



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

## OSALAHENDUSTE MÕÕTMISEKS KASUTATAVAD SEADMED JA NENDE MÕÕTETULEMUSTE VÕRDLU

PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENT EQUIPMENT AND COMPARISON OF  
TEST RESULTS

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Erik Reisenbuk

Üliõpilaskood: 164723

Juhendaja: Ivar Kiitam, doktorant-nooremteadur;  
Paul Taklaja, vanemlektor.

Tallinn, 2019

## AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

“.....” ..... 201.....

Autor: .....

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 201.....

Juhendaja: .....

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ nimi ja allkiri /

# LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

*Autor:* Erik Reisenbuk

*Lõputöö liik:* Bakalaureusetöö

*Töö pealkiri:* Osalahenduste mõõtmiseks kasutatavad seadmed ja nende mõõtetulemuste võrdlus

*Kuupäev:* 24.05.2019

57 lk

*Ülikool:* Tallinna Tehnikaülikool

*Teaduskond:* Inseneriteaduskond

*Instituut:* Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

*Töö juhendajad:* doktorant-nooremteadur Ivar Kiitam; vanemlektor Paul Taklaja

*Töö konsultant:* vanemlektor Ülo Treufeldt

*Sisu kirjeldus:*

Töös käsitletakse kolme erinevat Tallinna Tehnikaülikooli kõrgepinge laboris kasutatavat mõõteseadet millega saab määrata osalahenduste hulka kõrgepinge seadmetes ja tarindites. Mõõteseadmed erinevad ehituse, mõõtmise meetodika ja vanuse poolest. Töö eesmärgiks on välja selgitada ja hinnata vastavate seadmete mõõtetulemuste võimalikke erinevusi sama katseobjekti katsetamisel.

Töö esimene osa annab ülevaate osalahenduste tekkimise teooriast, põhimõtetest ja osalahendusi soodustavatest nähtustest. Töö teine osa tutvustab osalahenduste mõõtmiseks kasutatavaid meetodikaid ja nende iseärasusi. Töö kolmandas osas uuritakse ja kirjeldatakse kolme erinevat Tallinna Tehnikaülikooli kõrgepinge laboris kasutusel olevat osalahenduste mõõtmise seadet ning lisaks ka katseobjekti. Töö viimases, neljandas osas võrreldakse ja analüüsitakse kolme kasutatud seadmega teostatud mõõtmiste tulemusi ja võimalikke erinevusi.

Töös käsitletakse kahte sumbuva vahelduvpinge meetodil põhinevat seadet: Onsite High Voltage DAC MV 40 ja Tettex Instruments OWTS ning ühte võrgusagedusliku pinge meetodil põhinevat seadet, Power Diagnostix ICM system.

*Märksõnad:* Osalahendus, mõõtmine, DAC, OWTS, ICM

## ABSTRACT

<i>Author:</i> Erik Reisenbuk	<i>Type of the work:</i> Bachelor Thesis
<i>Title:</i> Partial Discharge Measuring Equipment and Test Results	
<i>Date:</i> 24.05.2019	<i>57 pages</i>
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Early Stage Researcher Ivar Kiitam; Senior Lecturer Paul Taklaja	
<i>Consultant(s):</i> Senior Lecturer Ülo Treufeldt	
<p><i>Abstract:</i></p> <p>This thesis describes three different measuring devices used in high voltage laboratory of Tallinn University of Technology to measure partial discharge in high voltage equipment and structures. Partial discharge measuring described in this thesis differ from each other by structure, measuring methodology and age. The purpose of this thesis was to identify and evaluate possible differences in the test results of the respective devices while testing the same test object.</p> <p>The first part of the thesis gives an overview of the theory and principles of partial discharge phenomena. The second part introduces the different methodologies to measure partial discharge and their features. In the third part of the thesis, three different partial discharge measuring devices and test object, used in Tallinn University of Technology high voltage laboratory, are described and studied. In the last, fourth part of the thesis the test results and possible differences between the test results of the three devices used, are compared and analyzed</p> <p>Two devices based on damped alternating current: Onsite High Voltage DAC MV 40 and Tettex Instruments OWTS and one device based on network frequency method, Power Diagnostix ICM system are used and described in this thesis</p>	
<i>Keywords:</i> Partial Discharge, Measurements, DAC, OWTS, ICM	

# LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	<b>Osalahenduste mõõtmiseks kasutatavad seadmed ja nende katseandmete võrdlus</b>
Lõputöö teema inglise keeles:	<b>Partial Discharge Measurement Equipment and Comparison of Test Results</b>
Üliõpilane:	<b>Erik Reisenbuk, 164723</b>
Eriala:	<b>elektroenergeetika</b>
Lõputöö liik:	<b>bakalaureusetöö</b>
Lõputöö juhendaja:	<b>Ivar Kiitam, Paul Taklaja</b>
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	<b>Üks aasta</b>
Lõputöö esitamise tähtaeg:	<b>24.05.2019 kell 15:00</b>

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Õppekava juht (allkiri)

## 1. Teema põhjendus

Töö eesmärgiks on võrrelda kolme erinevat mõõteseadet millega saab määrata osalahenduste hulka kõrgepinge seadmetes. Tallinna Tehnikaülikooli inseneriteaduskonna kõrgepingelabori mõõteseadmed erinevad ehituse, mõõtmise meetoodika ja vanuse poolest. Töö eesmärgiks on välja selgitada ja hinnata vastavate seadmete mõõtetulemuste võimalikke erinevusi sama katseobjekti testimisel. Töös antakse ülevaade osalahenduste mõõtmiseks kasutatavate seadmete ehitusest ja mõõtmiste meetoodikast.

## 2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on võrrelda kõrgepingelaboris osalahenduste mõõtmiseks kasutatavate seadmete mõõtetulemusi ja mõõtmiste meetoodikat.

## 3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Osalahendused ja nende mõõtmise meetoodika
- Seadmete ehitus ja tööpõhimõtted
- Mõõtetulemuste võrdlus ja analüüs

#### **4. Lähteandmed**

- Eelnevalt üliõpilaste poolt teostatud mõõtmised
- Töö käigus teostatud täiendavad mõõtmised
- Seadmete skeemid ja juhendid
- Eelnevalt teostatud uurimused
- Osalahenduste teooria

#### **5. Uurimismeetodid**

Peamiseks uurimismeetodiks on katsete teostamine ehk osalahenduste mõõtmine erinevate seadmetega ja tulemuste analüüs. Tulemuste analüüs toimub katsete käigus saadud väljundgraafikute ja arvutusvalemite tulemuste põhjal.

#### **6. Graafiline osa**

Olulisemad joonised töös on seadmete skeemid ja katsetulemuste väljundgraafikud. Töö graafiline osa on peamiselt töö põhiosas.

#### **7. Töö struktuur**

##### **1. Osalahendused**

- 1.1 Osalahenduste tekkimise teooria
- 1.2 Osalahendusi soodustavad nähtused isolatsioonis
  - 1.2.1 Dendriidid
  - 1.2.2 Vesipuud

##### **2. Osalahenduste mõõtmine**

- 2.1 Osalahenduste mõõtmise meetodid
  - 2.1.1 Võrgusagedusliku vahelduvpingelise mõõtmise meetod
  - 2.1.2 Sumbuva vahelduvpingelise mõõtmise meetod

##### **3 Osalahenduste mõõtmiseks kasutatavad seadmed**

- 3.1 Võrgusagedusliku vahelduvpingelise mõõtmise seade
- 3.2 Sumbuva vahelduvpingelise mõõtmise seadmed

##### **4. Katsetulemused ja nende analüüs**

- 4.1 Võrgusagedusliku vahelduvpingega mõõtmise katsetulemused
- 4.2 Sumbuva vahelduvpingega mõõtmise katsetulemused
- 4.3 Katsetulemuste võrdlus ja analüüs

## 8. Kasutatud kirjanduse allikad

Töö käigus kasutakse asjakohaseid raamatuid, teadusartikleid ja üliõpilaste poolt koostatud aruandeid. Viited töö peamistele kirjanduse allikatele:

Ü. Treufeldt, „Kõrgepingetehnika loengukonspekt aines AEK 3011 3. osa,“ Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2018.

A. Avingu, *Laboratoorne töö kõrgepingetehnikas nr. 5 "Osalahenduste ja kaonurga tangensi mõõtmine"*, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli inseneriteaduskond, 2018.

International Electrotechnical Commission, *EVS-EN 60270:2002: High-voltage test techniques - Partial discharge measurements*, 2001.

## 9. Lõputöö konsultandid

Ülo Treufeldt – osalahenduste teooria.

## 10. Töö etapid ja ajakava

<b>Töö etapid</b>	<b>Tähtaeg / ajakava</b>
kirjanduse läbitöötamine	11. märts – 17. märts
lähteandmete kogumine	17. märts – 24. märts
teoreetilise osa kirjutamine	24. märts – 7. aprill
mõõtmiste teostamine	7. aprill – 14. aprill
uuringu tulemuste kirjeldamine	14. aprill – 21. aprill
järelduste kirjutamine	21. aprill – 28. aprill
kokkuvõtte koostamine	28. aprill – 3. mai
töö esimene versioon valmis	3. mai
juhendajale läbilugemiseks saatmine	3. mai
paranduste siseseviimine	3. mai – 10. mai
juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine	10. mai
töö lõplik versioon valmis	24. mai kell 15:00

# SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE.....	3
ABSTRACT .....	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE .....	5
EESSÕNA.....	10
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU .....	11
SISSEJUHATUS .....	13
1. OSALAHENDUSED.....	14
1.1 Ülevaade .....	14
1.2 Sisemised osalahendused .....	15
1.3 Pindlahendused .....	15
1.4 Koroonalahendused .....	16
1.5 Osalahenduste tekkimise teooria .....	16
1.6 Dendriidid .....	19
1.7 Vesipuud .....	20
1.7.1 Põõsakujulised vesipuud .....	20
1.7.2 Rosettpuud .....	21
1.8 Elektriseadmete siseisolatsioon.....	21
2. OSALAHENDUSTE MÕÕTMINE.....	23
2.1 Osalahenduste mõõtmise meetodid .....	24
2.1.1 Võrgusagedusliku vahelduvpingelise mõõtmise meetod .....	25
2.1.2 Sumbuva vahelduvpingelise mõõtmise meetod .....	25
2.2 Taustamüra .....	27
2.3 Kalibreerimine.....	28
3. OSALAHENDUSTE MÕÕTMISEKS KASUTATAVAD SEADMED JA KATSEOBJEKT.....	29
3.1 Katseobjekt .....	29
3.2 Onsite HV DAC MV40.....	30
3.3 Tettex Instruments OWTS.....	33
3.4 Power Diagnostix ICM system.....	34



4. MÕÕTETULEMUSED JA NENDE ANALÜÜS .....	37
4.1 Onsite HV DAC MV40 mõõtetulemused .....	37
4.2 Tettex Instruments OWTS mõõtetulemused .....	42
4.3 Power diagnostix ICM system mõõtetulemused .....	45
4.4 Mõõtetulemusi võrdlev analüüs .....	49
KOKKUVÕTE .....	52
SUMMARY .....	53
KASUTATUD KIRJANDUS.....	55

## EESSÕNA

Käesoleva bakalaureusetöö teema on välja pakutud Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi doktorant-nooremteaduri Ivar Kiitami ja vanemlektori Paul Taklaja poolt. Lõputöö jaoks info kogumisel olid abiks juhendaja Ivar Kiitam ja Paul Taklaja ning konsultant Ülo Treufeldt. Soovin tänada kõiki eelpool nimetatuid suurepärase koostöö eest käesoleva töö koostamisel ning pühendan Pauli ja Ivari „standardi“ kohaselt kõigile kes töö valmimisele kaasa aitasid alljärgneva luuletuse:

*Vapralt kõnnin eluteel,  
mis ülesmäge lookleb.*

*Kindlasti ka mõni kuristik on ees  
ja mitmed katsumused ootel.*

*Mäe tipus aga paistab kõik nii ilus,  
kuigi ilmselt on seal üsna vilu.*

*Tee hargneb kordi-mitu  
ning valikuid ma teen,  
ja vahest ikka mõttes vilgub:  
kas olen õigel teel ma veel ?*

*Siiski kindel on mu meel,  
kui astun käänulisel eluteel,  
mis ülesmäge lookleb.*

*Ise parimat ma lootes.*

*Mäe tippu aga veel ei paista,  
kuid ka jalam tundub kauge.*

*Targemate nõu ei saa ma laita,  
et mu hoog ei raueks.*

*Kuid äkki tipp jääb liiga kaugeks,  
jääks ehk pidama kus laugem ?*

*Ikka edasi ma astun,  
kuniks jätkub mul veel jaksu.*

*Mööda konarlikku eluteed,  
mis ülesmäge lookleb.*

*Tipp mind järjepanu ahvatleb,  
kuigi tuul seal tormleb.*

*Arvan olen eksinud  
ja iga samm mult rohkem nõuab,  
kuniks kaugelt paistab tipp,  
mis pilvedest on kerkinud.  
Ei tea kas jõuan ?*

Erik Reisenbuk

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Tallinna Tehnikaülikool

## LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

AC	vahelduvvool ( <i>Alternating Current</i> )
C	mahtuvus
$C_1$	kondensaator
$C_a$	isolatsiooni mahtuvus
$C_b$	tühimiku ja elektroodi vahele jääva isolatsioonimaterjali mahtuvus
$C_k$	testitava kaabli mahtuvus
$C_L$	lisakondensaator
$C_t$	tühimiku mahtuvus
D	diod
DAC	sumbuva vahelduvvool ( <i>Damped Alternating Current</i> ).
DC	alalisvool ( <i>Direct Current</i> )
DP	digitaalsed puhvrid
$E_d$	tahkele dielektrikule rakenduv elektrivälja tugevus
$E_t$	tühimikule rakenduv elektrivälja tugevus
$f$	sagedus
F	osalahenduste põhjustatud pulsside ehk ainult kõrgeid sagedusi läbilaskev filter
HVDC	Kõrgepingega alalisvool ( <i>High Voltage Direct Current</i> )
$I_0$	osalahenduse impulss
$I_k$	osalahenduste 1 kuni $i$ keskmine vool
$l$	kaabli pikkus
L	induktiivsus
$ll$	tühimikku modelleeriv lahendi
M	mõõtmise, analüüsi ja andmehalduse moodul
$N_{T/2}$	poolperioodis tekkivate osalahenduste arv
O	osalahenduste detektor
$P_k$	osalahenduste 1 kuni $i$ keskmine võimsus
$q_0$	osalahenduse näivlaeng
$q_1 \dots q_i$	osalahenduste 1 kuni $i$ näivlaengud
R	tühimikus tekkiva lahenduskanali takistus
$R_1$	laadimistakisti
$R_s$	trafo sisetakistus
$R_v$	võnkeahela summaarne aktiivtakistus
S	pooljuhtlüliti

$t_0$	osalahenduste 1 kuni $i$ esinemise aeg
$t$	aeg
$T$	trafo
$t_1$	tekitatud laenguimpulssi amplituudväärtuse ajahetk
$t_2$	peegeldunud laenguimpulssi amplituudväärtuse ajahetk
$t_l$	kaabli laadumisaeg (s)
$t_s$	võnkumise sumbumisaeg
$\tan \delta$	kaonurga tangens
$U$	testpinge
$u$	dielektrikule rakendatav vahelduvpinge
$u_1 \dots u_i$	osalahendustele 1 kuni $i$ mõjunud katsepingete hetkväärtused
$U_k$	kaare kustumispinge
$U_{ll}$	tühimiku läbilöögipinge
$\Delta U_t$	pingehüpe
$U_0$	nimifaasipinge
$u_{ck}(t)$	pinge hetkväärtus kaabli mahtuvusel
$U_i$	osalahenduste algpinge ehk süttimispinge
$u_t$	tühimikule rakendunud pinge
$u_{t1}$	tühimikule rakenduv pinge ilma osalahendusteta
$v$	laengu impulsi levimisekiirus kaablis
VLF	väga madal sagedus ( <i>Very Low Frequency</i> )
$\varepsilon_d$	tahkele dielektriku dielektriline läbitavus
$\varepsilon_t$	tühimiku dielektriline läbitavus
$\eta$	osalahenduste kustumistegur

## SISSEJUHATUS

Elektrisüsteemi üheks olulisemaks nõudeks on töökindlus ehk võime tagada tarbijate toide ja samuti koostoime elektrijaamade ja elektrivõrkude vahel. Elektrivõrgu töökindluse parandamiseks tagatakse (ülekandevõrgus) n-1 olukorrad, ehk tagatakse, et mistahes üksiku elektrivõrgu elemendi välja lülitumisel ei katkeks tarbijate toide ja elektrivõrgu normaaltalitus. Samuti teostatakse ka plaanilisi ja mitteplaanilisi remont ja hooldustöid alajaamades ja elektriliinidel. Õhuliinide korral puhastatakse ka liinikoridore, et vältida liinidele kukkuvaid puid ja sellele järgnevat lühist. Keerulisem on aga planeerida hooldust ja vahetust siseisolatsiooniga seadmetele. Selleks on kasutusel mitmed seadmete siseisolatsiooni diagnostikameetodid – õli analüüsimine ning kaonurga tangensi ja osalahenduste mõõtmine, millest viimane on kõige levinum.

Käesolev töö käsitleb osalahendusi, nende mõõtmiste metoodikat, erinevate seadmetega saadud mõõtetulemusi, mõõtetulemuste võrdlust ja mõõtmiste olulisust. Osalahenduste mõõtmist kasutatakse elektriseadmete isolatsiooni parameetrite kontrollimiseks nii uute seadmete puhul, tehasekatsetel kui ka töös olevate seadmete isolatsiooni kontrollimiseks. Osalahenduste regulaarne mõõtmine elektrisüsteemi kõrgepingeseadmetes annab küllaltki täpse ülevaate kõrgepingeseadmete isolatsiooni seisukorrast, aidates ennetada potentsiaalset lühist elektrivõrgus ja sellega kaasnevaid kahjusid ning parandada seeläbi süsteemi töökindlust. Töö autorile teadaolevalt teostatakse osalahenduste mõõtmisi Eesti energiasüsteemis suhteliselt harva ja osalahenduste mõõtmiste teemal on tehtud suhteliselt vähe uurimusi.

Töö esimene osa annab ülevaate osalahenduste tekkimise teooriast, põhimõtetest ja osalahendusi soodustavatest nähtustest. Töö teine osa tutvustab osalahenduste mõõtmiseks kasutatavaid metoodikaid ja nende iseärasusi, kusjuures põhjalikuma vaatluse alla tulevad ainult metoodikad millel põhinevad Tallinna Tehnikaülikooli kõrgepingelaboris kasutatavad seadmed. Töö kolmandas osas uuritakse ja kirjeldatakse kolme erinevat Tallinna Tehnikaülikooli kõrgepinge laboris kasutusel olevat osalahenduste mõõtmise seadet, ning lisaks ka katseobjekti. Seadmed erinevad üksteisest nii ehituse, mõõtmise metoodika kui ka vanuse poolest. Töö viimases, neljandas osas võrreldakse ja analüüsitakse kolme kasutatud seadmega teostatud mõõtmiste tulemusi ja võimalikke erinevusi. Mõõtmised viiakse läbi samal katseobjektil, milleks on 20 kV kaabel HXCMK, mille mõlemasse otsa on paigaldatud otsamuhv. Tulemusi analüüsitakse katsete käigus saadud väljundgraafikute ja asjakohaste arvutusvalemite tulemuste põhjal.

# 1. OSALAHENDUSED

## 1.1 Ülevaade

Osalahendus on dielektriku lokaalne, osaline läbilöök. Osalahendus on elektrilahendus, mis tekib kahe pingestatud elektroodi vahel oleva dielektriku (isolatsiooni) sees ilma, et tekiks täielik sildav elektrilahendus elektroodide vahel. Osalahendused võivad tekkida isolatsiooni ebatäiuslikkusest tingitud dielektrikute gaasitühimikkudes (gaasimullides), vedelate dielektrikute kihistises või tahke dielektriku (isolaatori) pinnal. Osalahendust gaasilises keskkonnas tuntakse levinumalt kui koroonalahendust. Gaasitühimikud tahkes dielektrikus võivad tekkida dielektriku valmistamisel või käidus. [1]

Defektid isolatsioonis võivad tekkida erinevatel põhjustel:

- Seadmete tootmisel, kus isolatsiooni paigaldades võivad jääda isolatsiooni kihtide vahele väga väikeste mõõtmetega tühimikud.
- Seadmete paigaldamisel esinevate mehaaniliste jõudude toimel, kui tehakse vigu (kaablite liigne painutamine, mehaanilised löögid jms) mis võivad kahjustada ja nõrgestada isolatsiooni või suurendada seadmele mõjuvaid elektrilisi jõude.

Enamik isolatsiooni materjale vananevad aja jooksul, mis on tingitud dielektrikut moodustavate keemiliste ühendite lagunemisest, näiteks liiga tugeva elektrivälja, liiga kõrge temperatuuri, niiskuse, keemiliselt agressiivse keskkonna jms tõttu. Need keemilised protsessid muudavad isolatsiooni nõrgemaks ja vähem vastupidavamaks esinevatele pingetele. Samuti võib isolatsioon saada kannatada ka tingitult välistest teguritest elektrivõrgu talitlusel. Maa-aluste kaablite isolatsiooni võivad kahjustada ka nn. kolmandad isikud, näiteks kaevetööl kaabelliinide läheduses või sõidutee puhul kui pikaajaliselt sõidavad kaabelliinide kohal rasked sõidukid. Olulisteks isolatsiooni kahjustavateks teguriteks on liigpinged. Lisaks võivad elektrivõrgus esineda lühised, mis samuti kahjustavad isolatsiooni suurtest lühisvooludest põhjustatud kõrge temperatuuri tõttu. [1] Osalahendused tekivad üldjuhul pingetel üle 3 kV, kuid teatud tingimustel võivad osalahendused esineda ka väiksemate pingete korral. Osalahendused on elektriseadmete isolatsiooni järk-järgulise vananemise põhjustajad ja ühtlasi ka selle tagajärg. Seetõttu loetakse osalahendusi isolatsiooni võimaliku täieliku hävinemise peamiseks põhjustajaks. Seetõttu on paljude kõrgepingeseadmete valmistamise järgsetel tehasekatsetel osalahenduste mõõtmine standardne protseduur. Samuti saab osalahendusi mõõta töös olevatel seadmetel, et hinnata isolatsiooni vananemist ja vältida isolatsiooni ja seadmete hävinemist. [2] Osalahendustena käsitletakse järgnevaid elektrilahendusi: sisemine osalahendus, pind- ehk liuglahendus ja koroonalahendus [3].

## 1.2 Sisemised osalahendused

Sisemised osalahendused tahketes või vedelates dielektrikutes leiavad aset isolatsiooni nõrgema elektrilise tugevusega punktides. Isolatsiooni nõrga elektrilise tugevusega kohad võivad olla isolatsioonis esinevad gaasitühimikud, sisselõiked, praod või isolatsiooni sattunud võõrosad. Tühimikud ja praod, mis on kõige levinumad nõrga elektrilise tugevusega punktid dielektrikus, võivad olla mõne  $\mu\text{m}$  kuni mõne  $\text{mm}$  suurused. [4]. Defektid isolatsioonis võivad olla tekkinud kas dielektriku valmistamisel või käidus. Võrreldes antud peatükis kirjeldatud pind- ja koroonalahendustega on sisemised osalahendused eriti ohtlikud just kaablitele ja kaablimuhvidele [3]. Kuna isolatsiooni nõrga elektrilise tugevusega punktides on elektriväljatugevus suurem hakkavad seal teatud dielektrikule rakenduva pinge korral tekkima osalahendused [4]. Korduvate sisemiste osalahenduste tagajärjel tekivad dielektrikus kohalikud süvendid, mistõttu koonduvad lahendused süvenditesse ja tekivad juhtivad söestunud puukujulised kanalid ning lõhed ehk dendriidid [3]. Juhul kui kaabli isolatsiooni on mingil põhjusel sattunud niiskus võivad tekkida ka vesipuud [5]. Aja jooksul dendriidid kasvavad kuni dielektriku täieliku läbilöögini. [3]

## 1.3 Pindlahendused

Osalahendusi tahke või vedela dielektriku pinnal, mis asetseb gaasilises keskkonnas või vaakumis, nimetatakse pindlahendusteks. Pindlahendusi põhjustab tugev ja suure tangentsiaalkomponendiga, ebaühtlane elektriväli. Pindlahendused võivad tekkida trafode läbiviikisolaatoritel, õhuliini isolaatoritel ja kaabli muhvidel [4]. Elektrivõrgu talitlusel, väliskeskkonna toimel võib isoleermaterjali pind saastuda (nt. tolmuosakeste, tahma või soola toimel) ning koosmõjus niiskusega moodustada isoleermaterjali pinnale elektrolüüdikihi, millest tulenevalt dielektriku pinna takistus oluliselt väheneb. Materjali pinnal olevat väikese takistusega elektrolüüdikihti hakkab seejärel läbima lekkevool, mille toimel materjali pind soojeneb. Kuna isoleermaterjal ei ole saastunud ühtlaselt siis isoleermaterjali pind soojeneb ebaühtlaselt ja seega ka aurustub niiskus pinnalt ebaühtlaselt. Selle tagajärjel tekivad materjali pinnale mõne millimeetrise laiusega kuivad alad, mille takistus on võrreldes märgade aladega tunduvalt suurem. Kogu pinge rakendub kitsale kuivanud alale, mille tulemusena toimub kuivanud pinnaosa ülelök. Ülelöögi koht märgub ajaga uuesti ja protsess kordub. Ühe pindlahenduse tulemusel jääb isolatsiooni ülelöögitugevus praktiliselt samaks, kuid lahenduste pikaajalisel toimel isoleermaterjal laguneb ning selle pinnale tekivad juhtivad söestunud rajad, mida nimetatakse roome- ehk lekkeradadeks ja ka trekkideks. Aja jooksul roomerajad kasvavad kuni isolaatori täieliku ülelöögini. [3]

## 1.4 Koroonalahendused

Koroonalahendus on osalahendus gaasilises keskkonnas tugevalt mitteühtlases väljas. Tugevalt mitteühtlases väljas on väljatugevus eriti suur väikese kõverusraadiusega elektroodi lähedal ja kahaneb kiiresti eemaldumisel elektroodist. Seetõttu toimuvad intensiivsed ionisatsiooniprotsessid ainult piiratud ruumiosas väikese kõverusraadiusega elektroodi läheduses ja sildavat lahendust ei toimu. Tugevalt mitteühtlane väli esineb tüüpiliselt õhuliinijuhtmete ümber. Juhtme lähedal arenevad elektronide laviinid ja striimerid ning tekib koroona. Vahelduvpingel koroona süttib ja kustub perioodiliselt igal vahelduvpinge täisperioodi jooksul üks kuni kaks korda. Näiteks, kui koroona esineb ainult negatiivsel poolperioodil, süttib ja kustub see täisperioodi jooksul ainult ühe korra. [6]

## 1.5 Osalahenduste tekkimise teooria

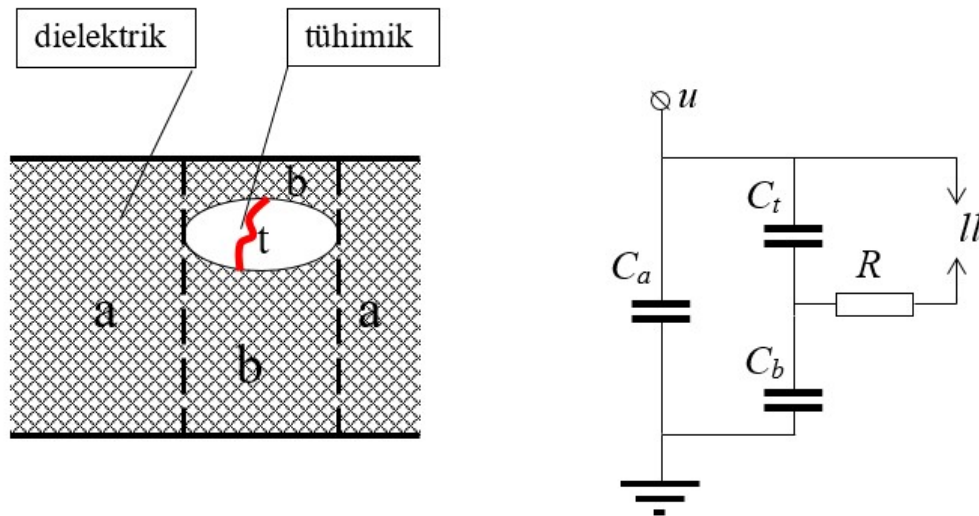
Nagu eelnevalt kirjeldatud tekivad osalahendused tahketes dielektrikutes peamiselt gaasitühimikkudes. Tavaliselt ei ületa gaasitühimiku suurus tahkes dielektrikus 1 mm ja moodustab dielektrikust tühise osa. Osalahendused tekivad esmalt just gaasitühimikkudes, sest tühimiku elektriline tugevus on väiksem tahke dielektriku elektrilisest tugevusest. Elektriline tugevus, ehk läbilöögitugevus on elektriväljatugevus, mis tekitab dielektrikus läbilöögi (väljendatakse tavaliselt kV/mm). Kuna õhu dielektriline läbitavus on oluliselt väiksem kui tahkel dielektrikul, siis elektrivälja tugevus on tühimiku sees oluliselt suurem (nagu järeldub valemist 1.1). [5]

$$\frac{E_t}{E_d} = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_t} \quad (1.1)$$

kus  $E_t$  – tühimikule rakenduv elektrivälja tugevus,  
 $E_d$  – tahkele dielektrikule rakenduv elektrivälja tugevus,  
 $\varepsilon_d$  – tahkele dielektriku dielektriline läbitavus,  
 $\varepsilon_t$  – tühimiku dielektriline läbitavus.

Joonisel 1.1 on toodud gaasimulliga dielektrik ja selle aseskeem [5]





Joonis 1.1 Gaasimulliga dielektrik ja selle askeskeem [5]

Järgnevalt on toodud askeskeemi parameetrite selgitused:

- $u$  – dielektrikule rakendatav vahelduvpinge, V,
- $ll$  – tühimikku modelleeriv lahendi, mille läbilöögipinge  $U_{ll}$  võrdub tühimiku läbilöögipingega,
- $C_a$  – isolatsiooni mahtuvus, F,
- $C_t$  – tühimiku mahtuvus, F,
- $C_b$  – tühimiku ja elektroodi vahele jääva isolatsioonimaterjali mahtuvus, F,
- $R$  – imiteerib tühimikus tekkiva lahenduskanali takistust,  $\Omega$ .

Juhul kui mingil ajahetkel saavutab dielektrikule rakenduv pinge  $u$  väärtuse, mis on võrdne tühimiku läbilöögipingega  $U_{ll}$ , siis toimub esimene tühimiku läbilööök ehk esimene osalahendus tühimikus (aseskeemil lühistub lahendi  $ll$ ). Kuna tühimikus tekkiva lahenduskanali takistus  $R$  on oluliselt väiksem kui tühimiku ja elektroodi vahele jääva isolatsioonimaterjali mahtvuslik reaktiivtakistus  $\frac{1}{\omega C_b}$ , siis tühimikule rakendunud pinge  $u_t$  langeb järsult kuni kaare kustumispingeni  $U_k$ . Pinge  $u_t$  langeb praktiliselt hetkeliselt  $RC_b$  – ahela ajakonstandiga  $10^{-8} \dots 10^{-9}$  s. Edasised osalahenduse protsessid hakkavad toimuma vastavalt osalahenduste kustumisteguri  $\eta$  ja pingehüppe  $\Delta U_t$  väärtustele, mis on toodud valemities 1.2 ja 1.3. [5]

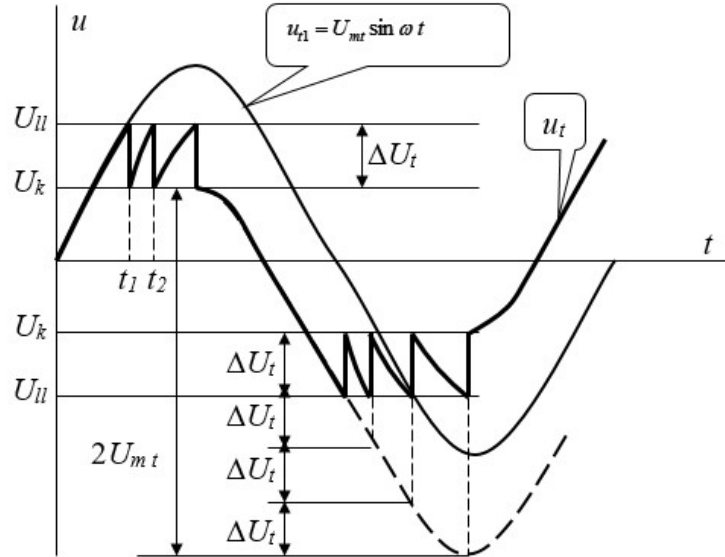
$$\eta = \frac{U_k}{U_{ll}} \quad (1.2)$$

kus  $\eta$  – osalahenduse kustumistegur, katseliselt on leitud, et  $\eta = 0,5 \dots 0,8$ .

$$\Delta U_t = U_{ll} - U_k \quad (1.3)$$

kus  $\Delta U_t$  – pingehüpe.

Joonisel 1.2 on graafiliselt esitatud tühimikule rakenduva pinge muutumine ühe täisperioodi jooksul.



Joonis 1.2 Tühimikule rakenduva pinge muutumine [5] [7]

Joonisel kujutab kõver  $u_{t1}$  tühimikule rakenduvat pinget ilma osalahendusteta ja  $u_t$  koos osalahendustega. Pärast esimese osalahenduse kustumist (hetkel  $t_1$ ) hakkab tühimikule rakenduv pinge  $u_t$  jälle tõusma. Tühimikule rakenduv pinge tõuseb aga võrreldes esimese osalahendusega aeglasemalt, sest ka pingekõver  $u_{t1}$  tõuseb amplituudväärtusele lähenedes aeglasemalt. Teise osalahenduse protsess kulgeb analoogiliselt kuni teise kustumiseni, ning ajahetkel  $t_2$  hakkab pinge uuesti tõusma seekord veel aeglasemini. Niimoodi protsess jätkub, kus tühimikule rakenduv pinge tõuseb aina aeglasemini, kuni pingekõvera amplituudini ehk veerandperioodini. Edasi positiivsel poolperioodil pinge enam ei tõuse ja osalahendusi ei teki. Poolperioodis tekkivate osalahenduste arv arvutatakse valemist 1.4. [5] [7]

$$N_{T/2} = \frac{2U_{mt} - 2U_k}{\Delta U_t} \quad (1.4)$$

Tegelikes konstruktsioonides on tühimike arv ja suurus juhuslik. Seega on ka osalahenduste protsessi iseloomustavad parameetrid juhuslikud suurused ja võivad väliselt sarnastes konstruktsioonides olla täiesti erinevad. Osalahenduste alguspingeks loetakse sel juhul kõige väiksemat tühimiku osalahenduse alguspinget. [5] [7]

Osalahendused kahjustavad isolatsiooni kuni isolatsiooni täieliku läbilöögini. Lahenduskanali kiired elektronid pommitavad dielektriku väikest pinda ja dielektriku väike osa ( $10^{-14} \dots 10^{-15} \text{ cm}^3$ ) kuumeneb kuni mitmesaja kraadini. Selles osas dielektrik laguneb ja tekivad (ka keemiliselt

aktiivsed) kõrvalproduktid. Korduvate osalahenduste tagajärjel tekivad dielektrikus kohalikud süvendid ning edasi koonduvad osalahendused süvendisse ja tekivad „puukujulised“ kanalid ja lõhed. „Puukujulised“ kanalid ja lõhed jagunevad dendriidideks ja vesipuudeks, mis tekivad isolatsiooni pikaajalisel vananemisel. Aja jooksul „puu“ kasvab kuni dielektriku täieliku läbilöögini. Isolatsiooni riknemise kiirus sõltub osalahenduste intensiivsusest ja dielektriku materjalist. [5] [7]

## 1.6 Dendriidid

Dendriidid tekivad isolatsiooni pikaajalisel vananemisel. Pärast osalahenduste tagajärjel tekkinud süvendite tekkimist, koonduvad sinna osalahendused ja tekivad söestunud kanalid ja lõhed ehk dendriidid. Dendriidide teket peetakse isolatsiooni vananemise viimaseks etapiks enne täielikku läbilööki. Dendriidid on XLPE isolatsiooni rikete peamiseks põhjustajaks. Dendriidid XLPE isolatsioonis on kujutatud joonisel 1.3. Dendriidid võivad tekkida ka paberisolatsioonis (joonis 1.4). Kanalid arenevad mööda paberikihi pinda ja siis järgmistele paberikihtidele läbi paberikihtide vaheliste pilude. Joonisel 1.5 on näha dendriidid kõrgepinge kaablimuhvi isolatsioonis. [5]



Joonis 1.3 Dendriidid XLPE isolatsiooniga keskpingekaablis [8]



Joonis 1.4 Dendriidid immutatud paberöliisolatsioonis [5]



Joonis 1.5 Dendriidid 30 kV kõrgepinge kaablimuhvi isolatsioonis [9]

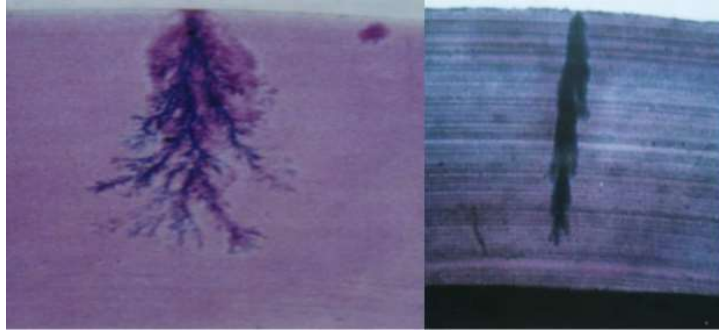
## 1.7 Vesipuud

Vee mõju polüetüleen isolatsioonile avastati 1969 aastal. Tekkivat nähtust hakati nimetama vesipuuks 1971 aastal. Vesipuud tekivad XLPE isolatsioonis vee ja elektrivälja koostoimel pikema aja vältel ja vähendavad isolatsiooni elektrilist tugevust. XLPE isolatsiooniga kaablites on vesipuudest mõjutatud tavaliselt suuremad kaabli lõigud. Vesipuud kasvavad üldiselt põhielektrivälja suunas. Vesipuu on peamiselt isolatsiooni keemilise vananemise tulemus. Vesipuu ei ole elektrijuht, tegelikult on see endiselt isolatsioonimaterjal, ehkki madalama kvaliteediga. Vesipuudest võivad areneda ka dendriidid. [5]

Vesipuud tekivad siis, kui vesi mingil põhjusel on tunginud polümeeri amorfseesse tsooni. Vesipuid isolatsioonis võivad algatada mitmed nähtused. Põhjusteks võib olla kompaundi saastumine või oksüdeerumine tootmise või ladustamise käigus, puudulik või ebaühtlaselt jaotunud antioksidant, saastumine või oksüdeerumine sulatamise käigus ja isolatsiooni pinnavigastused tootmise käigus või hiljem, mis muudavad polümeeriahelate otsad kergesti oksüdeeruvateks. Vesipuud jagunevad rosettpuudeks ja põõsakujulisteks puudeks. [5]

### 1.7.1 Põõsakujulised vesipuud

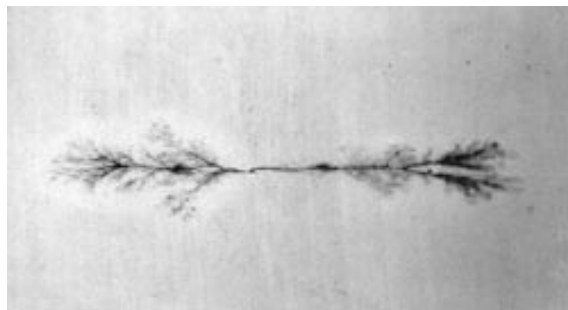
Põõsakujulised vesipuud hakkavad arenema dielektriku servast (joonis 1.6). Põõsakujuliste puude kasvukiirus on 10...1000  $\mu\text{m}$  aastas e kuni 1 mm aastas. Oluliseks kasvukiiruse mõjutajateks on isolatsioonis sisalduvad lisandid. Ohtlik pikkus saavutatakse 10 kuni 15 aastaga, kui põõsasuude pikkus ületab 30% isolatsiooni paksusest. Üle 30% pikkusega põõsad tähendavad kaabli isolatsiooni eluea lõppfaasi. Põõsakujulised puud esinevad tavaliselt massiliselt. Näiteks 4 km pikkusel kaablil võib esineda 1 000 kuni 1 000 000 põõsakujulist vesipuud. [5]



Joonis 1.6 Põõsakujulised vesipuud [5]

### 1.7.2 Rosettpuud

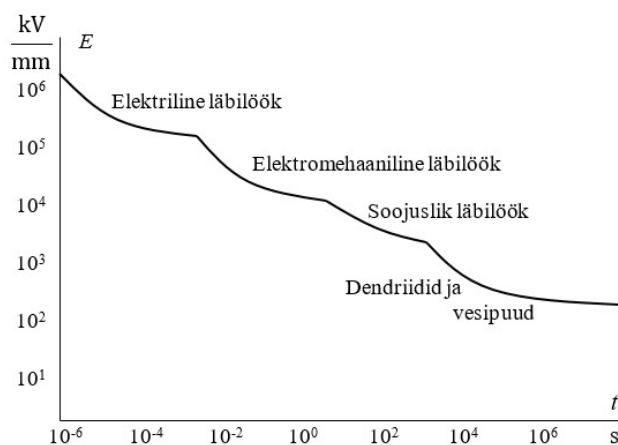
Rosettpuid eristab põõsakujulistest vesipuudest see, et rosettpuud tekivad isolatsiooni sees ja arenevad mõlemas suunas (joonis 1.7). Rosettpuud kasvavad tavaliselt vähe ja nende kasv seiskub. Isolatsiooni läbilöögini viivad tavaliselt põõsakujulised puud. [5]



Joonis 1.7 Rosettpuu [10]

## 1.8 Elektriseadmete siseisolatsioon

Osalahenduste mõõtmist teostatakse just seadmete siseisolatsiooni korrasoleku kontrolliks. Siseisolatsiooniks on seadmete tahke, vedela või gaasilise isolatsiooni sisemised osad, mis on kaitstud atmosfääri ja muude välistingimuste mõju eest. Siseisolatsiooni materjal peab olema suure elektrilise tugevusega, väikeste dielektrikuskadudega, termilise stabiilsusega, mehhaaniliselt tugev ning tule- ja plahvatuskindel. Elektriseadmetes kasutatakse tahkeid isoleermaterjale (polümeerid, epoksiidid, viilk), vedelikke (trafoõli, sünteetilised vedelikud), gaase (elegaas, lämmastik) või kombineeritud isolatsioonisüsteeme. Tahked ja vedelad isoleermaterjalid vananevad aja jooksul. Tahke isolatsiooni vananemisel on 4 iseloomulikku staadiumi (joonis 1.8). [5] [7]



Joonis 1.8 Isolatsiooni vananemise volt-sekund karakteristik [5]

Puhtelektriline läbilöök toimub tahke dielektriku elektrilist tugevust ületava välja toimetel. Elektromehaanilisel läbilöögil lisanduvad elektromehaanilised jõud koosnevad peamiselt kondensaatorefektist põhjustatud elektrostaatilistest jõududest. Mõningate konstruktsioonide puhul võivad lisanduda ka voolust põhjustatud elektrodünaamilised jõud. Mõjuvate jõudude toimetel võib dielektrik deformeeruda, tekkida mikropraod või koguni puruneda. Soojuslik läbilöök tekib, kui dielektrikuskadude poolt põhjustatud soojushulk ületab ümbritsevasse keskkonda hajuvat soojust. Dielektriku pikaajalisel vananemisel väheneb läbilöögipinge materjalile pikaajaliselt toimivate elektriliste, mehhaaniliste, keemiliste ja termiliste mõjude toimetel. Siseisolatsiooni vananemist põhjustavad erinevad nähtused ja korrasoleku kontrolliks soovitatakse erinevaid meetodeid (tabel 1.1). Põhilised elektriseadmete siseisolatsiooni diagnostikameetodid on õli analüüs, kaonurga tangensi  $\tan \delta$ , mõõtmine ja osalahenduste mõõtmine. Nagu näha tabelist 1.1 on osalahenduste mõõtmine peaaegu kõikide elektrivõrgus kasutatavate seadmete põhiliseks ja kohati ka ainsaks siseisolatsiooni diagnostikameetodiks. [5]

Tabel 1.1 Isolatsiooni vananemismehhanismid ja soovitatavad diagnostikameetodid [5]

Seade	Vananemismehhanism	Diagnostikameetod
Trafod	Isolatsiooni niiskumine, osalahendused	Õli analüüs, $\tan \delta$ Osalahenduste mõõtmine
Mõõtetrafod	Paber-õliisolatsiooni vananemine	Õli gaasianalüüs, $\tan \delta$
Elegaasjaotlad	Osalahendused	Osalahenduste mõõtmine
Paber-õlikaablid	Osalahendused	Osalahenduste mõõtmine
Plastkaablid	Dendriidid	Osalahenduste mõõtmine
Läbiviik-isolaatorid	Isolatsiooni niiskumine, osalahendused	Osalahenduste mõõtmine, $\tan \delta$
Kondensaatorid	Osalahendused	Osalahenduste mõõtmine

## 2. OSALAHENDUSTE MÕÕTMINE

Osalahenduste tekkimist ja nende iseloomu isolatsioonis saab kindlaks määrata osalahenduste mõõtmisega. Kasutusel on erinevaid mõõtemetodeid. Osalahendusi saab mõõta elektriliselt, akustiliselt, elektromagnetiliselt, keemiliselt, termograafiliselt või muude kaamerameetoditega või nende meetodite võrdluse ja kombineerimisega. Tänapäeval kasutatakse osalahenduste mõõtmisi elektrivõrgus peamiselt kaabelliinides. Kaabelliinides on osalahenduste tuvastamine ja lokaliseerimine võimaliku isolatsioonirikke varajases staadiumis oluline, et saaks planeerida õigeaegselt remonttöid ja vältida tarbijate planeerimata toitekatkestust elektrivõrgus. Olulisemad parameetrid, mida osalahendusi mõõtes fikseeritakse, on järgmised: [11]

**Osalahenduse impulss  $I_0$**  ehk vooluimpulss, mis tekib osalahenduse mõjul testitavas objektis. [11]

**Osalahenduse näivlaeng  $q_0$**  ehk laengu muutus isolatsiooniga ühendatud elektroodides. Osalahenduste tegelikku laengu suurust ei ole võimalik otseselt mõõta, mistõttu mõõdetakse osalahenduste näivlaengut. Näivlaengut saab mõõta isolatsiooniväliselt ja see on võrdeline osalahenduste võimsuse (valem 2.1) ja energiaga. Näivlaengu põhjal on võimalik hinnata osalahenduste poolt tekitatava kahju suurust isolatsioonile ja seega ka isolatsiooni vananemise staadiumit. Näivlaeng on tegelikust osalahenduste poolt liigutatud laengust palju väiksem. [11]

**Osalahenduste algpinge ehk süttimispinge  $U_i$**  ehk pinge väärtus, mille korral algavad korduvad osalahendused, kui pinge tõuseb kõrgemale tasemest  $U_i$ . Kui osalahenduste süttimispinge on madalam võrgupingest siis on see eriti ohtlik, sest osalahendused tekivad sellisel juhul ka elektrivõrgu normaaltalitusel. [11]

Osalahenduste mõõtmisel fikseeritud suuruste alusel saab arvutada osalahenduste keskmist voolu (valem 2.1) ning keskmist võimsust (valem 2.2). [3]

$$I_k = \frac{1}{t_0} (|q_1| + |q_2| + \dots + |q_i|) \quad (2.1)$$

kus  $I_k$  – osalahenduste 1 kuni  $i$  keskmine vool, A,

$q_1 \dots q_i$  – osalahenduste 1 kuni  $i$  näivlaengud, C,

$t_0$  - osalahenduste 1 kuni  $i$  esinemise aeg, s.

$$P_k = \frac{1}{t_0} (q_1 u_1 + q_2 u_2 + \dots + q_i u_i) \quad (2.2)$$

kus  $P_k$  – osalahenduste 1 kuni  $i$  keskmine võimsus, W,

$u_1 \dots u_i$  – osalahendustele 1 kuni  $i$  mõjunud katsepingete hetkväärtused.

Kaabli isolatsiooni seisundi hindamisel on lisaks osalahendustele olulised ka dielektrikuskaod, mis põhjustavad isolatsiooni soojenemist ning seega soodustavad soojusliku läbilöögi ja sisemiste osalahenduste arenemist. Kadusid isolatsioonis, ehk dielektrikuskadusid iseloomustatakse dielektrilise kaonurga tangensiga  $\tan \delta$ . Mida suurem on isolatsiooni kaonurga tangens, seda suuremad on ka dielektrikuskaod ja kadude arvelt isolatsioonis tekkiv soojushulk. [3]

## 2.1 Osalahenduste mõõtmise meetodid

Osalahendusi saab mõõta eelmises peatükis kirjeldatud meetoditega. Kolm põhilist mõõteviisi, mida tänapäeval keskpinge kaablite osalahenduste mõõtmiseks kasutatakse, on elektriline, akustiline ja elektromagnetlainete tuvastamisel põhinev meetod. Käesolevas töös teostatakse osalahenduste mõõtmist elektrilisel meetodil. [3]

- Elektrilise osalahenduste mõõtmise korral mõõdetakse osalahenduste tekitatud näivlaengu  $q_0$  väärtust.
- Akustiline osalahenduste tuvastamine toimub osalahenduste poolt tekitatud heli- või vibratsioonlainete registreerimisel kaabli või kaablimuhviga ühendatud anduriga.
- Elektromagnetlainete tuvastamise meetod põhineb osalahendustega kaasnevate elektromagnetlainete fikseerimisel.

Elektrilisi mõõtemetodeid rakendatakse tavapäraselt kaablitele, mis on füüsiliselt elektrivõrgust lahti ühendatud. Akustilised ja elektromagnetlainete tuvastamisel töötavad osalahenduste mõõtemetodid on rakendatavad ka töösolevate (pingestatud) kaablite osalahenduste mõõtmiseks. Elektriliste mõõtemetodite abil on võimalik saada osalahenduste ja seega ka kaabli isolatsiooni seisukorra kohta kõige põhjalikumaid ja täpsemaid andmeid [3].

Elektrilisi mõõtemetodeid saab mõõtmisel kasutatava voolutüübi ja sageduse alusel jaotada järgmiselt: [3]

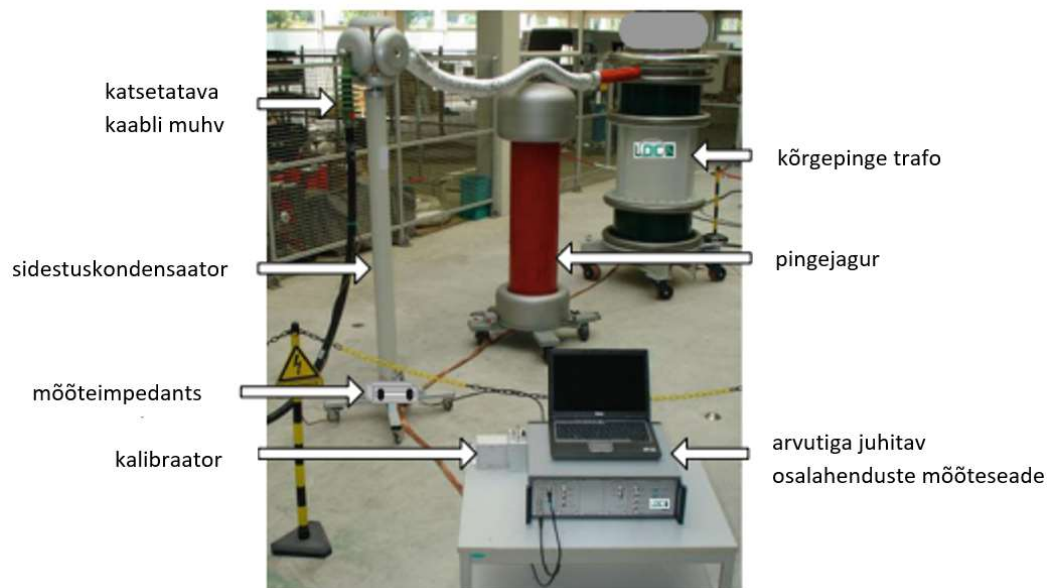
- alalisvooluga osalahenduste mõõtmine (DC),
- võrgusagedusliku vahelduvvooluga mõõtmine (50/60 Hz AC),
- väga madala sagedusega mõõtmine (VLF – *Very Low Frequency*),
- sumbuva vahelduvvooluga mõõtmine (DAC – *Damped Alternating Current*).

Käesolevas töös käsitletakse võrgusagedusliku vahelduvpingega mõõtmise meetodit ja sumbuva vahelduvpingega mõõtmise meetodit.



### 2.1.1 Võrgusagedusliku vahelduvpingelise mõõtmise meetod

Võrgusagedusliku vahelduvpingega osalahenduste mõõtmist teostatakse peamiselt laborites ja elektrivõrgu talitluselt väljas olevatel seadmetel. Võrgusagedusliku vahelduvpingega mõõtmiseks on vaja kõrgepinge toiteallikat – kõrgepingetrafo, mille kasutamine elektrivõrgus talitleva seadme asukohas on keerukas. Mõõtesüsteemi kuuluvad veel madalpingega toiteallika regulaator, mis on ühendatud kõrgepinge toiteallika külge, mahtuvuslik pingejagur, katseobjekt, juhtimis- ja mõõtesüsteem (personaalarvuti) ning osalahenduste detektor. Katseobjekt on igal ajahetkel osa kõrgepinge ahelast ning mõõtmiste käigus katseobjekti pinget ei katkestata. Kõrgepingetrafo muundab madal- või keskpinge kõrgepingeliseks katsepingeks. Katsepinge võimalik maksimaalväärtus sõltub trafo parameetritest. Mõõtmine tulemusel võrgusageduslikul pingel esindab paremini osalahenduste väärtusi, mis tekivad elektrivõrgu talitlusel. Joonisel 2.1 on vahelduvpingelise mõõteseadme konfiguratsioon kaabelliini katsetamisel. [12]



Joonis 2.1 Vahelduvpingelise mõõteseadme konfiguratsioon kaabelliini katsetamisel [12]

### 2.1.2 Sumbuva vahelduvpingelise mõõtmise meetod

Sumbuva vahelduvpinge allikas DAC/OWTS on välja töötatud peamiselt elektrivõrgus talitluses olevate seadmete osalahenduste mõõtmiseks. Osalahenduste mõõtmist sumbuva vahelduvpingega saab teostada madalpinge võrgust saadava toitepingega (Eestis 230V). Sumbuva vahelduvpingega osalahenduste mõõtmiseks on vaja kõrgepingelise alalisvoolu (HVDC) allikat, õhksüdamiku ja väikeste kadudega induktiivpooli, väga väikese sulgumisajaga pooljuhtlülitit ning katseobjekti. Alalisvooluallikaks võib olla näiteks trafo abil tekitatud vahelduvpinge, mis on diodi

ja kondensaatori abil muundatud alalisvooluks. Alalisvooluallikas laeb katsetatava kaabli aeglaselt (mõne sekundi jooksul) ja väikese vooluga soovitud katsepingeni. Laadimise aeg sõltub koormusest, maksimaalsest rakendatavast pingest ja kaabli mahtuvusest. Kui saavutatakse soovitud katsepinge, siis sulgub pooljuhtlüliti ja katseobjekt laetakse induktiivpooli kaudu tühjaks ja toiteallikas eraldub ülejäänud vooluahelast. Selle käigus tekib võnke-vooluring, mis koosneb ahela aktiivtakistusest  $R$  ning induktiivpooli induktiivsusest  $L$  ja kaabli mahtuvusest  $C$ , mille vahel hakkab toimuma pinge ja voolu sumbuva võnkumine. [13]

Võnkumise sumbumist põhjustavad energiakaod võnkeringis ehk ahela võnkuma osa summaarsel aktiivtakistusel eralduv energia ning samuti kaabli isolatsioonis eralduv energia. Ahela võnkuma osa summaarne aktiivtakistus sisaldab endas testitava kaabli, induktiivpooli ja ühendusjuhtmete aktiivtakistusi. Kaabli isolatsioonis eralduv energia on tingitud isolatsiooni lekkevoolu aktiivkomponendist. Enamjaolt on energiakaod võnkeringis võrreldes kaabli mahtuvuse ja induktiivpooli induktiivsuse väärtusega tühised, seega on sumbuva võnkumise sagedus ligikaudu võrdne võnkeringi omavõnkesagedusega (valem 1.7). [3]

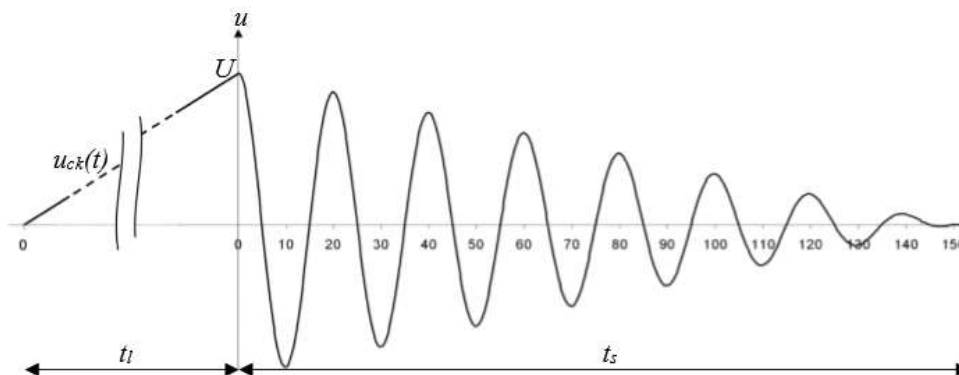
$$f \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_k}} \quad (1.7)$$

kus  $f$  – sumbuva võnkumise sagedus, Hz,

$L$  – induktiivpooli induktiivsus, H,

$C_k$  – testitava kaabli mahtuvus, F.

Juhul kui kaod võnkeahelas on suuremad, sumbub võnkumine kiiremini [13]. Joonisel 2.2 on graafiliselt kujutatud kaabli laadumine ja sellele järgnev sumbuva võnkumine.



Joonis 2.2 Kaabli laadumine ja sellele järgnev sumbuva võnkumine  $U$  – testpinge,  $u_{ck}(t)$  – pinge kaabli mahtuvusel,  $t_l$  – kaabli laadumisaeg (s),  $t_s$  – võnkumise sumbumisaeg (ms),  $u$  – pinge [3]

Sumbuva vahelduvpinge DAC süsteeme on erinevaid ja need erinevad üksteisest sumbuva võnkumise sageduspiirkondade poolest. Enamjaolt on DAC tüüpi süsteemid võimelised osalahendusi mõõtma sageduspiirkonnas 50-850 Hz, kuid mõned seadmed on võimelised mõõtma vaid vahemikus 20-350 Hz. Osalahendusi käsitlev standard IEC 60270 kirjeldab osalahenduste

mõõtmist sagedusel kuni 400 Hz, seega mõõtmisi tuleks teha selles vahemikus ja kõrgemad sagedused ei ole standardkohased. [13]

Lisaks võivad mõõtmised üle 200 Hz moonutada katsetulemusi ja kajastada väiksemat osalahenduste hulka kui 50 Hz juures. See on tingitud osalahendust põhjustava esmase elektroni tekkemehhanismist. Dielektriku tühimikkudes, kus ei ole eelnevalt osalahendusi tekkinud, on osalahenduse tekkimisel viiteaeg pikem, kuna elektronide laviini põhjustav esmane elektron peab tulema gaasitühimiku seest ja tühimiku pinnale on kogunenud vähem laenguid kui nendel („vanadel“) tühimikkudel, kus on juba toimunud eelnevad osalahendused. Kuna osalahenduse tekkimine võtab nendes tühimikkudes kauem aega, siis kõrgema sageduse juures ei pruugigi nendes tühimikes osalahendused tekkida. „Vanade“ tühimikkude pinnal on eelmistest osalahendustest tekitatud jääklaengud ja piisavalt kõrge pinge korral nende osalahenduste viiteaeg kahaneb ning neid mõjutab sagedus vähem. Järelikult võib mõõtmine liiga suure sagedusega anda teatud tingimustel ebatäpsemaid tulemusi. [14] Samas enamjaolt loetakse siiski sumbuva vahelduvpingelise mõõtmise meetodit sagedusvahemikus 20-300 Hz piisavalt efektiivseks ja täpseks osalahenduste mõõtmise meetodiks [15].

Sumbuva vahelduvpingelise mõõtmise meetodi eelisteks on: [13]

- seadme väike võimsuse tarbimine
- mõõtetulemused on ligilähedased võrgusagedusliku pingega mõõtmisele
- võimekus mõõta pingel kuni 400 kV
- mobiilsus.

## 2.2 Taustamüra

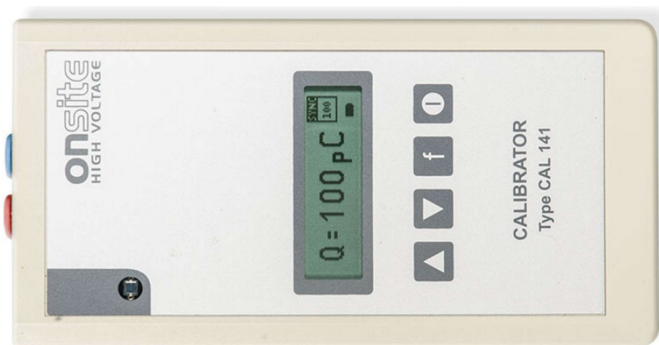
Kuna üheks osalahenduste mõõtmise eesmärgiks on selgitada välja pinge mõju osalahenduste määrale, kasutatakse osalahenduste mõõtmisel erinevaid testpingeid. Lisaks teostatakse mõõtmisi ka pingel 0 kV. Selliste pingeta mõõtmiste eesmärk on kaablisse ja mõõtesüsteemi indutseerunud taustamüra mõõtmine. Taustamüra võivad põhjustada kõik elektroonikaseadmed, pöörlevad masinad, raadiolained, luminofoorlambid, läheduses toimuvad kõrgepingekatsed, mõõteseadme sisemine müra jms. Mõõteseadme registreerib taustamüra, nagu osalahenduse põhjustatud näivlaengut ning seetõttu tuleb kontrollida taustamüra taset. Mõõtmiste käigus ei ole seega enamjaolt võimalik fikseerida osalahendusi, mille näivlaeng on väiksem taustamürast. Taustamüra mõõdetakse enne ja pärast testpingetel mõõtmisi. Kui taustamüra on ebaühtlane ja avaldub suure väärtusega laenguna, mida võib eksikombel tõlgendada kui osalahenduse põhjustatud laengut või kui pärast mõõtmisi erineb taustamüra väärtus oluliselt taustamüra väärtusest enne mõõtmisi, siis

tuleks testpingetel teostatud katseid korrata ja võtta kasutusele meetmed taustamüra vähendamiseks. Taustamüra saab summutada näiteks spetsiaalsete filtrite abil. [3]

## 2.3 Kalibreerimine

Enne mõõtmiste alustamist osalahenduste mõõtmise seadmed kalibreerida. Kalibreerimise eesmärk on määrata kindlaks skaala tegur  $k$ , mõõdetud näivlaengu jaoks. Skaala tegur  $k$  on tegur, millega mõõteseadme näit tuleb korrutada, et saada tegelik sisendväärtus [11]. Kalibreerimise eesmärk antud töös käsitletavate sumbuva vahelduvpingega seadmete DAC ja OWTS puhul on määrata kindlaks kaablis tekkivate osalahenduste näivlaengute väärtustele vastavad kaablis tekkivate voluimpulsside liikumis- ja sumbumiskiirused ning pingepulsid, mis vastavad voluimpulssidele osalahenduste detektori väljundis [16].

Kuna katseobjektide mahtuvus mõjutab elektriahela karakteristikuid, tuleb kalibreerimine teostada iga katseobjekti korral eraldi. Kalibreerida tuleb siis, kui on koostatud täielik mõõteahel, koos mõõtmisteks vajalike seadmetega. Kalibreerimine viiakse läbi, kasutades spetsiaalset kalibreerimisseadet (joonis 2.3), mis tekitab katseobjekti läbivaid voluimpulsse. Et saada täpseid mõõtetulemusi peab kalibreerimist teostama vastavalt igas laengute suurusjärgus, milliseid on oodata mõõtmiste läbiviimisel. Kuna kalibreerimisseadme kondensaator on üldjuhul madalpinge kondensaator, tuleb kalibreerimist teostada pingestamata katseobjektil. Standardkohase kalibreerimisseadme kondensaatori mahtuvus peab olema vähemalt 10 korda väiksem katseobjekti mahtuvusest. Juhul, kui kalibreerimisseade vastab nõuetele, siis selle poolt katseobjekti antud voluimpulss vastab ühekordse osalahenduse laengule. Enne mõõtmiste alustamist tuleb üldjuhul kalibreerimisseade mõõteahelast lahti ühendada. [11]



Joonis 2.3 Onsite HV CAL 141 kalibreerimisseade [17]

### 3. OSALAHENDUSTE MÕÕTMISEKS KASUTATAVAD SEADMED JA KATSEOBJEKT

#### 3.1 Katseobjekt

Antud töö raames testitakse ühesoonelist XLPE isolatsiooniga 12/20 kV vaskaablit HXCMK. See on keerutatud ja tihendatud ümara vasksoonega jõukaabel, mis on ette nähtud kohtkindlaks paigalduseks kraavides ja kaabliredelitel sise- ja välistingimustes. Kaabel vastab IEC 60502-2 standardile. Soone ja isolatsiooni vahel ning isolatsiooni ja välimise metallekraani vahel ehk isolatsiooni all ja peal paiknevad pooljuhtekraanid. Pooljuhtekraaniks on XLPE kompaund, millesse on tahtlikult tekitatud väike juhtivus tahma, grafiidi või süsinikust nanotorukeste lisamisega. Kaabel on varjestatud metallekraaniga, milleks on spiraalselt keerutatud vasktraadid ja vastassuunas keerutatud vaskteip. Väliskest on valmistatud PVC materjalist. Tabelis 3.1 on toodud katsetatava kaabli olulisemad parameetrid ja joonisel 3.1 katsetatava kaabli ehitus. [18]

Tabel 3.1 Olulisemad testitava kaabli parameetrid [18]

Parameeter	Väärtus
Kaabli nimipinge (faasipinge $U_0$ /liinipinge), kV	12/20
Läbimõõt, mm	26
Kaabli mahtuvus kilomeetri kohta, $\mu\text{F}/\text{km}$	0,16
Juhtme takistus, $\Omega/\text{km}$	0,534
Pikkus, m	199,3
Faasi ristlõikepindala, $\text{mm}^2$	35
Ekraani ristlõikepindala, $\text{mm}^2$	16



Joonis 3.1 20 kV kaabel HXCMK [18]

## 3.2 Onsite HV DAC MV40

Onsite HV DAC (joonis 3.2) on mobiilne, sumbuva vahelduvpinge meetodil põhinev kaabelliinide diagnostikaseade, mis on mõeldud peamiselt kasutamiseks alajaamades kohapeal elektriseadmete diagnostika läbiviimiseks. Seadmega saab katsetada keskpinge kaableid ja muid võrgus kasutatavaid elektriseadmeid - ja tarindeid. Seadmega saab teostada kaabelliini diagnostikat – lühiajalise taluvuspinge katsetusi, mõõta ning lokaliseerida kaabelliinis esinevaid osalahendusi ja määrata kaonurga tangensi väärtust. Seade kasutab mõõtmiseks sumbuvat vahelduvpinget sagedusvahemikus 10 kuni 800 Hz. Seade võimaldab katse peatada, kui katse käigus tekib oht isolatsiooni täielikuks läbilöögiks. [19]

Tootja andmetel on seade võimeline tuvastama ja reaalajas kajastama peaaegu kõiki kaabli isolatsioonis tekkivaid osalahendusi. Tuvastamata võivad jääda väikese laenguga osalahendused, suure mürataseme korral. Lisaks on võimalik lokaliseerida ja identifitseerida osalahenduste tekkimise asukohta kaabelliinis (näiteks otsamuhvides) ja seeläbi tuvastada vahetamist vajav kaabelliini osa. [20]

Kaonurga tangensi väärtus  $\tan \delta$  määratakse seadme vahelduvpinge sumbumisteguri abil. Kaonurga tangensi mõõtmine annab usaldusväärset teavet kogu mõõdetava kaabli isolatsiooni parameetrite halvenemisest. Selle tulemusel saab otsustada, kas kaabli isolatsioon on vananenud kriitiliselt või on kaabel võimeline jätkama talitlust elektrivõrgus. Seeläbi aitab kaonurga tangensi mõõtmine välja selgitada elektrivõrgus tehtavate investeeringute otstarbekust. [20]



Joonis 3.2 Keskpinge kaablite diagnostikaseade Onsite HV DAC [20]

Tootja andmetel võimaldab DAC MV tehnoloogia teostada diagnostikat keskpingekaablitele pikkusega kuni 40 km, kuid tegelikkuses määrab katsetatava kaabli pikkuse piirväärtuse katsetatava kaabli mahtuvus (vt. tabel 3.3). Juhul kui diagnostikat tuleb teha elektrivõrgus käidus oleval kaablil, siis on kaabli väljalülitamise kestuseks orienteeruvalt 2-3 tundi. Seadmega on võimalik elektriseadmeid katsetada vastavalt asjakohastele rahvusvahelistele standarditele ja soovitudele (IEEE, IEC, CIGRE). [20]

Enne mõõtmiste alustamist ühendatakse mõõteseadmega testitav kaabel ja vajadusel lisakondensaator, samuti mõõtekomplekti kuuluv sülearvuti. Sülearvuti kaudu saab juhtida mõõteseadme sees asuvat arvutit, mille kaudu toimub omakorda mõõtmisprotsessi juhtimine. Mõõteseadme sees asuva arvuti ettenähtud tarkvarasse sisestatakse kaabli andmed ning seejärel mõõteseadme kalibreeritakse [3]

Tabelis 3.2 on kirjeldatud Onsite HV DAC põhilised komponendid ja nende funktsioonid ja tabelis 3.3 on toodud seadme olulisemad tehnilised parameetrid.

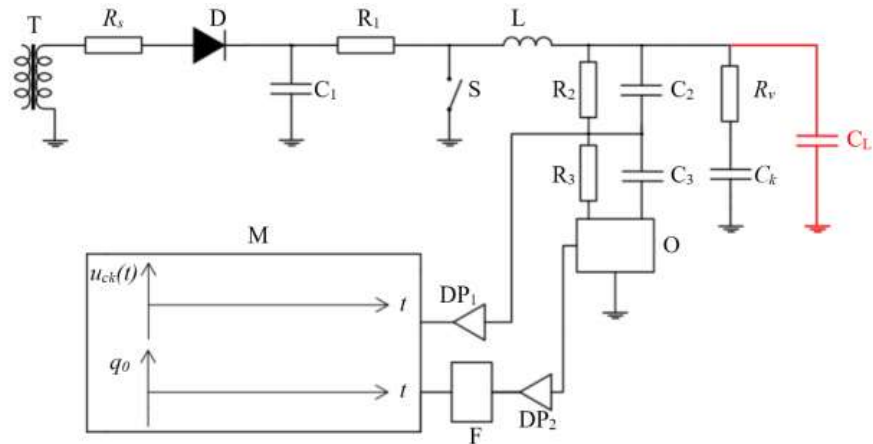
Tabel 3.2 DAC MV 40 diagnostikasüsteemi komponendid [19]

Komponent	Funktsioon
Keskpinge diagnostikaseade DAC	Keskpinge diagnostikaseade DAC koosneb järgnevatest põhilistest alamkomponentidest: kõrgepinge induktiivpool pingejagur pooljuhtlüliti kondensaator osalahenduste detektor esipaneel
Süsteemi kaugjuhtimisseade (personaalarvuti)	Võimaldab juhtida katsetuste käiku, saadud andmeid salvestada ja analüüsida
Kõrgepinge kaugjuhtimisseade	Võimaldab lülitada kõrgepinge allikat sisse ja välja ning teostada hädaseiskamist

Tabel 3.3 Onsite HV DAC MV40 tehnilised parameetrid [19]

Parameeter	Väärtus
Maksimaalne väljundpinge amplituudväärtus, kV	40
Pooli induktiivsus, H	2,2
Katseobjekti mahtuvuse piirväärtus, $\mu$ F	5 maksimaalse pingeväärtuse korral (40 kV), pingeväärtuse korral kuni 30 kV, 10.
Lisakondensaatori mahtuvus, nF	200
Sumbuva vahelduvpinge sagedusvahemik, Hz	20-800

Joonisel 3.3 on kujutatud DAC MV40 tööpõhimõtet iseloomustav skeem



Joonis 3.3 DAC MV40 tööpõhimõtet iseloomustav skeem [3]

Joonise tähistes selgitused:  $T$  – trafo,  $R_s$  – trafo sisetakistus,  $D$  – diod,  $C_1$  – kondensaator,  $R_1$  – laadimistakisti,  $S$  – pooljuhtlülit,  $L$  – õhksüdamikuga induktiivpool,  $R_v$  – võnkeahela summaarne aktiivtakistus,  $C_k$  – testitava kaabli mahtuvus,  $C_L$  – lisakondensaator,  $R_2, R_3, C_2, C_3$  – takistuslik-mahtuvusliku pingejaguri moodustavad aktiivtakistid ja kondensaatorid,  $O$  – osalahenduste detektor,  $DP_1, DP_2$  – digitaalsed puhvrid,  $F$  – osalahenduste põhjustatud pulse ehk ainult kõrgeid sagedusi läbilaskev filter,  $M$  – mõõtmise, analüüsi ja andmehalduse moodul,  $u_{ck}(t)$  – pinge hetkväärtus kaabli mahtuvusel,  $q_0$  – osalahenduse näivlaeng,  $t$  – aeg. [3]

Joonisel 3.4 on mõõteseadme Onsite DAC konfiguratsioon TalTech kõrgepingelaboris mõõtmiste teostamise ajal. Vastavalt mõõtmiste juhendile on kaabli ekraan maandatud mõlemast otsast.



Joonis 3.4. Onsite HV DAC mõõteseadme TalTechi kõrgepingelaboris katsete teostamise ajal



### 3.3 Tettex Instruments OWTS

OWTS (*Oscilating wave test system*) on sarnaselt Onsite DAC seadmega mobiilne, sumbuva vahelduvpinge meetodil põhinev keskpinge kaabelliinide diagnostikaseade. OWTS süsteem koosneb põhiliselt kahest osast – mõõteseadmest ja analüsaatorist. Mõõteseade on silindrikujuline ja koosneb kõrgepinge induktiivpoolist, kõrgepinge jagurist ja kondensaatorist. Lisaks saab vajadusel ka mõõteseadme külge ühendada lisakondensaatori. Mõõteseadmel on 4 ühendusklemmi – kõrgepinge ahela (katseobjekti), osalahenduste detektori signaali juhtme, OWTS toiteallika ja maanduse ühendamiseks. Analüsaator koosneb kõrgepinge toiteallikast, kahest analoog/digitaal konverterist ja juhtseadmest, milleks on kaasaskantav arvuti. Arvutis sisaldub ka vastav tarkvara mõõteandmete analüüsimiseks ja väljastamiseks. Enne mõõtmiste alustamist sisestatakse arvuti ettenähtud tarkvarasse kaabli andmed ning seejärel mõõteseade kalibreeritakse. Lisaks sisalduvad OWTS osalahenduste mõõtmise süsteemis ka analüsaatorit, mõõteseadet ja katseobjekti ühendusjuhtmed. OWTS tööpõhimõtet kirjeldav joonis on sarnane eelmises peatükis joonisel 3.3 esitatud skeemiga. [21]

Seadmega saab mõõta ja lokaliseerida katseobjektis esinevaid osalahendusi ja määrata kaonurga tangensi väärtust. Sarnaselt Onsite DAC seadmele võimaldab OWTS teostada kehtivate standardite kohaseid mõõtmisi. Erinevalt Onsite DAC seadmest asetseb OWTS toiteallikas mõõteseadmest eraldi. Samuti on OWTS seade umbes 15 aastat vanem ja nii-öelda eelmise generatsiooni mudel. Lisaks erineb OWTS seade DAC seadmest tehniliste parameetrite poolest (vt. tabel 3.3 ja tabel 3.4). Tabelis 3.4. on toodud OWTS seadme olulisemad tehnilised parameetrid.

Tabel 3.4 OWTS seadme tehnilised parameetrid [21]

Parameeter	Väärtus
Maksimaalne väljundpinge amplituudväärtus, kV	37
Pooli induktiivsus, H	0,75
Katseobjekti mahtuvuse piirväärtused, $\mu\text{F}$	0,01-2
Lisakondensaatori mahtuvus, nF	700
Sumbuva vahelduvpinge sagedusvahemik, Hz	50-1500

Joonisel 3.5 on mõõteseadme OWTS lülitus Taltech kõrgepingelaboris mõõtmiste teostamise ajal. Vastavalt kehtivatele standarditele on kaabli ekraniseering maandatud mõlemast otsast. Joonisel 3.6 on OWTS analüsaator, mis koosneb arvutist ja toiteallikast.



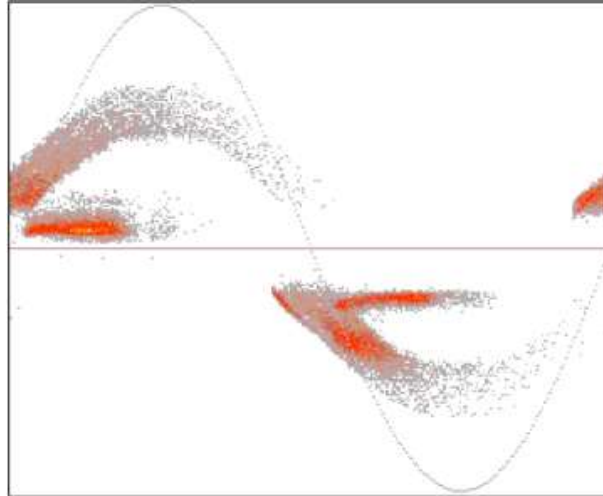
Joonis 3.5 OWTS mõõteseadme Taltech kõrgepingelaboris katsete teostamise ajal



Joonis 3.6 Mõõteseadme OWTS analüsaator

### 3.4 Power Diagnostix ICM system

ICM system on võrgusagedusliku vahelduvpinge meetodil põhinev digitaalne osalahenduste mõõtmise seade, mis on täielikult arvuti teel juhitud. Seadme juhtimine ja mõõtetulemuste kajastamine toimub arvutis sisalduva graafilise kasutajaliidese kaudu. Seade sorteerib tuvastatud osalahenduste impulsid amplituudi ja faasinurga järgi, kus osalahendused tekkisid. Seejärel kajastatakse tulemused 3-mõõtmelise muustrina (joonis 3.6) kus värv, kolmanda mõõtmena, kajastab osalahenduste tekkimise sagedust vastava faasinurga korral. [22]



Joonis 3.7 ICM system osalahenduste väljundgraafik [22]

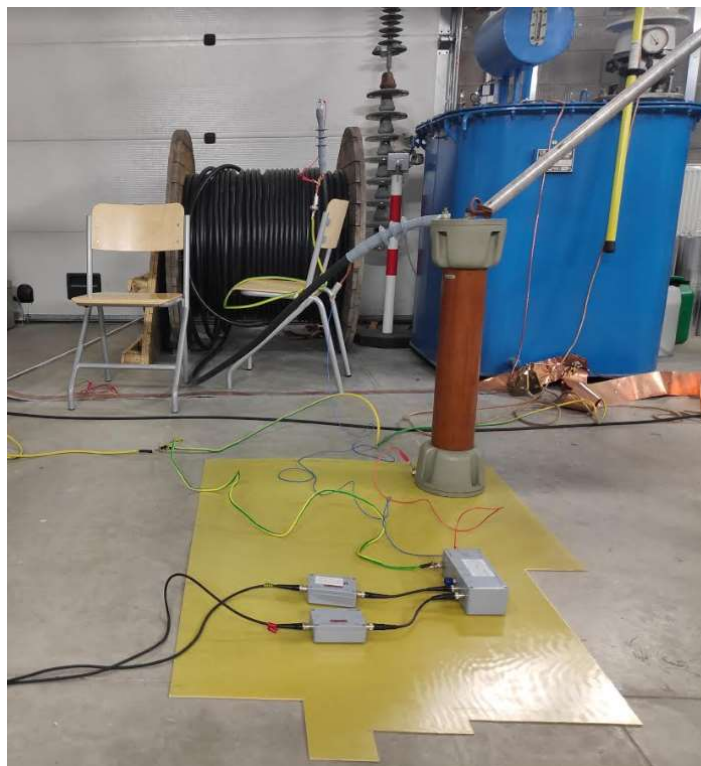
Mõõtmisteks kasutatav elektriskeem koosneb toiteallika madalpingelisest regulaatorist, mis on ühendatud kõrgepingetrafo külge, mahtuvuslikust pingejagurist, katseobjektist, juhtimis ja mõõtesüsteemist (personaalarvutist) ning osalahenduste mõõteseadmest nagu kirjeldatud peatükis 2.1.1. ICM system osalahenduste detektor on moodulipõhise ehitusega. Osalahenduste mõõteseadme koosneb kõikidest vajalikest moodulitest ja elektriahelatest (võimenditest, analoog/digitaal konverteritest, mikrokontrolleritest), et tuvastada osalahenduste mustreid ja teostada vajalikke pinge ja sageduste mõõtmisi. AC2 moodul on seadme toiteallika moodul, mis on varustatud rohelse signaaltulega, mis annab märku, et toiteallikas on sees ja võimeline andma väljundpinget. Toiteallika moodul on võimeline kasutama kõiki laialdaselt kasutusel olevaid võrgupingeid (95-260 V vahelduvpingeid). Lisaks koosneb mõõteseadme veel kontrolleri moodulist, mis sisaldab süsteemi ja juhtimise kontrollereid; põhivõimendist, milles sisaldub mõõtesüsteemi osalahenduste võimendi; arvutiga programmeeritavatest võimendus- ja ribapääsufiltritest ning samuti eelvõimendi toiteallikast. Mõõteseadet saab kasutada, vastavalt vajadusele, erinevate eelvõimenditega, mis erinevad üksteisest võimendatud signaali sagedusvahemiku ja muude parameetrite poolest. Osalahenduste poolt tekitatud signaale võimendatakse eelvõimendi abil enne mõõteseadet, et signaal oleks tugev ja seda ei mõjutaks taustamüra ning et signaali oleks parem edasi töödelda.

Joonisel 3.7 on ICM system osalahenduste detektor, kuhu külge on ühendatud eelvõimendi (pildil vasakul), ja juhtarvuti (pildil paremal). Joonisel 3.8 on ICM mõõteseadme lülitus Taltech kõrgepingelaboris katsete teostamise ajal, kus esiplaanil on näha neliklemm mille külge on ühendatud eelvõimendi ja pinge mõõtur. Neliklemm on ühendatud sidestuskondensaatori külge, mis on ühendatud kõrgepinge trafo külge. Sidestuskondensaatori külge on ühendatud ka

katseobjekt – keskpingeakaabel. Tabelis 3.5 on osalahenduste detektori ICM system olulisemad parameetrid. [22]



Joonis 3.8 ICM system osalahenduste detektor [23]



Joonis 3.9 ICM mõõteseadme lülitus 20 kV kaabli katsetamisel Taltech kõrgepingelaboris

Tabel 3.5 ICM system olulisemad parameetrid

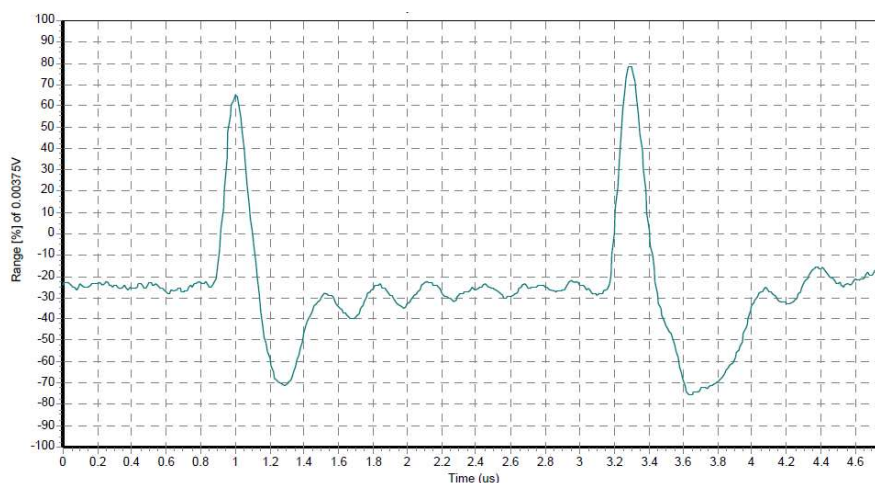
Parameeter	Väärtus
Maksimaalne mõõtepinge amplituudväärtus, kV	36
Sidestuskondensaatori mahtuvus, pF	989
Sagedus, Hz	50
Maksimaalne ribalaius, Hz	40-800
Minimaalne ribalaius, Hz	100-250

## 4. MÕÕTETULEMUSED JA NENDE ANALÜÜS

### 4.1 Onsite HV DAC MV40 mõõtetulemused

Kalibreerimine teostati laengutega 20, 50, 100, 200, 500 ja 1000 pC. Väiksema laenguga kui 20 pC ei olnud võimalik kalibreerida, sest müratase laboris oli selleks liiga kõrge. Katse alguses mõõdetud müratase oli 9 pC, peale kõrgepinge toiteallika sisselülitamist 30 pC. Katse lõpus mõõdetud müratase oli ligilähedane katse alguses mõõdetud müratasemele (29 pC). Mõõtmised teostati pingetel  $0,5U_0$ ,  $0,8U_0$ ,  $U_0$ ,  $1,3U_0$ ,  $1,5U_0$ ,  $1,8U_0$  ja  $2U_0$ , kus  $U_0$  on kaabli nimifaasipinge efektiivväärtus. Iga pingega teostati 3 mõõtmist. Lisaks teostati täiendavaid mõõtmisi osalahenduste süttimispinge  $U_i$  amplituudväärtuse leidmiseks, mis antud mõõtmiste korral oli  $\sqrt{2} \cdot 0,84U_0 = 14,25$  kV. Mõõdeti sagedusega  $f=221,6$  Hz.

Osalahenduste tekkekohtade tuvastamiseks kasutati analüüsitarvara, mis kasutas TDR meetodit ehk reflektomeetriat (*Time-Domain Reflectometry*). Osalahendus kaablis tekitas vooluimpulsi, mis levis kahes suunas: mõõteseadme poole ning mõõteseadmest kaugema kaabli otsa poole. Reflektomeetria kujutab endast osalahenduse tekitatud impulsi ja tema kaabli teisest otsast peegeldunud impulsi registreerimiste vahelise aja alusel osalahenduse asukoha määramist. Joonisel 4.1 on reflektomeetriat illustreeriv joonis seadme Onsite DAC kalibreerimisel.



Joonis 4.1 Onsite HV DAC kalibreerimisel tuvastatud vooluimpulss ja selle peegeldus

Kuna on teada, et kaabli pikkus oli 199,3 m, siis saab joonise 4.1 ja valemi 4.1 järgi arvutada kalibreerimise impulsi levimise kiiruse  $v$  kaablis. Kaabli pikkus  $l$  on valemis 4.1 korrutatud 2-ga sest impulss liigub kaabli otsamuhvist kaabli lõppu ja peegeldub sealt tagasi. Analoogselt valemile 4.1 toimib ka reflektomeetria meetod, mis tuvastab rikkekoha kaabelliinis kaabli pikkuse ning impulsi ja selle peegelduse vahelise aja alusel. [3]

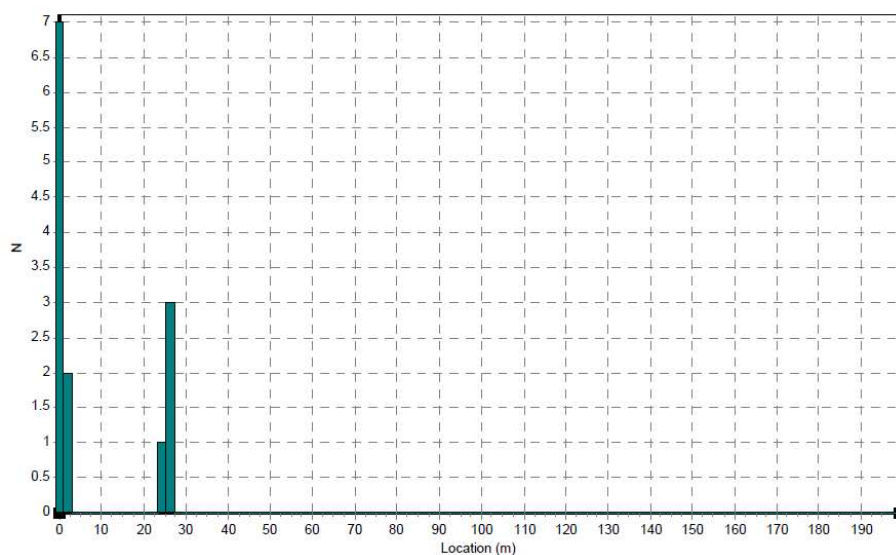
$$v = \frac{2l}{t_2 - t_1} = \frac{2 \cdot 199,3}{3,3 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-6}} = 173 \text{ m}/\mu\text{s} \quad (4.1)$$

kus  $l$  – kaabli pikkus

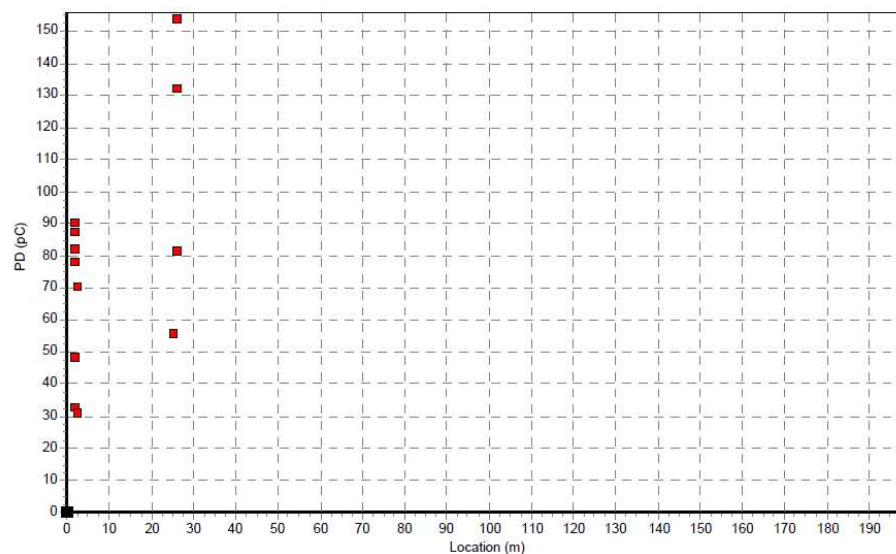
$t_1$  – tekitatud laenguimpulssi amplituudväärtuse ajahetk

$t_2$  – peegeldunud laenguimpulssi amplituudväärtuse ajahetk

Joonisel 4.2 on osalahenduste histogramm pingetel kuni  $U_0=12$  kV, joonisel 4.4 kuni  $1,5U_0=18$  kV ja joonisel 4.6 pingetel kuni  $2U_0=24$  kV. Joonisel 4.3 on osalahenduste tekkekohtade ja näivlaengute suuruse kaardistus (*PD mapping*) pingetel kuni  $U_0$ , joonisel 4.5 kuni  $1,5U_0$  ning joonisel 4.7 pingetel  $U_0$  kuni  $2U_0$ .

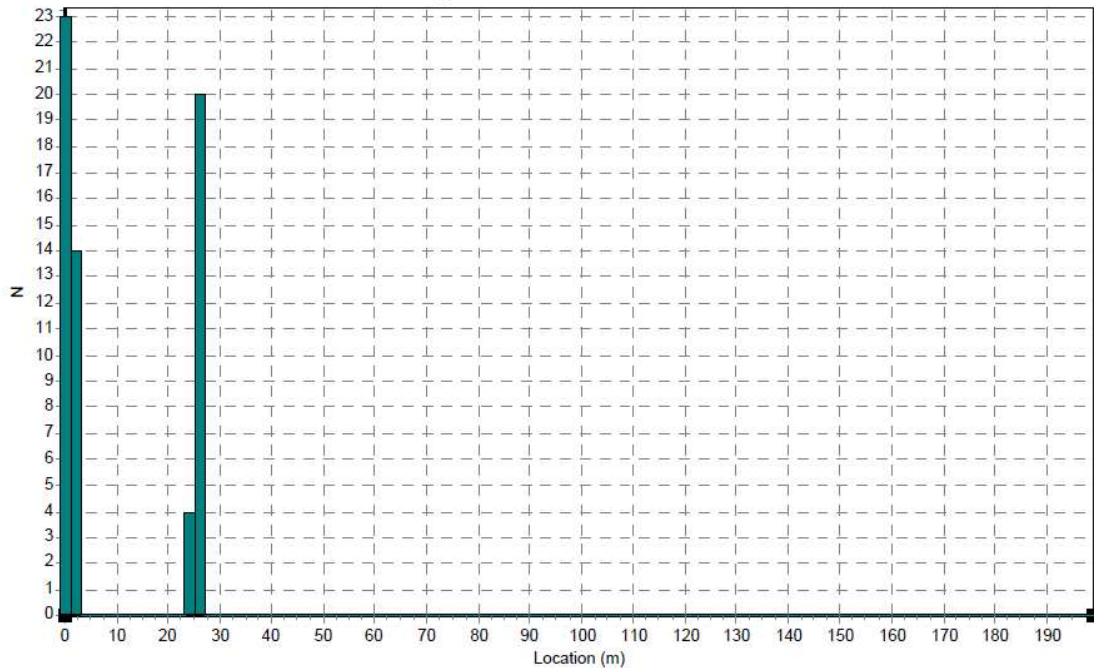


Joonis 4.2 Osalahenduste histogramm pingetel kuni  $U_0$

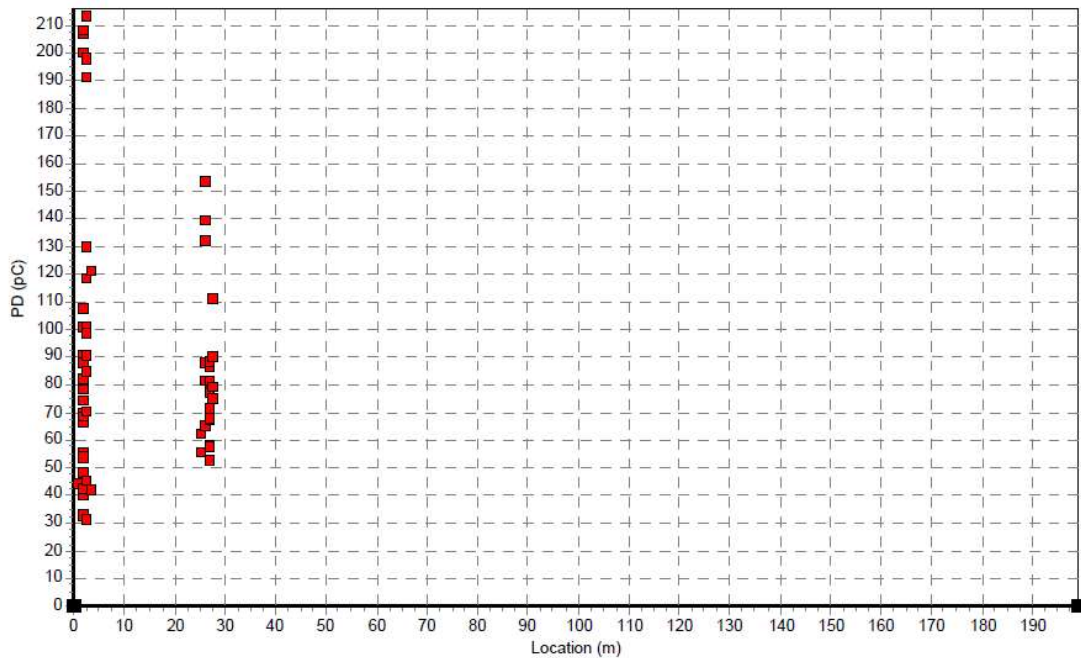


Joonis 4.3 Osalahenduste tekkekohad ja näivlaengud pingetel kuni  $U_0$

Joonistelt 4.2 ja 4.3 on näha, et pingetel kuni  $U_0$  tuvastas mõõteseade 13 osalahenduste impulssi, kahes erinevas kaabli punktis. Esimeses tekkekohas (kaugus kaabli otsamuhvist 2-3 m) esines 9 osalahenduse impulssi maksimaalse näivlaenguga 91 pC ja teises tekkekohas (kaugus kaabli otsamuhvist 26-27 m) 4 osalahendust maksimaalse näivlaenguga 154 pC.

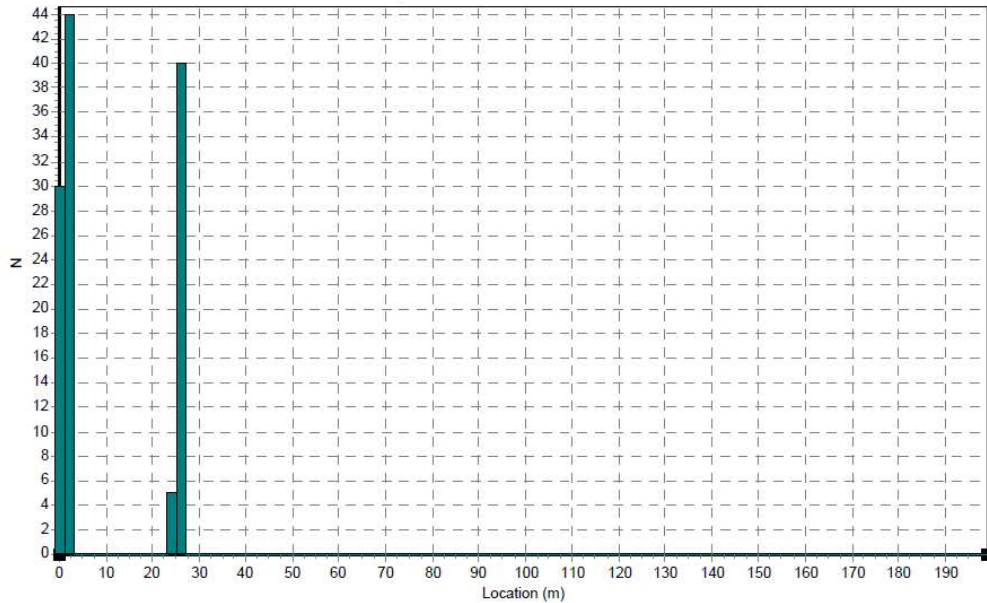


Joonis 4.4 Osalahenduste histogramm pingetel kuni  $1,5U_0$

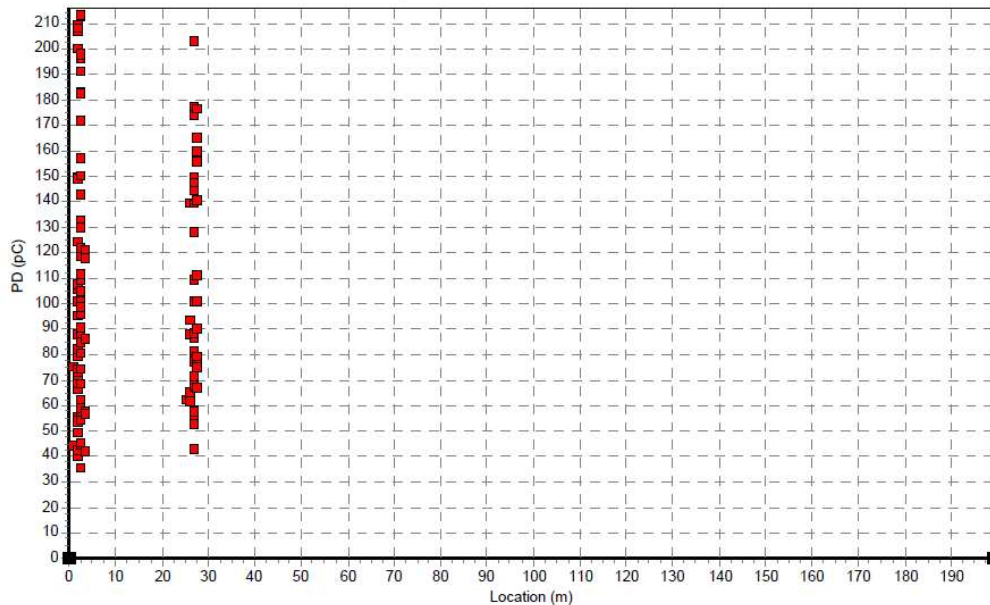


Joonis 4.5 Osalahenduste tekkekohad ja näivlaengud pingetel kuni  $1,5U_0$

Joonistelt 4.4 ja 4.5 on näha, et pingetel kuni  $1,5U_0$  tuvastas mõõteseade 61 osalahenduste impulssi, kahes erinevas kaabli punktis. Esimeses tekkekohas (kaugus kaabli otsamuhvist 2-3 m) esines 37 osalahenduse impulssi maksimaalse näivlaenguga 214 pC ja teises tekkekohas (kaugus kaabli otsamuhvist 26-28 m) 24 osalahendust maksimaalse näivlaenguga 154 pC.



Joonis 4.6 Osalahenduste histogramm pingetel  $U_0$  kuni  $2U_0$

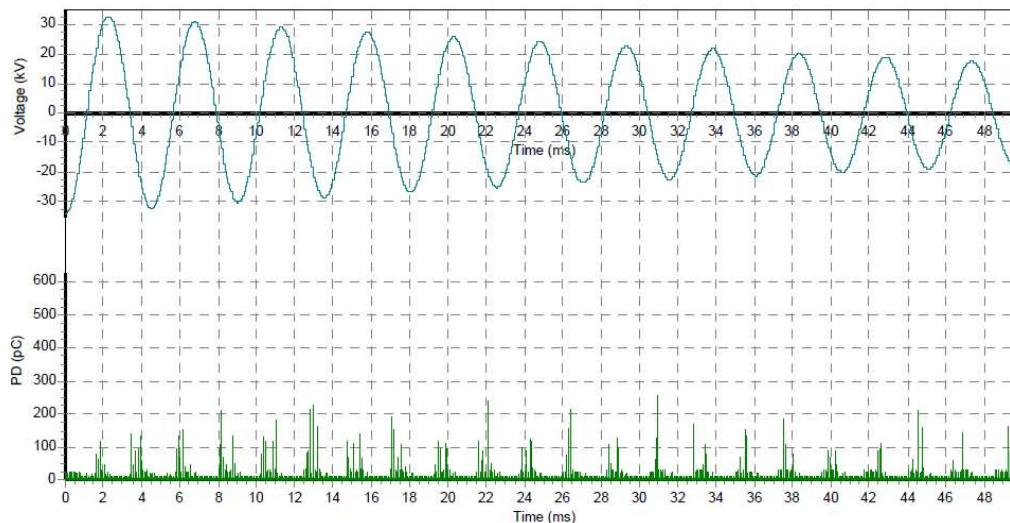


Joonis 4.7 Osalahenduste tekkekohad ja näivlaengud pingetel  $U_0$  kuni  $2U_0$

Joonistelt 4.6 ja 4.7 on näha, et pingetel  $U_0$  kuni  $2U_0$  tuvastas mõõteseade 119 osalahenduste impulssi, kahes erinevas kaabli punktis. Esimeses tekkekohas (kaugus kaabli otsamuhvist 2-3 m) esines 74 osalahenduse impulssi maksimaalse näivlaenguga 214 pC ja teises tekkekohas (kaugus



kaabli otsamuhvist 26-28 m) 45 osalahenduste impulssi maksimaalse näivlaenguga 204 pC. Joonisel 4.7 on mõõtevooluahela pingel võnkumise sumbumine pingel  $2U_0$ . Joonisel 4.8 on näitena DAC testi graafik pingel  $2U_0$ , kus horisontaalteljel on aeg ja horisontaalteljel vastavalt pingele, kV ja laeng, pC. Analoogselt nägi välja ka OWTS testi graafik.



Joonis 4.8 DAC testi graafik pingel  $2U_0$

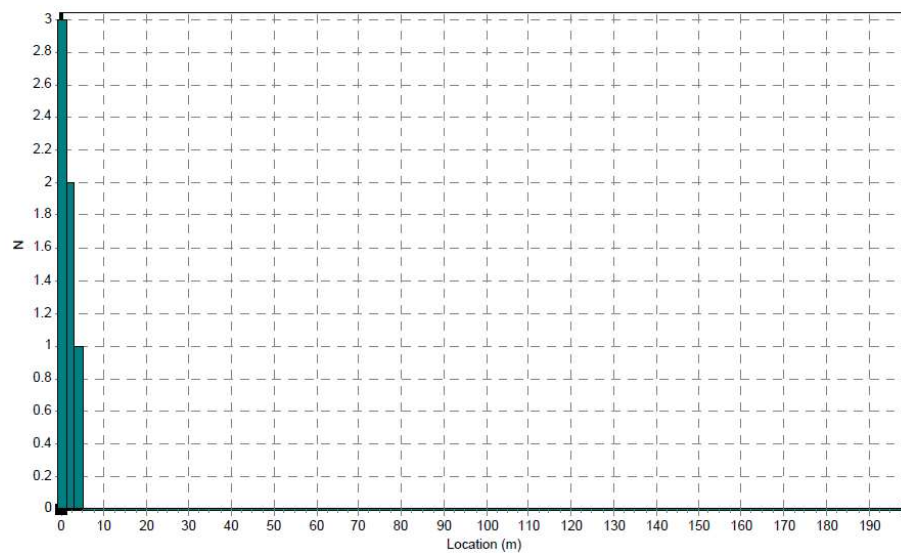
Osalahenduste detektori Onsite HV DAC MV 40 olulisemad mõõdetud ja arvatatud katseobjekti parameetrid on esitatud tabelis 4.1. Keskmine näivlaeng on esitatud pingetel  $U_0$ ,  $1,5U_0$  ja  $2U_0$  kuna mõõtmistel kasutatud analüüsitarvara ei võimaldanud väljastada keskmisi näivlaengute väärtusi pingevahemike kohta. Andmeid analüüsidest oli näha et enamus impulsse tuvastati 2,6 ja 26 m kaugusel kaabli otsamuhvist, kuid esines ka mõningaid kõrvalekaldeid. Tegelikult paiknesid defektid kaablis vastavalt 2,4 ja 27,8 m kaugusel kaabli otsamuhvist. Seega saab väita et diagnostikaseade tuvastas osalahenduste tekkekoha ligikaudu 1 m täpsusega.

Tabel 4.1 HV Onsite DAC MV40 olulisemad mõõtetulemused

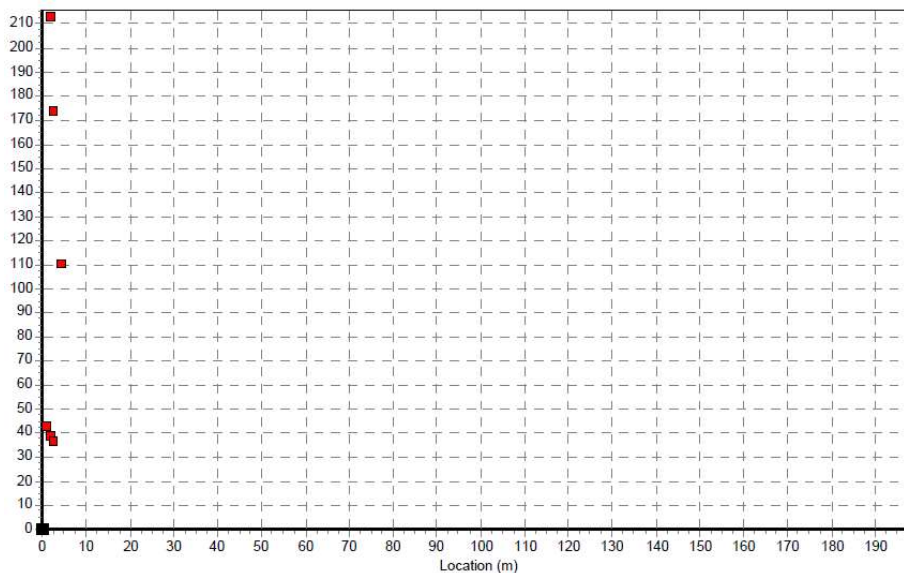
Parameeter	Pinge		
	$U \leq U_0$	$U \leq 1,5U_0$	$U_0 \leq U \leq 2U_0$
Tuvastatud osalahenduste impulsside arv	13	61	119
Maksimaalne osalahenduste näivlaeng $q_{0max}$ , pC	154	214	214
	Pingel $U_0$	Pingel $1,5U_0$	Pingel $2U_0$
Keskmine osalahenduste näivlaeng $q_{0avg}$ , pC	89	198	211
Ligikaudne osalahenduste tekkekoht kaablis, m	2-3 ; 26-28		
Osalahenduste süttimispinge $U_i$ , kV	14,2		
Sagedus, Hz	221,6		

## 4.2 Tettex Instruments OWTS mõõtetulemused

Enne mõõtmiste algust kalibreeriti mõõteseade samade suurustega mis seadme DAC puhul. Osalahenduste tekkekohtade tuvastamiseks kasutati sama analüüsitarkvara, mida on kirjeldatud eelmise peatüki 4.1 alguses. Katse teostamise alguses mõõdetud oli müratase 29 pC. Mõõtmised teostati pingetel  $0,5U_0$ ,  $0,8U_0$ ,  $U_0$ ,  $1,3U_0$ ,  $1,5U_0$ ,  $1,8U_0$  ja  $2U_0$ . Iga pinge korral teostati 3 mõõtmist. Joonisel 4.9 on osalahenduste histogramm pingetel kuni  $U_0=12$  kV, joonisel 4.11 kuni  $1,5U_0=18$  kV ja joonisel 4.13 pingetel kuni  $2U_0=24$  kV. Joonisel 4.10 on osalahenduste tekkekohtade ja näivlaengute suuruse kaardistus (*PD mapping*) pingetel kuni  $U_0$ , joonisel 4.12 kuni  $1,5U_0$  ning joonisel 4.14 pingetel  $U_0$  kuni  $2U_0$ .

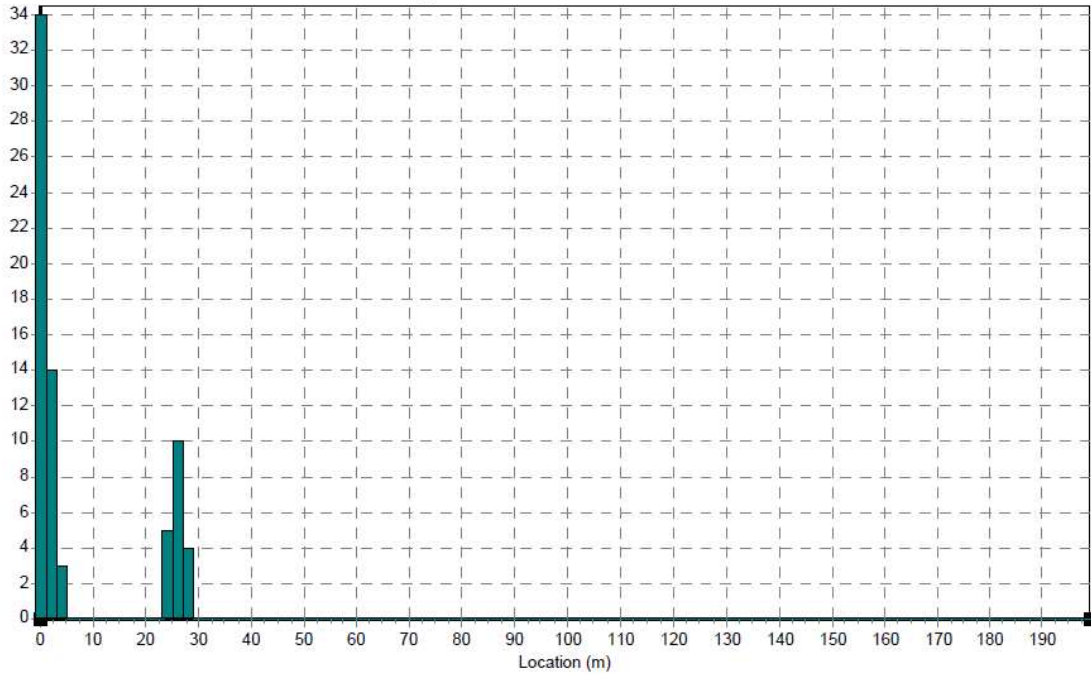


Joonis 4.9 Osalahenduste histogramm pingetel kuni  $U_0$

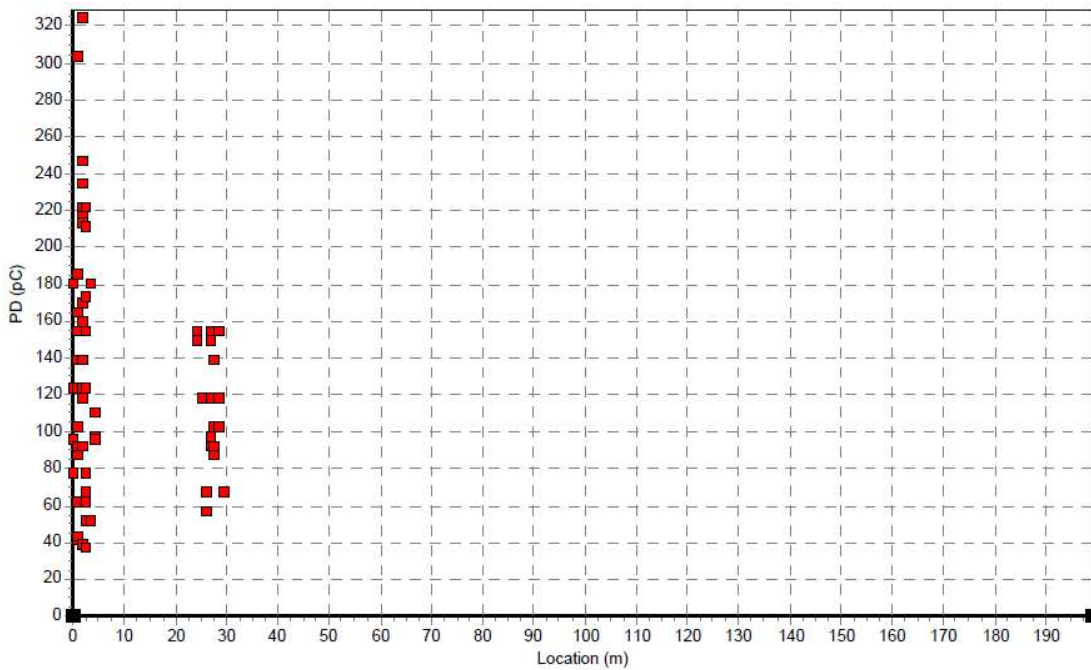


Joonis 4.10 Osalahenduste tekkekohad pingetel kuni  $U_0$

Joonistelt 4.9 ja 4.10 on näha, et pingetel kuni  $U_0$  tuvastas mõõteseade 6 osalahenduse impulssi, ühes kaabli punktis. Tekkekohas (kaugus kaabli otsamuhvist 1-4 m) esines 6 osalahenduse impulssi. Maksimaalse osalahenduse näivlaeng oli 215 pC.



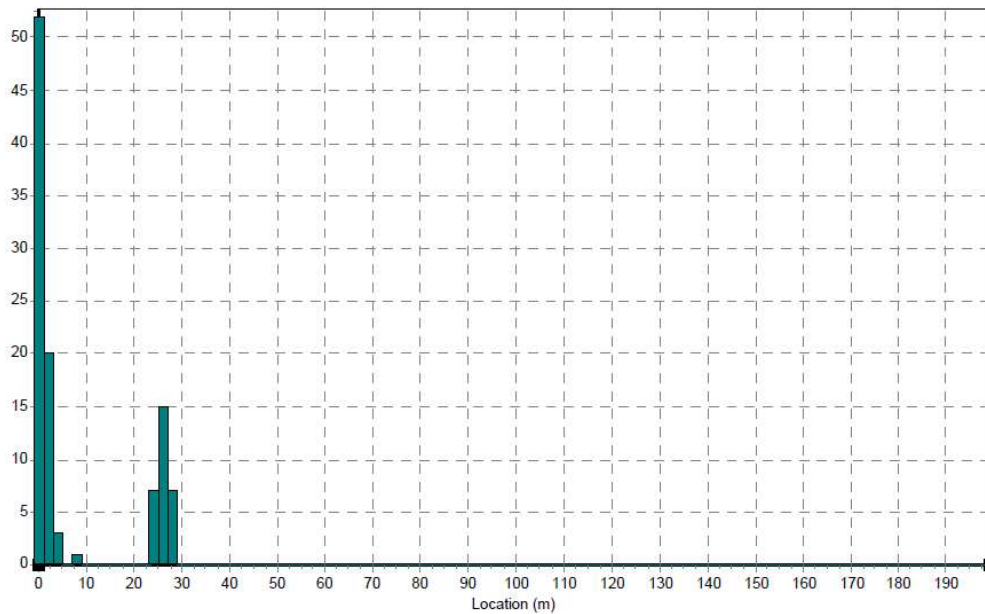
Joonis 4.11 Osalahenduste histogramm pingetel kuni  $1,5U_0$



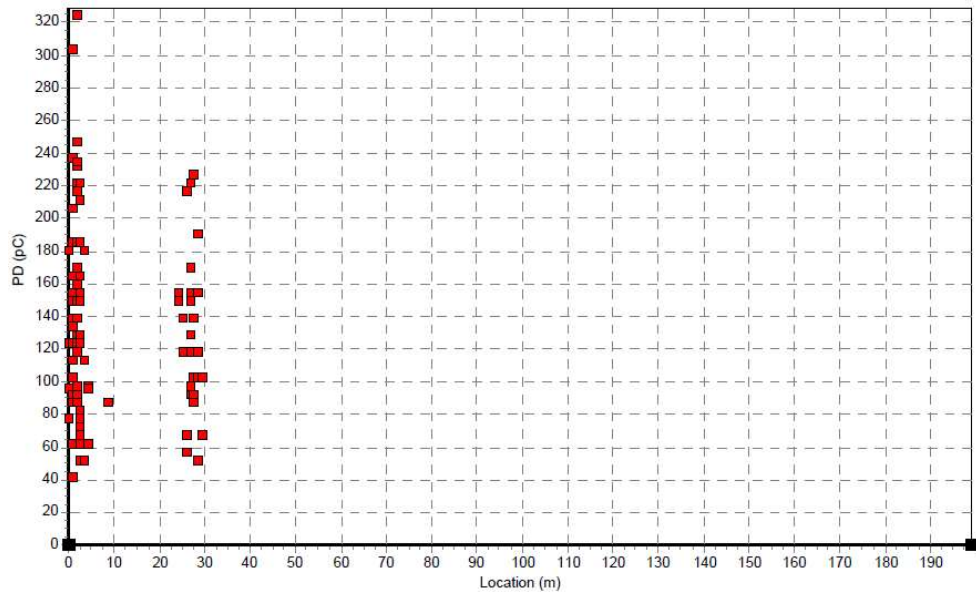
Joonis 4.12 Osalahenduste tekkekohad pingetel kuni  $1,5U_0$

Joonistelt 4.11 ja 4.12 on näha, et pingetel kuni  $1,5U_0$  tuvastas mõõteseade 70 osalahenduse impulssi, kahes erinevas kaabli punktis. Esimeses tekkekohas (kaugus kaabli otsamuhvist 0-5 m)

esines 51 osalahenduse impulssi maksimaalse näivlaenguga 325 pC ja teises tekkekohas (kaugus kaabli otsamuhvist 24-29 m) 19 osalahenduste impulssi maksimaalse näivlaenguga 158 pC.



Joonis 4.13 Osalahenduste histogramm pingetel  $U_0$  kuni  $2U_0$



Joonis 4.14 Osalahenduste tekkekohad pingetel  $U_0$  kuni  $2U_0$

Joonistelt 4.13 ja 4.14 on näha, et pingetel  $U_0$  kuni  $2U_0$  tuvastas mõõtesead 107 osalahenduste impulssi, kahes erinevas kaabli punktis. Esimeses tekkekohas (kaugus kaabli otsamuhvist 0-5 m) esines 78 osalahenduse impulssi maksimaalse näivlaenguga 325 pC. Esines ka üks impulss peaaegu 10 m kaugusel kaablimuhvist. Teises tekkekohas (kaugus kaabli otsamuhvist 24-29 m) esines 29 osalahenduste impulssi maksimaalse näivlaenguga 230 pC.

Osalahenduste detektori Tettex Instruments OWTS olulisemad mõõdetud ja arvutatud katseobjekti parameetrid on esitatud tabelis 4.2. Keskmine näivlaeng on esitatud pingetel  $U_0$ ,  $1,5U_0$  ja  $2U_0$  kuna mõõtmisel kasutatud analüüsitarvara ei võimaldanud väljastada keskmisi näivlaengute väärtusi pingevahemike kohta. Osalahenduste tekkimise asukohta tuvastas seade OWTS selgelt ebatäpsemini kui eelnevas peatükis käsitletud mõõteseade DAC.

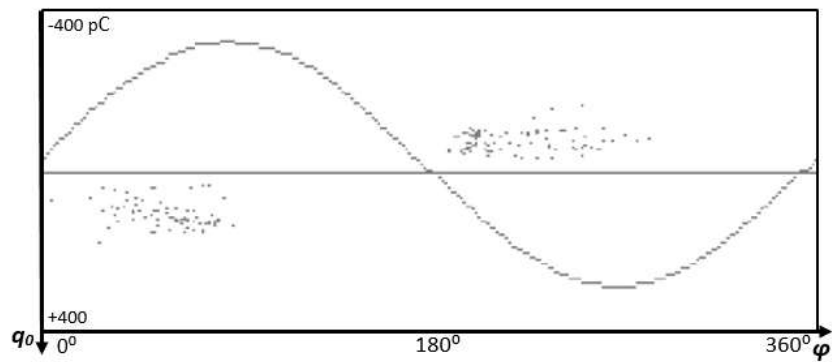
Tabel 4.2 Osalahenduste detektori Tettex Instruments OWTS olulisemad mõõtetulemused

Parameeter	Pinge		
	$U \leq U_0$	$U \leq 1,5U_0$	$U_0 \leq U \leq 2U_0$
Tuvastatud osalahenduste impulsside arv	6	70	107
Maksimaalne osalahenduste näivlaeng $q_{0max}$ , pC	215	325	325
	Pingel $U_0$	Pingel $1,5U_0$	Pingel $2U_0$
Keskmine osalahenduste näivlaeng $q_{0avg}$ , pC	101	258	297
Ligikaudne osalahenduste tekkekoht kaablis, m	0-6 ; 24-29		
Osalahenduste süttimispinge $U_i$ , kV	15		
Sagedus, Hz	231,4		

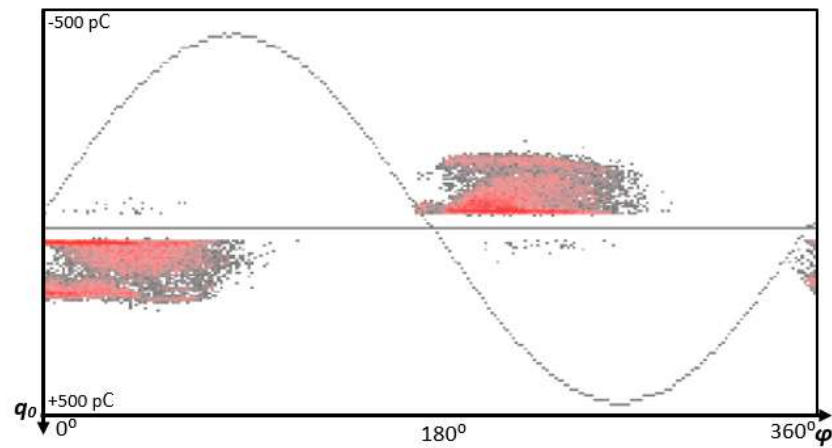
### 4.3 Power diagnostix ICM system mõõtetulemused

Kuna analüüsi tarkvara ei olnud võimeline kasutama reflektomeetria meetodit osalahenduste mõõtmisel, siis antud seadmega osalahenduste tekkekohta määrata polnud võimalik. Samas oli võimalik mõõta osalahendusi erinevate sageduste ribalaiustega, milliste korral osalahendusi tuvastati. Osalahendused tekitasid mõõteahelas kõrgsageduslikke impulsse, mis võimendati eelvõimendi abil ning edastati diagnostikaseadmesse. Töös kasutati kahte ribalaiust – kitsast ribalaiust sagedusega (*narrow band*) 100-250 kHz ja laia ribalaiust (*wide band*) sagedusega 40-800 kHz. Samuti sai muuta hilistumisaega (*dead time*) mis kujutab endast mõõtmiste pausi pärast osalahenduse impulsi tuvastamist. Näiteks kui hilistumisaeg oli 20  $\mu$ s, siis 20  $\mu$ s jooksul peale osalahenduse impulsi tuvastamist järgmist osalahendust ei tuvastatud. Hilistumisaega kasutatakse, et vältida analüsaatori poolt kaabli otsast osalahenduste impulsside peegelduste tõlgendamist osalahendustena. Joonisel 4.15 on ICM system väljundgraafik pingel 12 kV. Joonisel 4.16 pingel  $1,5U_0$  (18 kV) ning joonisel 4.17 pingel  $2U_0$  (24 kV). Joonistel olevad graafikud on saadud kasutades laia ribalaiust. Mõõtmised teostati 60 sekundi jooksul mille ajal mõõteahela toidet ei katkestatud. Mõõdeti samadel pingetel nagu teiste töös kasutatud seadmetega. Müratase mõõtmiste ajal oli 25

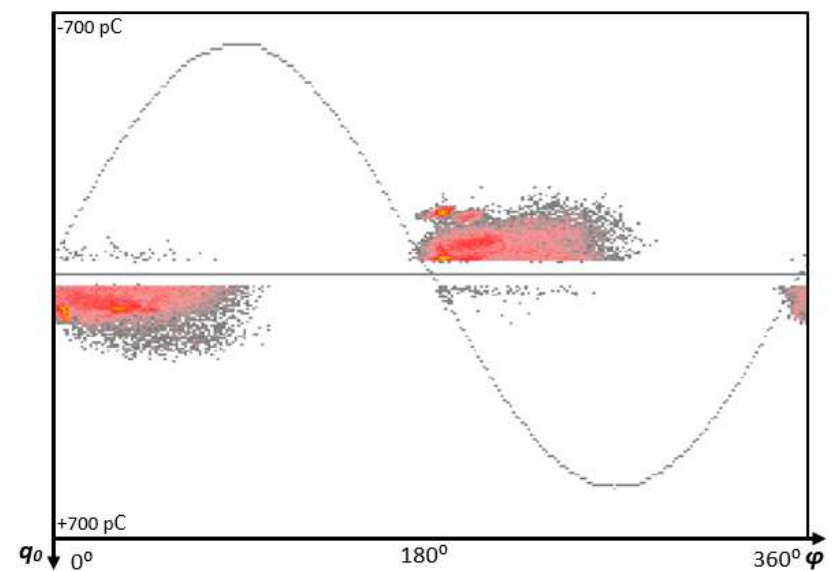
pC. Joonistel kasvavad näivlaengu telje väärtused vastupidiselt (ülevalt alla), sest kalibreerimine teostati negatiivsete laengutega



Joonis 4.15 ICM system osalahenduste väljundgraafik pingel 12 kV



Joonis 4.16 ICM system osalahenduste väljundgraafik pingel 18 kV



Joonis 4.17 ICM system osalahenduste väljundgraafik pingel 24 kV

Tabelis 4.3 on osalahenduste detektori ICM mõõtetulemused laia ribalaiuse korral (40-800 kHz) ja tabelis 4.4 kitsa ribalaiuse korral (100-250 kHz). Tulemused on väljastatud tabelitesse 4.3 ja 4.4 alates osalahenduste süttimispingest. Tabelis 4.5 on mõõtetulemused erineva hilistumisaja korral, pingel  $1,3U_0$  (15,6 kV).

Tabel 4.3 Osalahenduste detektori ICM mõõtetulemused laia ribalaiuse korral 60 s jooksul

Pinge, kV	Osalahenduste impulsse positiivsel poolperioodil	Osalahenduste impulsse negatiivsel poolperioodil	Osalahenduste impulsse kokku	Keskmine näivlaeng, pC
12	96	84	180	77,9
15,6	6 630	6 594	979	171
18	11 933	12 175	24 108	176
21,6	15 276	16 079	31 355	181
24	17 832	18 366	36 198	168

Tabel 4.4 Osalahenduste detektori ICM mõõtetulemused kitsa ribalaiuse korral 60 s jooksul

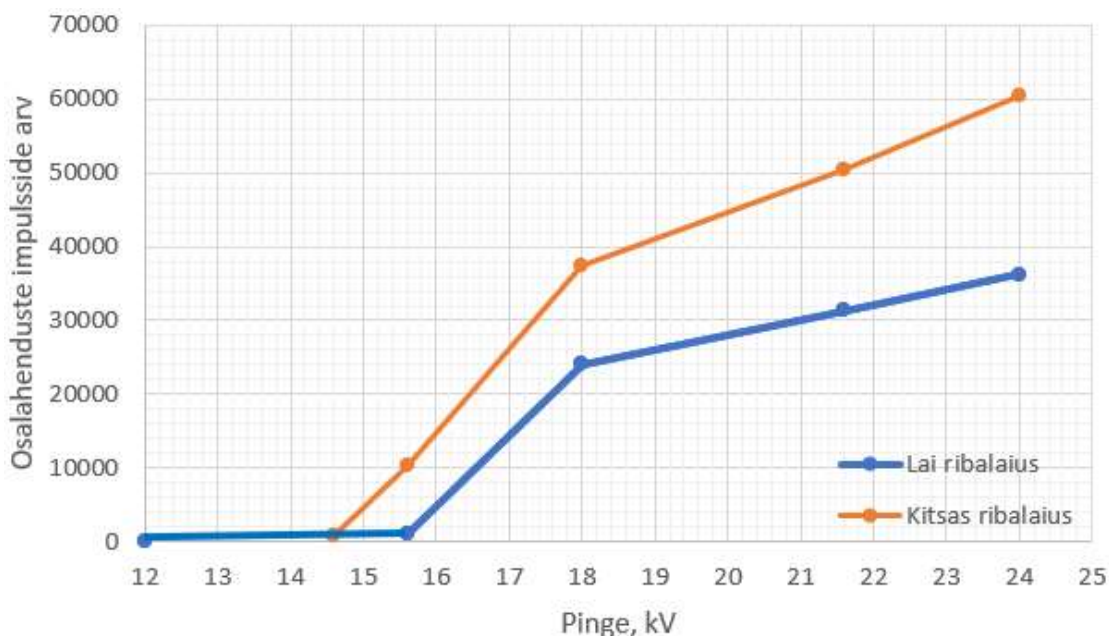
Pinge, kV	Osalahenduste impulsse positiivsel poolperioodil	Osalahenduste impulsse negatiivsel poolperioodil	Osalahenduste impulsse kokku	Keskmine näivlaeng, pC
14,6	437	439	876	211
15,6	5 199	5 226	10 425	235
18	18 683	18 813	37 496	261
21,6	24 868	25 492	50 360	272
24	30 066	30 331	60 397	278

Tabel 4.5 Osalahenduste detektori ICM mõõtetulemused erineva hilistumisaja korral pingel 15,6 kV 60 s jooksul

Hilistumisaeg, $\mu$ s	Osalahenduste impulsse positiivsel poolperioodil	Osalahenduste impulsse negatiivsel poolperioodil	Osalahenduste impulsse kokku	Keskmine näivlaeng, pC
20	5 199	5 226	10 425	180
40	492	487	979	175
60	417	232	649	181
80	1 137	677	1 814	107

Tabelist 4.5 on näha et hilistumisaja muutmisel mõõtetulemused küll muutusid, kuid mitte mingi kindla seaduspärasuse järgi. Hilistumisajaga 20  $\mu$ s esines küll oluliselt rohkem osalahenduste

impulsse kui teiste hilistumisaegade korral, kuid jällegi 80  $\mu$ s korral esines osalahenduste impulsse rohkem kui 40 ja 60  $\mu$ s korral. Samuti oli osalahenduste keskmine näivlaeng mõõtmiste korral samades suurusjärgudes, oluliselt erines ainult keskmine näivlaeng 80  $\mu$ s hilistumisaja korral. Tulemustest võib järeldada, et hilistumisaeg mõõtetulemusi mingis kindlas suunas ei mõjuta. Seda saab põhjendada sellega, et enamus osalahendused ei tekkinud nii tihedalt, et hilistumisaja muutmine oleks mõjutanud mõõtetulemusi. Samas võib aga järeldada seda, et mõõtes samal pingel võisid tulemused üksteisest märgatavalt erineda. Mõõtes osalahenduste süttimispinge lähedase pinge väärtusega, mingil põhjusel teatud aja möödudes osalahenduste impulsid kadusid. Edasised mõõtmised teostati hilistumisajaga 20  $\mu$ s. Joonisel 4.18 on toodud osalahenduste impulsside arv mõõtes ICM seadmega erinevatel pingetel, laia ja kitsa ribalaiusega ja hilistumisajaga 20  $\mu$ s.



Joonis 4.18 Osalahenduste impulsside arv erinevatel ribalaiustel 60 s jooksul

Tabelitest 4.3 ja 4.4 ning jooniselt 4.18 on näha, et osalahenduste süttimispinge tuvastati laia ribalaiusega pingel  $U_0$  (12 kV) ja kitsa ribalaiuse korral pingel 14,6 kV. Seega on näha, et osalahenduste süttimispinget sai täpsemini mõõta laia ribalaiusega, kuna mõõtes kitsa ribalaiusega pingel  $U_0$  osalahendusi ei tuvastatud. Kõrgemate pingete korral tuvastati aga kitsa ribalaiusega mõõtes rohkem osalahenduste impulsse kui laia ribalaiuse korral. See võib olla tingitud sellest, et mõõtes kitsa ribalaiusega tekivad mõõteahelas osalahenduste toimel suure amplituudiga võnkumised, mis sumbuvad aeglaselt. Selliseid võnkumisi võis osalahenduste detektor eksikombel tõlgendada kui osalahendusi ja selle tõttu tuvastati kitsa ribalaiusega mõõtes rohkem osalahenduste impulsse kui laia ribalaiusega. Mõõtmised teostati ka väiksemate pingetega (6 kV ja



9,6 kV), kuid kuna nendel pingetel osalahendusi ei tuvastatud, siis pole need ka kajastatud joonistel ja tabelites.

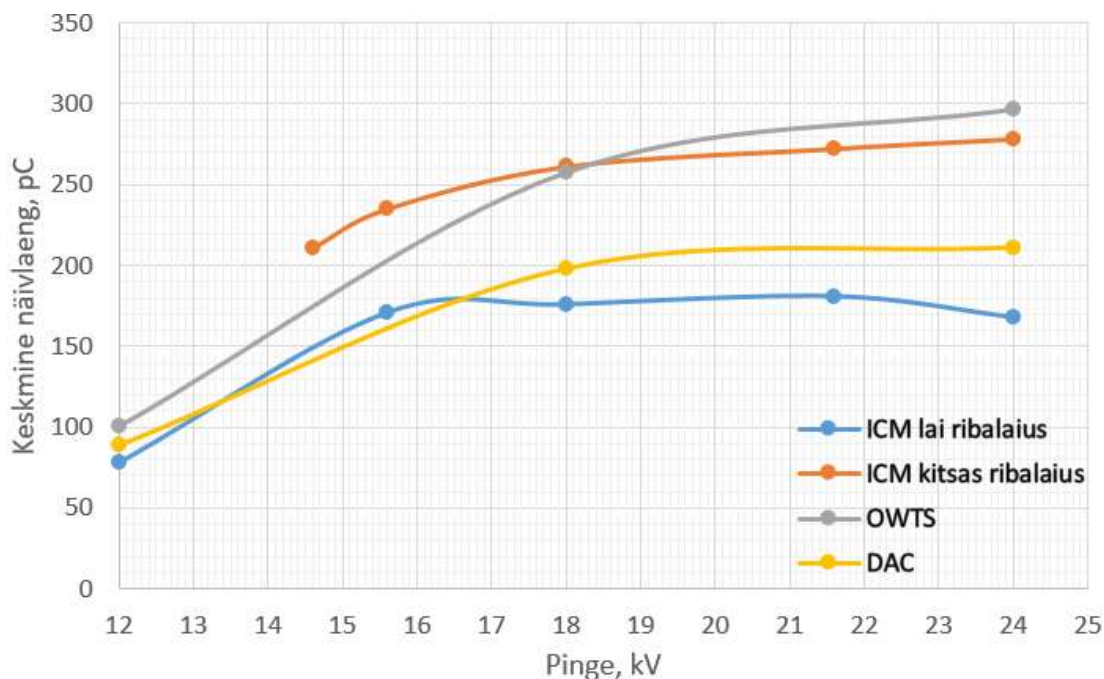
#### 4.4 Mõõtetulemusi võrdlev analüüs

Mõõtmiste käigus kasutati eelnevates peatükkides 3.2 – 3.4 kirjeldatud seadmeid ja peatükis 3.1 kirjeldatud katseobjekti. Kuna mõõtmiste meetodika ja analüüsi tarkvarade meetodika erinevate seadmete korral erines, siis ei ole võimalik ka kõiki erinevate seadmete poolt mõõdetud parameetreid omavahel võrrelda. Nagu eelnevas peatükis kirjeldatud, siis mõõteseade ICM ei kasuta mõõtmistel reflektomeetria meetodit ja kasutati sagedust 50 Hz. Samuti teostati mõõtmised 60 sekundi jooksul, mille korral katseobjekti oli kogu aja jooksul pingestatud. Seega tuvastati sellisel meetodil mõõtmisel palju rohkem osalahenduste impulsse kui sumbuva vahelduvpingelise meetodiga mõõtmiste korral seadmetega OWTS ja DAC ning seega need suurused pole võrreldavad. Mõõteseade DAC ja OWTS tarkvara omakorda ei sorteerinud eraldi positiivsel ja negatiivsel poolperioodil esinenud osalahendusi. Võrrelda sai aga osalahenduste süttimispingeid (tabel 4.6) ja keskmiste osalahenduste näivlaengute väärtusi erinevatel pingetel (joonis 4.19).

Tabel 4.6 Osalahenduste süttimispinge  $U_i$  amplituudväärtus

Kasutatud osalahenduste mõõteseade	Osalahenduste süttimispinge $U_i$ , kV
Onsite HV DAC	14,20
Tettex instruments OWTS	15,00
Power diagnostix ICM system (laia ribalaiusega)	16,97
Power diagnostix ICM system (kitsa ribalaiusega)	20,65

Mõõteseade ICM süttimispingete väärtused erinevad peatükis 4.3 esitatud väärtustest, sest tabelis 4.6 on esitatud pinge amplituudväärtus, peatükis 4.3 oli esitatud efektiivväärtus. Nagu näha tabelist 4.6, siis kõige väiksema pinge korral (14,2 kV) tuvastas osalahendusi sumbuva vahelduvpingelise mõõtmise meetodil põhinev seade DAC. Samuti on näha et ka teine samal meetodil põhinev seade OWTS tuvastas osalahendusi madalamal pingel kui võrgusagedusliku vahelduvpinge mõõteseade ICM. Siiski ei saa järeltada milline seade mõõtis süttimispinge väärtust täpsemini, kuna mõõteseadmed mõõtsid erinevatel sagedustel. Mõõteseade OWTS ja DAC süttimispinged olid üsna lähedased, väike erinevus võis olla tingitud mõõtesageduse erinevusest. Seade ICM tuvastas laia ribalaiusega osalahendusi märgatavalt madalamal pingel kui kitsa ribalaiusega. See võis olla tingitud selles, et laia ribalaiuse süttimispingel mõõdetud osalahenduste sagedused olid väljaspool kitsa ribalaiuse mõõtepiirkonda.

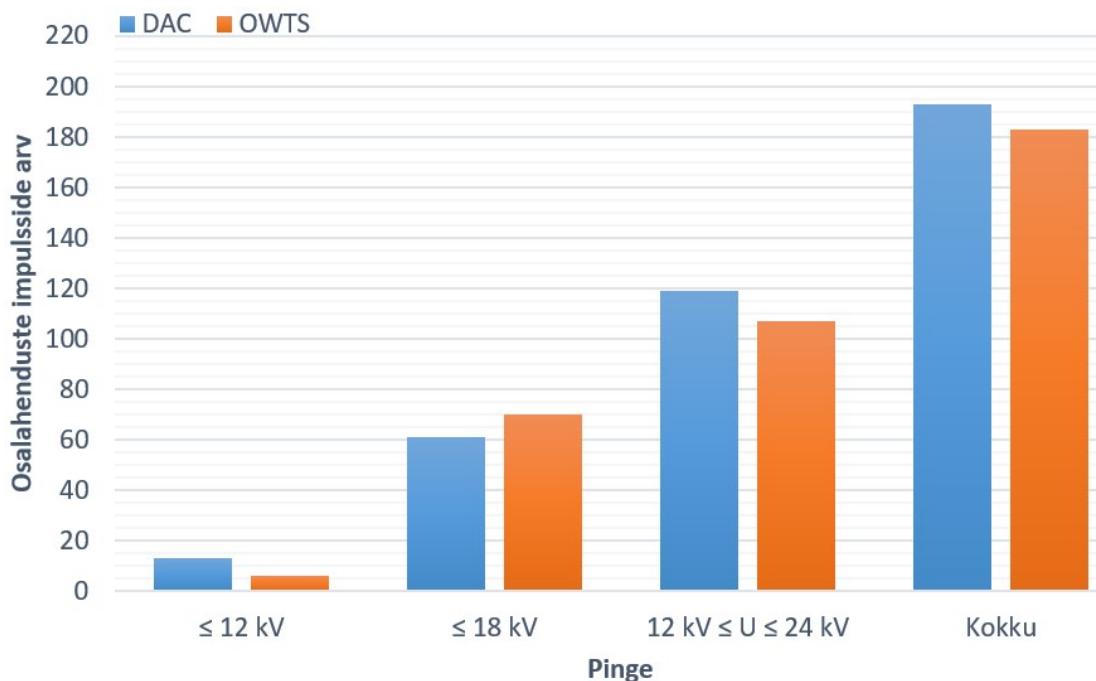


Joonis 4.19 Erinevate seadmetega mõõdetud keskmine näivlaeng erinevatel pingetel

Joonise 4.19 põhjal on hea võrrelda sumbuva vahelduvpingelise meetodit kasutavaid seadmeid OWTS ja DAC, seadmega ICM. Seadmega ICM mõõdeti osalahendusi oluliselt pikema aja jooksul – OWTS ja DAC mõõtmised toimusid vaid mõne ms jooksul. Seega tuvastas seade ICM ühe mõõtmise korral rohkem osalahendusi ja kajastab nende keskmiste näivlaengute suurust suurema katsepunktide kogumi põhjal kui OWTS ja DAC seadmed. Samuti mõõtmise tulemused võrgusageduslikul pingel esindavad paremini osalahenduste väärtusi, mis tekivad elektrivõrgu talitlusel. Seadme OWTS mõõtetulemused ühtisid rohkem ICM mõõtmistega kitsal ribalaiusel ja DAC mõõtetulemused, ICM mõõtetulemustega laial ribalaiusel. Vaadates joonist 4.18 on näha et mõõtes kitsal ribalaiusel tuvastas seade ICM märgatavalt rohkem osalahenduste impulsse, mis on eelnevalt põhjendatud sellega, et osalahenduste detektor tuvastas eksikombel osalahenduste poolt tekitatud võnkumisi osalahendustena. Kuna selline nähtus leiab eelkõige aset just suuremate näivlaengute impulsside korral, siis võib see teoreetiliselt põhjendada ka suuremat keskmist näivlaengut kitsa ribalaiuse korral. Siiski jäid kõik näivlaengute suurused enam-vähem samasse suurusjärku ning võib järeldada, et kõik seadmed tuvastasid keskmise näivlaengu väärtust adekvaatselt. Erinevused näivlaengute väärtustes olid eelkõige tingitud mõõtetoodika erinevusest.

Mõõteseadmed DAC ja OWTS põhinesid samal mõõtmiste meetodikal ja tulemuste analüüsimiseks kasutati sama tarkvara, seega kõik parameetrid on võrreldavad ja antud peatükis käsitletavad. Mõõdeti ka samasuguse konfiguratsiooniga ja sarnase sagedusega (OWTS seadmega sagedusel 231 Hz ja DAC seadmega sagedusel 221 Hz). Nagu ka eelnevas peatükis 4.2 kirjeldatud, oli

osalahenduste seade OWTS osalahenduste tekkekoha tuvastamisel ebatäpsem kui DAC. Defektid kaablis paiknesid vastavalt 2,4 ja 27,8 m kaugusel otsamuhvist ja nagu näha tabelitest 4.1 ja 4.2, siis seade DAC andis rikkekoha kauguseks vastavalt 2-3 ja 26-28 m ning seade OWTS 0-6 ja 24-29 m. Seega seade DAC suutis tuvastada osalahenduste tekkekoha umbes 1 m täpsusega ning seade OWTS tegi seda umbes 3-4 m täpsusega ja oli seega ebatäpsem. Lisaks on võimalik võrrelda ka OWTS ja DAC seadme poolt tuvastatud osalahenduste impulsside arvu erinevates pingevahemikkudes (joonis 4.20).



Joonis 4.20 DAC ja OWTS poolt tuvastatud osalahenduste impulsside arv erinevates pingevahemikkudes

Joonisel 4.20 on näha et osalahenduste mõõteseade DAC tuvastas nimipingel (12 kV) 2 korda rohkem osalahenduste impulsse kui seade OWTS. Ülejäänud pingevahemikkude korral jäid tuvastatud osalahenduste impulsid ligikaudu võrdseks. Pingel kuni 18 kV tuvastas seade OWTS rohkem osalahenduste impulsse ja pingevahemikus 12-24 kV tuvastas rohkem impulsse seade DAC. Kokku tuvastas osalahenduste mõõteseade tehtud mõõtmiste käigus DAC 10 osalahenduste impulssi rohkem kui OWTS seade.

## KOKKUVÕTE

Käesolevas töös anti esmalt ülevaade osalahenduste nähtusest elektriseadmete isolatsioonis ja kirjeldati erinevaid osalahenduste mõõtmiste meetodikaid. Töö teises pooles anti ülevaade TalTechi kõrgepingelaboris kasutatavatest osalahenduste mõõtmise seadmetest, uuriti nende ehitust, mõõtmiste meetodikaid ja olulisemaid parameetreid. Seejärel teostati kõikide seadmetega samal katseobjekti osalahenduste mõõtmised, analüüsiti saadud tulemusi ja võrreldi erinevate seadmete mõõtetulemusi.

Käesoleva töö põhjal ei ole võimalik järeldada milline osalahenduste mõõtmiseks kasutatav seade oli parem või täpsem kuna seadmed erinesid üksteisest mõõtemetoodika ja tehniliste parameetrite poolest ning seega ei olnud tulemused üksteisega otseselt võrreldavad. Ainus tulemus mida sai otseselt võrrelda oli osalahenduste tekkekoha tuvastamine, kuid antud mõõtmist oli võimalik teostada vaid kahe, sumbuva vahelduvpinge meetodit kasutava seadmega, mis tuvastasid rikkekoha reflektomeetria meetodil. Kolmas seade mõõtmistel reflektomeetria meetodit ei kasutanud ja seega ei olnud võimaline osalahenduste tekkekohta tuvastama. Tehtud mõõtmiste põhjal saab järeldada, et kõik TalTechi kõrgepingelaboris olevad osalahenduste mõõteseadmed olid töökorras ja sobivad osalahenduste tuvastamiseks keskpinge kaabelliinides. Mõõtetulemused küll erinesid mingil määral üksteisest, kuid erinevused olid põhjendatavad mõõteseadmete tehnoloogiliste iseärasustega.

Käesolev töö oli ülevaatlik ning antud teema vajab tulevikus kindlasti täiendavaid uurimusi. Antud teema puhul saaks tulevikus uurida täiendavalt võrgusagedusliku meetodi rakendamist erinevatel ribalaiustel. Samuti saaks anda täpsema ülevaate sellest, milliste osalahenduste parameetrite väärtuse korral oleks otstarbekas kaabelliin välja vahetada. Käesolevas töös mõõdetud keskpinge kaablile olid tehtud tahtlikult vigastused, kuid kui reaalse mõõtmiste korral elektrivõrgus saadaks sellised katsetulemused oleks kindlasti antud kaabel elektrivõrgu talitluseks kõlbmatu, kuna osalahendused tekkisid juba nimipingel. Praktikas erinevate kaablite mõõtmisel ei pruugi mõõtetulemused aga nii kindlalt isolatsiooni seisukorrale viidata, ning saadud tulemustele põhjal otsustab kaabelliini vahetuse või remontimise otstarbekuse üle ekspert. Lisaks saaks täiendavalt uurida osalahenduste mõõtmiste praktilist väärtust Eesti elektrisüsteemis. Töö autorile teadaolevalt teostatakse Eestis osalahenduste mõõtmisi harva, kuna mõõtmiste lisandväärtust ei ole siiani hinnatud piisavaks ja nõuaks ka tarbijate lühiajalisi katkestusi. Kõrgepingevõrkudes on aga probleemiks kaablite suur mahtuvus, mille puhul on osalahenduste mõõtmisteks vaja palju võimsamaid seadmeid, milliseid käesolevas töös kirjeldatud ei ole.

## SUMMARY

The first part of the thesis gave an overview of partial discharge phenomena in the insulation of electric equipment and different partial discharge measuring methods. The second part gave an overview of the partial discharge measuring devices used in high voltage laboratory of Taltech, their measuring methodology, structure and parameters. Partial discharge measurements of the same object were then conducted on all these devices, the results were analyzed and compared.

Based on this thesis, it is not possible to conclude which partial discharge measuring device was better or more accurate, because the equipment differed in terms of measurement methodology and technical parameters and thus the results were not directly comparable. The only result that could be directly compared was the identification of the origin site of partial discharges, but it was only possible to perform this measurement only with two devices using the damped alternating current method, which detected the site of origin by the Time-Domain Reflectometry method. The third device did not use the Time-Domain Reflectometry method for the measurements and was therefore unable to detect the origin site of partial discharges. On the basis of the tests conducted, it can be concluded that all of the partial discharge measuring devices in TalTech high-voltage laboratory were operational and suitable for identifying partial discharges in medium voltage cable lines. The test results differed from each other slightly, but the differences were justified by the different technological features of the measuring devices.

This thesis was comprehensive and this topic will definitely need further research in the future. For example the application of the network frequency method on different bandwidths could be further investigated. It would also be possible to give a more detailed overview of the values of partial discharge parameters in which it would be appropriate to replace the cable line. The medium voltage cable tested in this thesis was deliberately injured, but if in the case of measurements in the power grid, such test results would be obtained, this cable would definitely be unsuitable for the operation of the power grid, as partial discharges were already generated at nominal voltage. In practice, however, tests on the cables may not indicate the fault in insulation so clearly, and on the basis of the results obtained, the expert decides on the expediency of the replacement or repair of the cable line. In addition, the practical value of partial measurement measurements in the Estonian power system could be further explored. According to the knowledge of the author of the thesis, there are not many partial discharge measurements conducted in Estonian power grid, because the necessity of the measurements has so far not been assessed as sufficient and would also require short-term interruptions to consumers. In high voltage networks, however, the

problem is the high capacitance of the cables, which requires much more powerful equipment, which are not described in this thesis, for the measurement of partial discharge.

## KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] IPEC, „Partial Discharge,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.ipec.co.uk/about-partial-discharge/>. [Kasutatud 14. 04. 2019].
- [2] HVPD, „An Introduction to Partial Discharge (PD),“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.hvpd.co.uk/technical/>. [Kasutatud 14. 04. 2019].
- [3] A. Avingu, *Laboratoorne töö kõrgepingetehnikas nr. 5 "Osalahenduste ja kaonurga tangensi mõõtmine"*, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli inseneriteaduskond, 2018.
- [4] R. Aurora ja W. Mosch, *High Voltage and Electrical Insulation Engineering*, New Jersey: IEEE Press Series on Power Engineering, 2010.
- [5] Ü. Treufeldt, „Kõrgepingetehnika loengukonspekt aines AEK 3011 3. osa,“ Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2018.
- [6] E. Kuffel ja W. S. Zaengl, „Partial Breakdown, Corona Discharges,“ *High Voltage Engineering Fundamentals*, Oxford, Pergamon Press, 1986, p. 371.
- [7] В. В. Базуткин, В. П. Ларионов ja Ю. С. Пинталь, *Техника высоких напряжений, (Кõrgepingetehnika)*, Moskva, 1986, p. 464.
- [8] M. Bolotinha, „Treeing in XLPE Insulated Medium & High Voltage Cables,“ *Electrical Technology*, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.electricaltechnology.org/2018/07/treeing-in-xlpe-insulated-mv-hv-cables.html>. [Kasutatud 20. 05. 2019].
- [9] C. Dodds, „Water Treeing in High Voltage Cables: A 230kV HPPT Termination Repair,“ *Thorne&Derrick*, 2015 8. 4.. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.cablejoints.co.uk/blog/article/water-treeing-high-voltage-cables>. [Kasutatud 21. 5. 2019].
- [10] Electrotechnik, „Water Trees and Electrical Trees and Their Role in Cable Insulation Failure,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.electrotechnik.net/2009/07/water-trees-and-electrical-trees-and.html>. [Kasutatud 14. 04. 2019].

- [11] International Electrotechnical Commission, *EVS-EN 60270:2002: High-voltage test techniques - Partial discharge measurements*, 2001.
- [12] W. Hauschild ja E. Lemke, „Basics of High-Voltage Test Techniques,“ 2014. [Võrgumaterjal].  
Saadaval: [http://www.kynixsemiconductor.com/upload/file/Basics%20of%20High-Voltage%20Test%20Techniques\\_20180604.pdf](http://www.kynixsemiconductor.com/upload/file/Basics%20of%20High-Voltage%20Test%20Techniques_20180604.pdf). [Kasutatud 15. 5. 2019].
- [13] L. W. v. Veen, „Comparison of Measurement Methods for Partial Discharge Measurement in Power Cables,“ 2014. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://repository.tudelft.nl/islandora/object/uuid%3Aabb1d11d8-b203-4212-9708-8411a7be7b75>. [Kasutatud 20. 04. 2019].
- [14] R. Bodega, P. H. F. Morshuis, M. Lazzaroni ja F. J. Wester, „PD Recurrence in Cavities at Different Energizing Methods,“ *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, pp. 251 - 258, 02. 04. 2004.
- [15] E. Gulski, P. Cichecki, F. Wester, J. Smit, R. Bodega, T. Hermans ja P. Seitz, „On-site testing and PD diagnosis of high voltage power cables,“ *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, kd. 15, nr 6, p. 1692, 2008.
- [16] A. Avingu, *Keskpingekaabelliinide diagnostikaseadme OnsiteHV DAV MV40 põhjal laboratoorse töö koostamine õppeainesse "Kõrgepingetehnika"*, Tallinn: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut, 2018.
- [17] Onsite High Voltage, „MV Accessories Calibrator CAL141,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.onsitehv.com/technology/en/products/CableDiagnostics/MV-Accessories.html>. [Kasutatud 14. 5. 2019].
- [18] Reka Cables, „Medium voltage power cable HXCMK 20 kV,“ Reka Cables, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.rekacables.com/medium-and-high-voltage-cable/medium-voltage-cable/medium-voltage-power-cable-hxcmk-20-kv>. [Kasutatud 24. 05. 2019].
- [19] Onsite High Voltage, *DAC Test and diagnosis system user manual*, Luzern: Onsite hv international ag, 2017.
- [20] Onsite High Voltage, „DAC MV60 / 60 KV,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <http://www.onsitehv.com/technology/en/products/CableDiagnostics/DAC-MV60.html>. [Kasutatud 28. 04. 2019].



- [21] M. Turner ja E. Gulski, *OWTS Instruction Manual*, Zurich: Tettex Instruments, 1999.
- [22] Power Diagnostix, *The ICMsystem Digital Partial Discharge Recording User Manual*, Aachen: Power Diagnostix.
- [23] Power Diagnostix Systems, „ICMsystem,“ [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.pdix.com/products/partial-discharge-measurement-devices/icmsystem.html>. [Kasutatud 15. 5. 2019].