mõõtemetodite võrdlusel on võrgus tehtavate mõõtmiste puhul mõistlik kasutada DAC ehk sumbuvate võnkumiste meetodit. Erinevates asukohtades mõõtmiseks on mõõteseadmete mobiilsus määrava tähtsusega. Eelnevale kriteeriumile vastab ka väga madala sagedusega VLF meetodil osalahenduste mõõtmine, kuid VLF kahjuks räägib fakt, et selle mõõtemetodi rakendamisel avalduvad kriitilised isolatsiooni defektid väga kõrge pingega testides, mis kahjustab liini isolatsiooni veelgi. Samuti võib antud mõõtemetodi miinusena välja tuua juba eelpool mainitud elektrivälja ebahüüdnähtise jaotuse koosinus-ruutpinge korral ja sellest tulenevad ohud kaablimuhvidele. DAC peamine eelis VLF mõõtmise ees seisneb mõõtmisel kasutatavate sageduste väiksemas erinevuses kaabelliini nimiparameetritest. DAC puhul on mõõtesageduse vahemik 20-1000 Hz ehk mõõtesagedus erineb 1-20 korda võrgusagedusest, VLF puhul on mõõtesageduste vahemik 0,01-0,1 Hz ehk mõõtesagedus erineb 500-5000 korda võrgusagedusest. Lähtudes soovitusel teha mõõtmisi võimalikult lähedaste parameetritega võrgu nimianndmetele, ei ole valiku langetamine sellest aspektist lähtuvalt kuigi keerukas. DAC eeliseks VLF mõõtmise ees võib pidada ka suhteliselt lühikest katse kestust ja väiksemat rakendatavat pinget katse läbiviimisel.

Töös käsitletud uute mõõteseadmete võimekus on teha mõlemat, nii väga madala sageduse kui ka sumbuvate võnkumiste meetodil mõõtmisi. Selline võimekus mõõteaparatuuril tuleks igal juhul tulevikku silmas pidades kasuks. 50 Hz võrgusagedusel osalahenduste mõõtemetodi abil on võimalik asukoht kaablis, kuhu osalahendused on koondunud ja kätte saada kõikvajalikud mõõteandmed, kuid siin seab piiri vajalik mahtuvuslik võimsus, mille genereerimiseks võrguseadmete mõõtmisel alajaamades on majanduslikust aspektist ebaotstarbekas. 50 Hz AC mõõtmist võib rakendada pigem laboratorsetes tingimustes osalahendusi mõõtes. Osalahenduste elektriliste mõõtemetodite miinusena võib välja tuua selle, et kaabelliini peab

mõõtmiste tarbeks lahti ühendama ja igasugune kaabliotste väänamine ei mõju kindlasti isolatsioonile hästi.

Osalahenduste mõõtmise suurimaks segavaks faktoriks on kõrvalistelt objektidelt lähtuv müra. Mõõtetulemuste usaldusväärsuse seisukohalt on tarvilik selline segav müra elimineerida. Müra kõrval on piiravaks teguriks ka mõõdetavate amper-sekund karakteristikute moonutatus, kuna mõõtmine toimub üldjuhul osalahendusi tekitavast allikast kaugel. Selle tõttu on mõistlik mõõta osalahenduste laengut, mille suurus on usaldusväärsem, kuna ei sõltu niivõrd palju teistest muutujatest.

Läbi töötatud materjalides peetakse üheks olulisimaks määrajaks osalahenduste mõõtetulemuste usaldusväärsusele mõõtmised teostanud meeskonna kogemusi antud valdkonnas. Ja valdkonna all tuleb siinkohal silmas pidada just osalahenduste mõõtmist elektrivõrgus, mitte üleüldist võrguseadmete elektrilist mõõtmist. Kogenud personal on see, kes suudab tuvastada ja välistada piisavalt palju mõõtetulemustes häiringuid põhjustavaid faktoreid.

Kui kaabelliinis osalahenduste allikas leidub, on võimalik mõõta selle allika poolt tekitatud osalahenduste laengu suurust. Küll aga ei ole suudetud arendada mingisugust universaalset näitajat või taset, mille põhjal võiks pelgalt osalahenduste mõõtmise abil öelda, mitu aastat mõõdetud elektriseade võrgupingel vastu peab.

Siiski pole osalahenduste mõõtmise rakendusliku piirmäära määramine võimalik. Osalahenduste mõõtmisel põhinevate nõuete rakendamine peab toimuma sihipärasel mõõteandmete kogumisel ja seda toetaval mõõteandmete analüüsil. See tähendab, et mõõteandmed tuleb klassifitseerida vastavalt mõõdetavale seadmele. Aegade jooksul on Eesti jaotusvõrku installeeritud lugematul hulgal erinevate tootjate poolt erineval ajal hangitud elektriseadmeid. Eelnevat asjaolu võib pidada osalahenduste mõõtetulemuste põhjal võrguseadmele hinnangu andmisel kõige suuremaks komistuskiviks. Mõõtetulemuste sihipäraseks kogumiseks on vajalik, et mõõdetavate kaabelliinide kohta oleks võimalikult palju andmeid – mis aastal on liin installeeritud, kui palju on liinil jätkumuhve ja kus need asuvad, mis aastal on jätkumuhvid paigaldatud, mis aastal on otsamuhvid paigaldatud, kas liinil on olnud lühiseid, kes on liini installeerinud jne. Algandmete täpsus loob eelduse tõepärasteks mõõtetulemusteks.

Eelneva analüüsi põhjal on juba installeeritud keskpinge kaablitel osalahenduste mõõtetulemuste põhjal üksikasjaliste järelduste tegemine pigem keerukas. XLPE isolatsiooniga



kaabelliinide osalahendusi mõõdetakse tootjatehases, mõõtmise käigus ei tohi pingel  $1,73 \cdot U_0$  esineda osalahendusi, mille laeng ületab 5 pC (vastavalt standardile IEC 60502-2). Kaablitel, mida mõõdetakse installatsioonijärgselt, ei tohi ilmnedu osalahendusi (mürataset arvesse võttes) kuni tööpingeni. [9] Kui installatsioonijärgselt esineb taustamürast suurema laenguga osalahendusi, viitab see installatsiooniveale või transpordi käigus tekkinud defektile.

Osalahendusi enim tekitavad allikad kaabelliinidel on kahtlemata jätku- ja otsamuhvid. Et vähendada kõnealuste seadmete poolt tekitatavaid osalahendusi on jõudsalt hakatud tõstma muhvi paigaldajate oskusi ja pädevust selles valdkonnas. Järjest karmimaks lähevad nõuded muhve paigaldavatele elektrikutele. Täiendava hinnangu nende inimeste tööle annaks ka installatsioonijärgne osalahenduste mõõtmine, mis võiks käia käsikäes kaabelliini installatsioonijärgse teimimisega.

Põhjust, miks ebakvaliteetselt installeeritud kaablimanused Tallinna piirkonnas väga tihti rikkeid ei põhjusta võib otsida järgnevast - nimelt kasutatakse Tallinna 6 kV ja 10 kV jaotusvõrgus XLPE isolatsiooniga kaabelliine, mille tootjapoolsed nimiparameetrid ületavad pea kahekordselt Tallinna võrgus kasutusel olevaid pingeid. Võrku installeeritavate kaablite tootjapoolne nimipinge on 20 kV. Ebakvaliteetselt paigaldatud jätku- ja otsamuhvide kvaliteeti nimiparameetrite järgi ei saa tihtipeale hinnata ka teimimise käigus, kuna kaabelliini teimimiseks kasutatakse nimipingena võrgunimipingeid 6 või 10 kV ja selle väärtuse kahekordsel rakendamisel ülepingeteimi ajal ei küündi pinge isegi kaabelliini tegeliku nimipingeni.

Käesolevast tööst nähtub, et osalahenduste mõõtmine keskpingekaablites on väga informatiivne mõõtemetod, mis annab palju infot mõõdetava liini kohta. Võimalik on hinnata nii kaabelliini isolatsiooni korrasolekut kui ka liini installeerijate töö kvaliteeti. Juhul, kui osalahenduste mõõtmist soovitakse tulevikus rakendada töö kvalitatiivsuse hindamiseks tuleks võrdluse aluseks olevate mõõteandmete kogumisega jaotusvõrgus alustada kohe ja seda tuleb teha süsteemselt. Selliste mõõteandmete kogumise mõistlikkuse ja osalahenduste mõõtmiste tulemusel saadava kasu peab välja selgitama majanduslik analüüs.

# Kirjandus

- [1] S. Boggs, J. Densley. (2000). Fundamentals of Partial Discharge in the Context of Field Cable Testing. - *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 16 (5), 13-18.
- [2] Treufeldt, Ü. „Kõrgepingetehnika: Loengukonspekt aines AEK 3011,“ Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2010.
- [3] Poljakov, G., Kovarski, A. Elektriseadmete montaaž ja ekspluatatsioon. Tõlge eesti keelde. Tallinn : kirjastus Valgus, 1973.
- [4] Meldorf, M., Tammoja, H., Treufeldt, Ü. ja Kilter, J. Jaotusvõrgud, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2007.
- [5] Clegg, B. Underground cable fault location. Berkshire : McGRAW-HILL Book Company Europe, 1993.
- [6] Paper-Insulated Lead-Covered Cable overview [WWW]  
<http://www.openelectrical.org/wiki/index.php?title=File:Paper-insulated-cable.jpg&limit=100> (27.04.2013)
- [7] Medium voltage cable AHXAMK-W [WWW]  
[http://www.reka.fi/eng/products/dryrex/AHXAMK-W\\_12\\_Medium+voltage+cable\\_1](http://www.reka.fi/eng/products/dryrex/AHXAMK-W_12_Medium+voltage+cable_1)  
(27.04.2013)
- [8] Medgyes, B. Investigation on Electrochemical Migration in the Electronics. Doctoral School of Electrical Engineering [WWW]  
[http://doktori.bme.hu/bme\\_palyazat/2012/hallgato/honlap/medgyes\\_balint\\_en.htm](http://doktori.bme.hu/bme_palyazat/2012/hallgato/honlap/medgyes_balint_en.htm)  
(27.04.2013)
- [9] P. Taklaja, P. Hyvonen, I. Kiitam. TTÜ Lepingu 15108 aruanne "Osalahenduste piirmäärade rakenduslik analüüs keskpinge kaabelliinides", 2016
- [10] Electrical Treeing and the Principle of Parsimony [WWW]  
<http://www.novinium.com/frogblog/?page=10> (27.04.2013)

- [11] Water Trees and Electrical Trees and their role in cable insulation failure [WWW]  
<http://www.electrotechnik.net/2009/07/water-trees-and-electrical-trees-and.html> (20.05.2013)
- [12] Lemke, E. Guide for Partial Discharge Measurements in Compliance to IEC 60270.  
[WWW]  
[https://www.google.ee/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj98eK9iufMAhXjYpoKHUiuBJgQFgggMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.ibrarian.net%2Fnavon%2Fpaper%2FGUIDE\\_FOR\\_PARTIAL\\_DISCHARGE\\_MEASUREMENTS\\_IN\\_COMPL.pdf%3Fpaperid%3D20716939&usg=AFQjCNF\\_iWyfVqRO4Ivo1d3Emh0eMbW5bA&sig2=UCdutbRk0EsYXaQQQNEVzw](https://www.google.ee/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj98eK9iufMAhXjYpoKHUiuBJgQFgggMAE&url=http%3A%2F%2Fwww.ibrarian.net%2Fnavon%2Fpaper%2FGUIDE_FOR_PARTIAL_DISCHARGE_MEASUREMENTS_IN_COMPL.pdf%3Fpaperid%3D20716939&usg=AFQjCNF_iWyfVqRO4Ivo1d3Emh0eMbW5bA&sig2=UCdutbRk0EsYXaQQQNEVzw) (29.04.2016)
- [13] R. Bodega, P.H.F. Morshuis, M Lazzaroni, F.J. Wester. (2004) PD Recurrence in Cavities at Different Energizing Methods. - *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 53 (2), 251-258.
- [14] P. Taklaja. Mõõteseadme ja mõõtmismetoodika tehniline kirjeldus, 2014.
- [15] High-Voltage On-Site Testing with Partial Discharge Measurement. [WWW]  
<http://repository.tudelft.nl/assets/uuid:f93c0b2f-fe53-4568-9b0e-fa18b61b27b3/gulski2008.pdf> (29.04.2016)
- [16] Klaassen, J. (2013). Kesk- ja madalpinge maakaablite rikkeotsingul kasutatavad seadmed ja meetodid/Underground Cable Fault Location Equipment and Methods : bakalaureusetöö. Tallinn : Tallinna Tehnikaülikool (12.05.2016)
- [17] The unique combination system for cable testing and cable diagnosis. [WWW]  
[http://www.sebakmt.com/uploads/crm\\_upload/bro\\_tds-nt\\_en\\_140509.pdf](http://www.sebakmt.com/uploads/crm_upload/bro_tds-nt_en_140509.pdf) (16.05.2016)
- [18] PD-TaD 60 BAUR Portable PD Diagnostics System. [WWW]  
[file:///C:/Users/juri.klaassen/Downloads/DS\\_PD%20and%20tan%20delta%20Diagnostics%20System\\_PD-TaD%2060\\_BAUR\\_en-gb.pdf](file:///C:/Users/juri.klaassen/Downloads/DS_PD%20and%20tan%20delta%20Diagnostics%20System_PD-TaD%2060_BAUR_en-gb.pdf) (16.05.2016)
- [19] P. Hyvonen. (2013) Osalahenduste mõõtmine - lõpparuanne. TTÜ Teadustöö Leping nr Lep13138
- [20] P. Hyvonen. (2014) XLPE isolatsiooniga keskpingeakaablite osalahenduste mõõtmine ning mõõteandmete analüüs - lõpparuanne. TTÜ Teadustöö Leping nr 14124
- [21] Võrguvarade haldamise programm Xpower WebMap

- [22] AHXAMK-W 12/20 (24) kV 20 kV power cable. [WWW]  
[http://www.draka.ee/public/product/AHXAMK-W%2012-20%20\(24\)kV.pdf](http://www.draka.ee/public/product/AHXAMK-W%2012-20%20(24)kV.pdf) (16.05.2016)
- [23] Võrgu juhtimise programm Distribution Management System DMS
- [24] A. Tarkmees. (2015) P378 Nõuded plastisolatsiooniga 6-20 kV nimipingega keskpinge kaablite jätku- ja otsamuhvidele ja nende kasutamisele, Elektrilevi OÜ protseduur
- [25] I. Sild. (2016) J374 Kaabli- ja muhvipaigaldaja kvalifikatsiooni tagamise juhend, Elektrilevi OÜ juhend
- [26] B. Oyegoke, P. Hyvonen, M. Aro, N. Gao. (2003). Selectivity of Damped ac (DAC) and VLF Voltages in After-laying Tests of Extruded MV Cable Systems. – *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 10 (5), 874-882
- [27] P. H. F. Morshuis, J.J Smit. (2004). Partial Discharges at dc Voltage: Their mechanism, Detection and Analysis. - *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 12 (2), 328-340
- [28] Introducing Pry-Cam technology [WWW]  
[http://it.prysmiangroup.com/it/business\\_markets/markets/accessories-services/downloads/datasheets/3-Pry-Cam-brochure.pdf](http://it.prysmiangroup.com/it/business_markets/markets/accessories-services/downloads/datasheets/3-Pry-Cam-brochure.pdf) (24.05.2016)