



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Andrius Pabarčius

**GRĮŽTAMOSIOS ĮTAMPOS METODO TYRIMAS KABELIŲ
DIAGNOSTIKOJE**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Prof. dr. Alfonsas Morkvėnas

KAUNAS, 2017

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

**GRĮŽTAMOSIOS ĮTAMPOS METODO TYRIMAS KABELIŲ
DIAGNOSTIKOJE**

Baigiamasis magistro projektas
Elektros energetikos sistemos (kodas 621H63005)

Vadovas

Prof. dr. Alfonsas Morkvėnas

Recenzentas

Doc. dr. Renata Miliūnė

Projektą atliko

Andrius Pabarčius

KAUNAS, 2017



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Andrius Pabarčius

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos sistemos, 621H63005

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Grįžtamosios įtampos metodo tyrimas kabelių diagnostikoje“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2017 m. gegužės 25 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano **Andriaus Pabarčiaus** baigiamasis projektas tema „Grįžtamosios įtampos metodo tyrimas kabelių diagnostikoje“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

Pabarčius, Andrius. Grįžtamosios įtampos metodo tyrimas kabelių diagnostikoje. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Alfonsas Morkvėnas; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Mokslų kryptis ir sritis: Elektros inžinerija, Technologiniai mokslai

Reikšminiai žodžiai: *Kabelių diegnotika, grįžtamoji įtampa, izoliacija, kabelio būklė.*

Kaunas, 2017. 56 p.

SANTRAUKA

Visi gerai išnagrinėti kabelio būklės nustatymo metodai leidžia laiku nustatyti esamus trūkumus ir užkirsti kelią avarijoms elektros tinkluose. Vienas iš mažiausiai ištirtų diagnostikos metodų yra grįžtamosios įtampos matavimas.

Šio darbo tikslas yra ištirti grįžtamosios įtampos metodo kabelių būklės įvertinimo efektyvumą. Tikslas įgyvendinamas atliekant literatūros šaltinių analizę bei laboratoriniais eksperimentus.

Darbe išanalizuoti šiuo metu naudojami skirtingi kabelių diagnostikos metodai, išnagrinėti grįžtamosios įtampos atsiradimo procesai bei parametrai, ištirta metodo ir kabelio parametrų įtaka grįžtamajai įtampai bei įvertintas metodo efektyvumas.

Pabarčius, Andrius. Study of the Recovery Voltage Method in Cable Diagnostics: Master's qualification degree / supervisor assoc. prof. Alfonsas Morkvėnas. Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Department of Electrical Energy Systems

Research area and field: Electrical and Electronics Engineering, Technological Sciences

Key words: *cable diagnostics, recovery voltage, insulation, cable condition*

Kaunas, 2017. 56 p.

SUMMARY

All the methods for determination of cable condition that have been analysed thoroughly are appropriate for determination of the existing degradation and prevention of power grid failures. One of the least analysed methods of diagnostics is recovery voltage measurement (RVM).

The aim of this paper is to analyse the effectiveness of the recovery voltage method in assessment of cable condition. The aim is implemented by means of the background analysis and laboratory experiments.

The paper has involved analysis of different cable diagnostics methods applied at present, processes of formation and parameters of recovery voltage, study of the influence of diagnostic and cable parameters on the recovery voltage, and assessment of effectiveness of the method.

TURINYS

TRUMPINIAI.....	7
ĮVADAS.....	8
1. KABELINIŲ LINIJŲ DIAGNOSTIKOS METODŲ APŽVALGA	10
1.1. Lokalinė diagnostika.....	11
1.1.1. Dalinių išlydžių matavimas	11
1.1.2. Dalinių išlydžių diagnostika su slopstančiomis AC įtampomis	14
1.2. Integralinė diagnostika.....	16
1.2.1. Dielektrinių nuostolių $\tan \delta$ matavimas	17
1.2.2. Kabelių izoliacijos diagnostika grįžtamosios įtampos metodu.....	18
1.3. Kombinuotoji diagnostika.....	24
2. GRĮŽTAMOSIOS ĮTAMPOS PROCESAI IR DIAGNOSTINIAI PARAMETRAI	26
2.1. Ribinė poliarizacija	27
2.2. Dielektrinė elgsena	27
2.3. Maksvelo modelis	28
2.4. Grįžtamosios įtampos diagnostiniai parametrai.....	32
3. SKIRTINGŲ VEIKSNIŲ ĮTAKA GRĮŽTAMAJAI ĮTAMPAI.....	34
3.1. Aplinkos temperatūros įtaka	34
3.2. Senėjimo įtaka.....	35
3.3. Matavimo varžos R_m įtaka	36
3.4. Poliarizacijos laiko įtaka	36
4. LABORATORINIAI EKSPERIMENTAI	38
4.1. Bandymo parametų poveikis grįžtamajai įtampai	38
4.1.1. Įkrovimo trukmė	39
4.1.2. Iškvovimo trukmė.....	40
4.1.3. Įkrovimo įtampa.....	41
4.1.4. Bandymo parametų poveikio grįžtamosios įtampos charakteristikoms įvertinimas	42
4.2. Grįžtamosios įtampos parametų priklausomybė nuo temperatūros.....	43
4.2.1. Eksperimento modelis	43
4.2.2. Matavimo procedūra.....	44
4.2.3. Rezultatai	46
4.2.4. Temperatūros poveikio grįžtamosios įtampos charakteristikoms įvertinimas.....	48
4.3. Kabelio ilgio įtaka grįžtamajai įtampai.....	49
4.3.1. Matavimo modelis	50
4.3.2. Matavimų rezultatai	50
4.3.3. Kabelio ilgio įtakos grįžtamajai įtampai įvertinimas.....	52
IŠVADOS.....	53
LITERATŪROS ŠALTINIAI	54

TRUMPINIAI

AC - kintamoji srovė;

DC - Nuolatinė srovė;

VLf - labai žemas dažnis;

PD - dalinis išlydis;

RVM - grįžtamosios įtampos matavimas;

IRC - izoterminės relaksacijos grandinė;

MV - vidutinė įtampa;

DAC - slopstančioji kintamoji srovė;

OWTS - Svyruojančių bangų bandymo sistema;

CDS - kabelių diagnostikos sistema;

PDIV - dalinio išlydžio pradinė įtampa;

PDEV - dalinio išlydžio gesinimo įtampa;

CI - būklės indeksas;

U_m - maksimali grįžtamoji įtampa;

U_c - įkrovimo arba poliarizacijos įtampa;

t_p - laikas kurio metu pasiekama maksimali grįžtamoji įtampa;

t_d - iškrovimo arba depoliarizacijos laikas;

t_c – įkrovimo arba poliarizacijos laikas;

s – pradinis nuolydis.

IVADAS

Elektros energetikos skirstomojo tinklo sistemos darbo patikimumui didelę įtaką turi pagrindinių skirstomojo tinklo sistemos elementų – linijų ir transformatorinių pastočių techninė būklė. Siekiant užtikrinti sistemos darbo patikimumą nuolat statomos naujos, taip pat atliekamos senų kabelinių linijų rekonstrukcijos.

Senstant kabelinėms linijoms didėja jų gedimų bei avarijų skaičius. Daug lėšų skiriama jų pašalinimui. Tam, kad gedimų ir avarijų kabelinėse linijose būtų kuo mažiau, būtina atlikti jų izoliacijos diagnostiką.

Kabelių diagnostika – tai kabelių linijų konstruktyviųjų elementų ir izoliacijos būklės įvertinimas. Palyginti su bandymais, diagnostikos metu kabeliai beveik nepatiria paaukštintos bandymo įtampos apkrovos, todėl galimai silpnose kabelio vietose pramušimo nebūna. Atliekant bandymus paaukštinta įtampa, negalima įvertinti izoliacijos nusidėvėjimo laipsnio, t. y. likutinio resurso. [1]

Atliekamos diagnostikos dėka:

- iš anksto nustatomi defektai kabelinėse linijose;
- sumažėja gedimų ir avarijų skaičius kabelinėse linijose
- sumažėja išlaidos, kabelinių linijų gedimų ir avarijų pašalinimui;
- nebelieka išlaidų nepagrįstai remontuojamoms kabelinėms linijoms;
- pagerėja kabelinių linijų montavimo darbų kokybė;
- pailgėja kabelinių linijų tarnavimo laikas;
- racionaliai planuojami kabelinių linijų remontai.

Yra daug diagnostikos būdų, bet tik labai gerai išnagrinėti bei tinkamai pritaikyti kabelio būklės nustatymo metodai leidžia nepriekaištingai interpretuoti matavimų rezultatus. Vienas iš mažiau išanalizuotų diagnostikos metodų yra grįžtamosios įtampos matavimas. Siekiant įsitikinti, ar šis metodas yra efektyvus atliksime tyrimą.

Darbo tikslas: ištirti grįžtamosios įtampos metodo kabelių būklės įvertinimo efektyvumą.

Objektas: Grįžtamosios įtampos metodas.

Tiksliui pasiekti išskelti uždaviniai:

1. išanalizuoti šiuo metu naudojamus kabelių būklės vertinimo metodus;
2. išnagrinėti grįžtamosios įtampos atsiradimo procesus ir parametrus;
3. iširti diagnostinių bei kabelio parametrų įtaką grįžtamosios įtampos charakteristikų pokyčiams;
4. įvertinti grįžtamosios įtampos metodo efektyvumą.

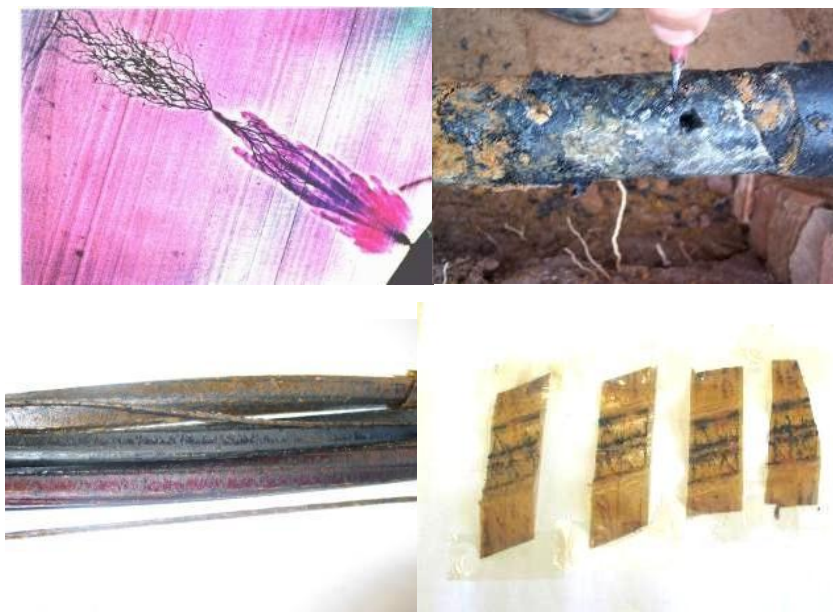
Tyrimo metodai:

1. mokslinės literatūros analizė;
2. antrinių literatūros šaltinių analizė;
3. laboratoriniai ekperimentai;
4. kiekybinė analizė.

1. KABELINIŲ LINIJŲ DIAGNOSTIKOS METODŲ APŽVALGA

Kabėlių gedimus galima suskirstyti į dvi kategorijas: izoliacijos gedimai ir movų gedimai. Dažniausiai izoliacijos gedimai yra susiję su integraline izoliacijos degradacija, tokia kaip vandens medžiai XLPE kabeliuose, ir celiuliozės degradacija PILC kabelių atveju, o movų gedimai yra lokalinės problemos, tokios kaip prasta sandūros gamybos kokybė arba sumažėjęs alyvos lygis alyva pripildytų sandūrų atveju.

Siekiant sumažinti gedimų mastą vidiniais defektais, galima taikyti darbo vietoje atliekamą kabelių diagnostiką. Kabelių izoliacijos senėjimo sukeltus gedimus galima sumažinti taikant šias diagnostikos metodų rūšis: (a) izoliacijos tūrinių savybių vertinimą, pvz., dielektrinių nuostolių matavimas; (b) grįžtamosios įtampos matavimą; ir (c) relaksacijos srovės matavimą.



1.1 pav. Skirtingi galios kabelių izoliacijos degradacijos pavyzdžiai. Izoliacijos defektai gali kilti iš prasto montavimo nuo pat pradžių arba gali būti inicijuoti kabelių sistemos eksploatavimo metu.

Žinoma, kad izoliacijos gedimus kabelių tinkle gali sukelti žemesnis dielektrinis stipris dėl sendinimo procesų arba vidiniai defektai izoliacijos sistemoje, žr. 1.1. paveikslą.

Tačiau lokaliųjų defektų, tokių kaip prasta gamybos kokybė arba statybos darbų sukelti defektai, negalima aptikti pasitelkus integralinius matavimus, kaip aprašyta pirmiau punktais (a), (b) arba (c). Lokalūs defektų tipai rodo tipinius simptomus, vadinamus daliniais išlydžiais. XLPE atveju šių defektų daugiausia yra movose. Autonominė dalinių išlydžių (PD) diagnostika laikinai tiekiant energiją kabelių sistemai su slopstančiosios kintamosios srovės (angl. *damped alternating voltage*, sutr. DAC) įtampa yra vienas iš diagnostikos metodų, siekiant aptikti ir fiksuoti šių defektų tipus, bei ja suteikiama pakankamai informacijos, siekiant įvertinti izoliacinės sistemos būklę ir palaikyti turto valdymo sprendimus dėl būtinų remonto ir keitimo darbų.

Remiantis tuo, kad galios kabeliuose pramušimas gali įvykti dėl izoliacijos defektinių vietų ir dėl visiškos izoliacijos degradacijos, aptariami du vienas kitą papildantys požūriai:

- 1) diagnostikos metodai lokalei defekto degradacijai tirti;
- 2) diagnostikos metodai integralinei izoliacijos degradacijai tirti.

1.1. lentelėje pateikta tipinių defektų, kurių gali pasitaikyti kabelių izoliacijoje ir kabelių movose, apžvalga [17], kurioje tarp PILC ir XLPE kabelių bei susijusių komponentų atlikta diferenciacija.

1.1. lentelė. Tipinių defektų apžvalga

Kabelis	Movos	Izoliacija
PILC	Sumažėjęs alyvos lygis	Išdžiūvimas
	Atsikišimas jungtyse	Ertmės
	Drėgmės skverbimasis	Drėgmės skverbimasis
	Ertmės/plyšiai	
	Blogai sukietėjusi derva	
XLPE	Vidinio paviršiaus problemos	Vandens medžiai
	Atsikišimas jungtyse	Ertmės
	Drėgmės skverbimasis	Apvalkalo pažeidimai
	Ertmės/plyšiai	
	Dirvos profiliavimą primenantis judėjimas	
	Likę pusiau laidūs sluoksniai	
	Raukšlės ant izoliacijos	

1.1. LOKALINĖ DIAGNOSTIKA

Lokalinių defektų, tokių kaip ertmės ar likę pusiau laidūs sluoksniai, atveju daliniai išlydžiai pasitaikys dėl padidėjusio elektrinio lauko, todėl izoliacija degraduos ir galiausiai įvyks pramušimas. PD defektų XLPE ir PILC kabelių sistemose fizika ir priežastys yra žinomos ir išsamiai aprašytos mokslininko R.Plath leidiniuose.

1.1.1. Dalinių išlydžių matavimas

Anot tinklo savininko, pirma svarbu žinoti, ar kabelių sistema veikia nuolatiniams PD atvejais normaliomis eksploatacijos sąlygomis, ar – ne. Antra svarbi problema yra izoliacijos sistemos elgsena esant viršįtampiams dėl įžemėjimo arba perjungimo. Tinkluose su rezonansiniu įžeminimu dėl fazės įžemėjimų darbinė įtampa kitose dviejose fazėse padidės iki $1,7 U_0$ ir galėtų taip išlikti iki 2 valandų.

Jeigu kabelių sistemoje yra nuolatinė PD normaliomis eksploatacijos sąlygomis, kyla klausimas apie šių PD riziką. Klausimas turi būti svarstomas skirtingų kabelių izoliacijos tipų ir skirtingų movų tipų atveju. Iš esmės, sprendžiant apie kabelių sistemos PD elgseną, svarbūs trys parametrai, tai yra:

- 1) PD pradžios įtampa PDIV;
- 2) PD gesinimo įtampa PDEV;
- 3) PD lygis esant U_0 .

Paprastai, kaip vertinimo kriterijus naudojamas maksimalus tariamasis krūvis galios ciklo metu esant U_0 . Jau yra palyginti gerų patirčių siekiant įvertinti rizikos faktorių dėl darbo patikimumo atsižvelgiant į PD vietą (kabelių izoliaciją, sandūras ir galines movas), izoliacijos tipą ir movos konstrukciją. PD atvejų intensyvumas taip pat charakterizuoja PD šaltinio sukurtą riziką.

Daliniais išlydžiais vadinamas, išlydžio procesas, vykstantis skystosios ar kietosios izoliacijos viduje, prijungus įtampą. Eksploatuojamų įrenginių izoliacija yra pastoviai veikiamą tinklo įtampos ir viršįtampių. Nuolat ilgą laiką veikiant įtampai, dalinių išlydžių procesas intensyvėja. Didinant ir mažinant įtampą dalinių išlydžių lygis kinta nevienodai. Taip pat daliniai išlydžiai intensyvėja veikiant viršįtampiams.

Vykstant daliniams išlydžiams blogėja elektros įrenginių izoliacinės savybės, izoliacinėje alyvoje didėja įvairių dujų kiekiai, kietojoje izoliacijoje yra veikiami mikroertmių paviršiai bei sluoksnių sandūros, įtrūkimai ir jie didėja, o tuo pačiu spartėja senėjimo procesai. Dalinių išlydžių lygis senstant izoliacijai didėja vidutiniškai 5–8 % per metus

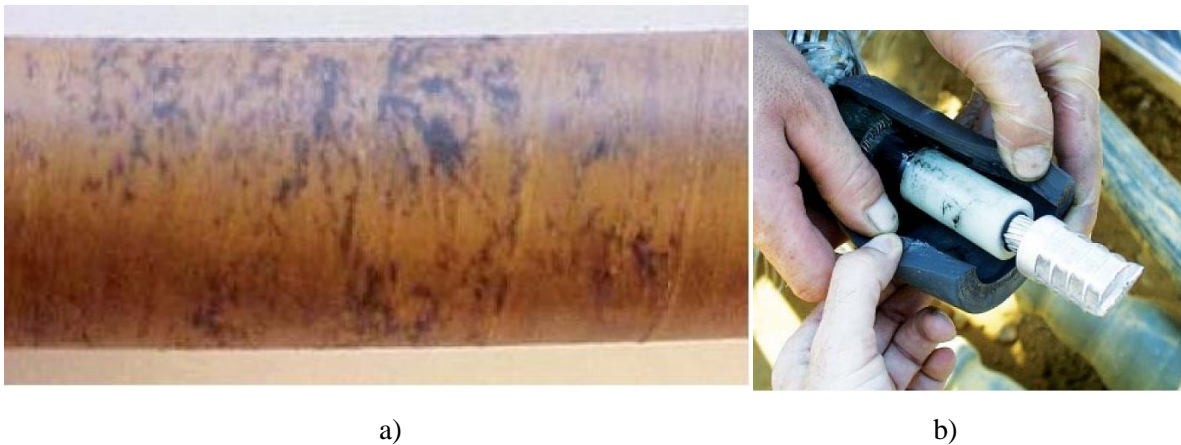
Daliniai išlydžiai, atsirandantys įrenginio izoliacijoje, esant tam tikromis sąlygomis, gali būti charakterizuojami įvairiais matuojamais dydžiais, tokiais kaip tariamas krūvis, pasikartojimo dažnis (intensyvumas), vidutinė srovė ir pan. Tariamasis krūvis yra matuojamas piko Kulonais (pC). Kai skaičiuojamas izoliacijos darbo laiko resursas dalinių išlydžių yra įvertinami išlydžių galia P.

Daliniai išlydžiai gali būti nuo 0,01 pC iki 10^6 pC. Dalinių išlydžių krūvis yra išskiriamas į du lygmenis – tai pradiniai daliniai išlydžiai ir kritiniai daliniai išlydžiai. Pradiniai daliniai išlydžiai ($10 \div 100$ pC) yra mažai pavojingi įrenginių izoliacijos darbui. Nuo pradinių dalinių išlydžių lygio priklauso izoliacijos senėjimo greitis. Rekomenduojamas pradinių dalinių išlydžių krūvis alyvos ir popieriaus izoliacijai yra iki 10 pC (skystai) ir iki 50 pC (kietai). kritinis dalinių išlydžių lygis per 1000 pC. Viršijus kritinį dalinių išlydžių krūvį, izoliacijoje prasideda intensyvūs irimo procesai. Dalinių išlydžių krūvis, nuo 1000 iki 10000 pC veikiantis izoliaciją, per kelias dešimtis valandų gali žymiai apgadinti kietąją izoliacijos komponentą, palikdamas jame degimo pėdsakus. $DI 10^{-7} \div 10^6$ C dydžio krūvis uždega elektrinį lanką izoliacijoje. Tokie

dalinių išlydžių lygiai neleistini nei bandant izoliaciją paaukštintąja įtampa, nei esant trumpalaikiams viršįtampiams. Bandant įrenginių izoliaciją paaukštintąja įtampa rekomenduojama, kad didžiausias dalinių išlydžių lygis aukštosios įtampos izoliacijoje būtų mažesnis už 3000 pC. Pasiekus 10-6 pC išlydžių lygį izoliacija yra pramušama.

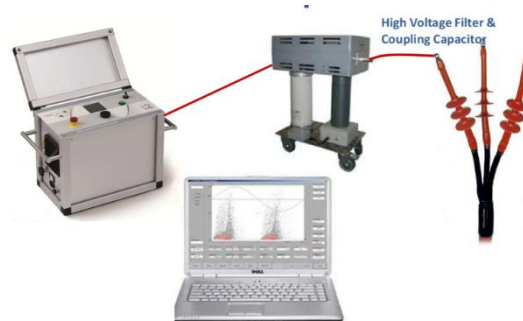
Dalinių išlydžių matavimas ir jų šaltinių nustatymas leidžia žymiai pagerinti kabelio izoliacijos diagnostikos tikslumą, nustatyti izoliacijos defektines vietas. Dalinių išlydžių matavimo metodas savo ruožtu užtikrina informacijos patikimumą apie kabelio montavimo klaidas arba kurios nors izoliacijos dalies elektrinių savybių pasikeitimus, kurie dar nesukėlė gedimo.

Dalinių išlydžių charakteristikos priklauso nuo tipo, ilgio ir defekto vietos, izoliacinės medžiagos, veikiančios įtampos, kabelių temperatūros; laikui bėgant jos nėra stabilios (1.1.1.1 pav.).



1.1.1.1 pav. Daliniai išlydžiai kabeliuose su įmirkyto popieriaus (a) ir XLPE (b) izoliacija

Bandymo metodo esmė remiasi aukštos įtampos padavimu į kabelių liniją (1.1.1.2 pav.) ir sukėlimo joje kelioms milisekundėms kintamosios gėstančios įtampos (DAC), kuriai veikiant kabelių linijos defektų vietose ir izoliacijos ertmėse užsidega daliniai išlydžiai.



1.1.1.2 pav. Dalinių išlydžių nustatymo sistemos pavyzdys [1]

Toliau, pagal ar iš anksto išmatuota kabelių linijos ilgį ir vadovaujantis tam tikru elektromagnetinio impulso sklidimo greičiu, reflektometrijos metodu nustatoma lokalių dalinių išlydžių susitelkimo vieta.

Diagnostikos rezultatams apibendrinti sudaromas dalinių išlydžių pasiskirstymo žemėlapis (1.1.2.3 pav.), kurio pagalba nustatomas paslėptų defektų, išilgai kabelių liniją, buvimas ar nebuvimas ir atsiranda galimybė suskirstyti linijas pagal būklės kriterijus į "geras", "blogas" arba "kritines".

Kompiuterizuoti matavimo kompleksai ir sistemos siūlo du dalinių išlydžių matavimo algoritmus: laikinį ir skaitmeninį. Abu algoritmai remiasi kabelio leistinosiomis dalinių išlydžių vertėmis, kurių perteklius registruojamas sistemoje.

Pagrindinis dalinių išlydžių pavojus siejamas su šiais veiksniais:

- nesugebėjimas juos nustatyti įprastiniu paaukštintos nuolatinės srovės įtampos bandymu;
- jų spartus augimas, pažeidžiantis izoliaciją, ir jo pasekmė – avarinė situacija kabelyje. [1].

1.1.2. Dalinių išlydžių diagnostika su slopstančiomis AC įtampomis

Siekiant sukelti slopstančiosios AC įtampa su kelių dešimčių AC įtampos ciklų trukme esant dažniams nuo 50 Hz iki 500 Hz, sukurta sistema, kuri yra paremta rezonansiniu kontūru tarp svyravimų ir bangų bandymo sistemos (angl. *Oscillating Wave Test System*; sutr. OWTS) įrenginio (OWTS įrenginio) kabelio talpos ir induktoriaus. Šis slopstančiosios kintamosios srovės (DAC) metodas darbo vietoje pasitaikantiems daliniams išlydžiams galios kabeliuose sukelti (pagal IEC 60060-3, IEEE 400 ir IEEE 400.3), matuoti ir fiksuoti atitinka IEC 60270 rekomendacijas ir yra visame pasaulyje naudojamas praktikoje dešimt metų. 1.1.2.1 paveiksle pateikta OWTS schema, o 1.1.2.2 paveiksle parodytas su OWTS M28 atliekamas matavimas darbo vietoje.

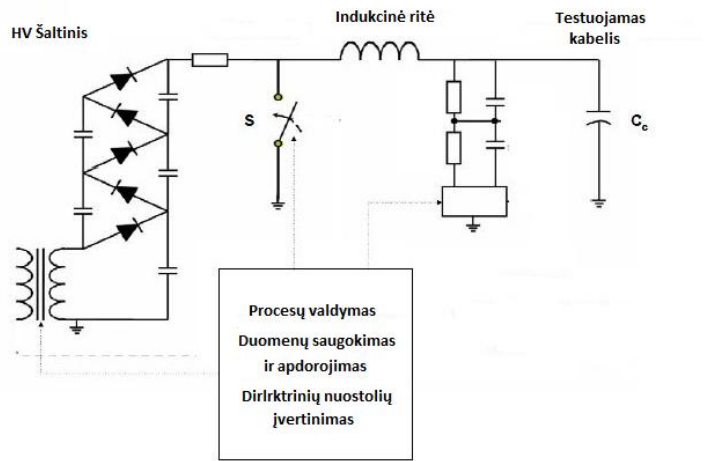
Dėl rezonanso principo PD bandymas atliekamas paliekant kabelį su įtampos forma, artima darbinei įtampai. Todėl su OWTS gauti PD rezultatai yra palyginami su 50 Hz situacija. Dėl neilgai egzistuojančios įtampos šis metodas yra neardomas. Dėl integruoto automatinio juostos pločio pritaikymo trumpų ir ilgų kabelių signalo aptikimas ir PD gedimo fiksavimas yra labai tikslūs.

Veikimo principas yra toks: bandomasis kabelis yra įkraunamas per kelias sekundes nuolat didinant įtampą iki pageidaujamo dydžio, pvz., U_0 . Tada specialus tiristorinis jungiklis užsidaro, todėl tarp OWTS įrenginio kabelio talpos ir induktoriaus yra sukurtas rezonansinis kontūras. Taip gauta lėtai slopstančioji AC įtampa. Veikiant DAC įtampai, PD matuojami ir išsaugoti tolesnei analizei.

DAC įtampos dažnis priklauso nuo kabelio talpos ir gali būti atskaičiuojamas pagal:

$$f_{DAC} = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C_{kabel}}} \quad (1)$$

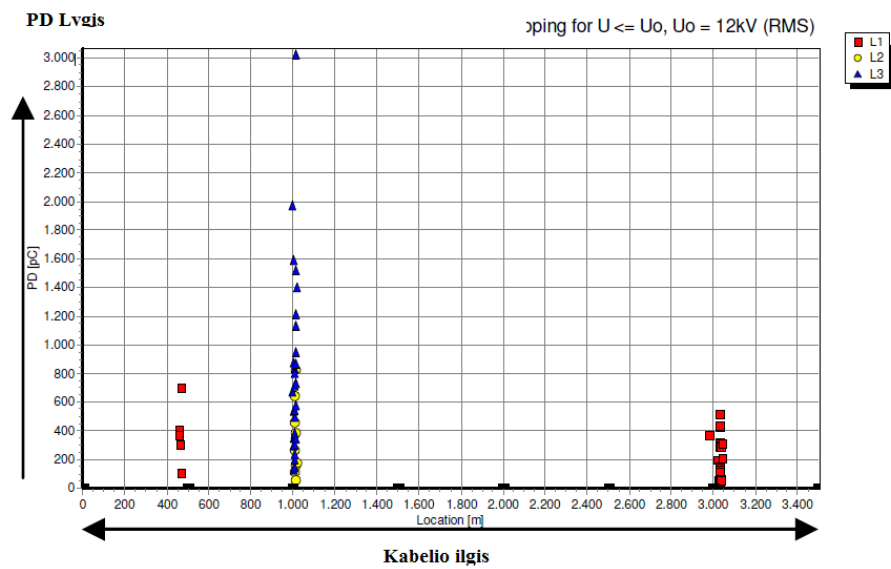
Kur L yra fiksuotas



1.1.1.1 pav. OWTS įrenginio schema.



1.1.2.2 pav. OWTS M28 įrenginys: maks. įtampa 28 kV, svoris 55 kg, valdomas iš kompiuterio per WLAN arba internetą.



1.1.2.3 pav. PD atvaizdavimas esant U_0 , 3,5 km ilgio 20 kV kabelio, su PD koncentracijomis esant 500 m, 1000 m ir 3000 m atstumui.



1.1.2.4 pav. Didžiuliai PD pėdsakai 2 metų senumo XLPE kabelio sandūroje esant 3000 m atstumui dėl prastos gamybos kokybės.

1.1.2.1 ir 1.1.2.2 paveiksluose pateiktas praktinis pavyzdys apie OWTS įrenginiu atliktą 2013 metais sumontuoto 20kV XLPE kabelio matavimą, o 1.1.2.3 paveiksle pateiktas tolesnis PD atvaizdavimas esant U_0 , kuris bus gautas atlikus TDR signalų analizę. Normaliomis eksploatacijos sąlygomis XLPE kabeliuose ir jų movose neturėtų būti jokio PD, šiuo atveju sandūrose yra trys PD koncentracijos. 1.1.2.4 paveiksle parodytos dvi nuotraukos su viena iš tų sandūrų; galima matyti didžiulius PD pėdsakus, kurie beveik aprėpė laidą su ekranu.

1.2. INTEGRALINĖ DIAGNOSTIKA

Kabelių (XLPE/ PILC) integralinis senėjimas keičia izoliacijos morfologines savybes, veikiančias dielektrinį atsaką, kuris gali būti nustatomas analizuojant poliarizacijos spektro charakteringą diapazoną. Integralinių matavimų atveju galima taikyti kelis skirtingus laiku paremtus metodus; du metodai yra IRC metodas (izoterminės relaksacijos grandinės metodas) ir RVM metodas (grįžtamosios įtampos matavimo metodas).

Vienas žinomas kabelių su polietileno izoliacija senėjimo reiškinys yra vandens medžių augimas. Veikiant vandeniui, temperatūrai ir elektrinio lauko stipriui, šie medžiai blogina izoliaciją. Šių mikroskopinių struktūrų ilgis didėja atsižvelgiant į eksploatacijos trukmę. Dėl tolesnės konversijos į elektros medį gali įvykti kabelio segmento permušimas ir gedimas.

Kabeliuose su popieriaus izoliacija ir švino apvaskalu dėl senėjimo efektu paremtų švino apvaskalo korozijos, alyvos nuotėkio ir celiuliozės grandinių skaidymosi drėgmės kiekis izoliacijoje didėja. Dėl drėgmės kiekio mažėja liktinis pramušimo stipris, kol likęs dydis priartėja prie vardinės darbinės įtampos ir kabelio eksploatavimas tampa rizikingas. Siekiant aptikti vandens medžius XLPE atveju ir drėgmės kiekį PILC atveju esant ankstyvai stadijai ir užkirsti kelią kabelių gedimams, galima taikyti integralinę diagnostiką.

1.2.1. Dielektrinių nuostolių $\tan \delta$ matavimas

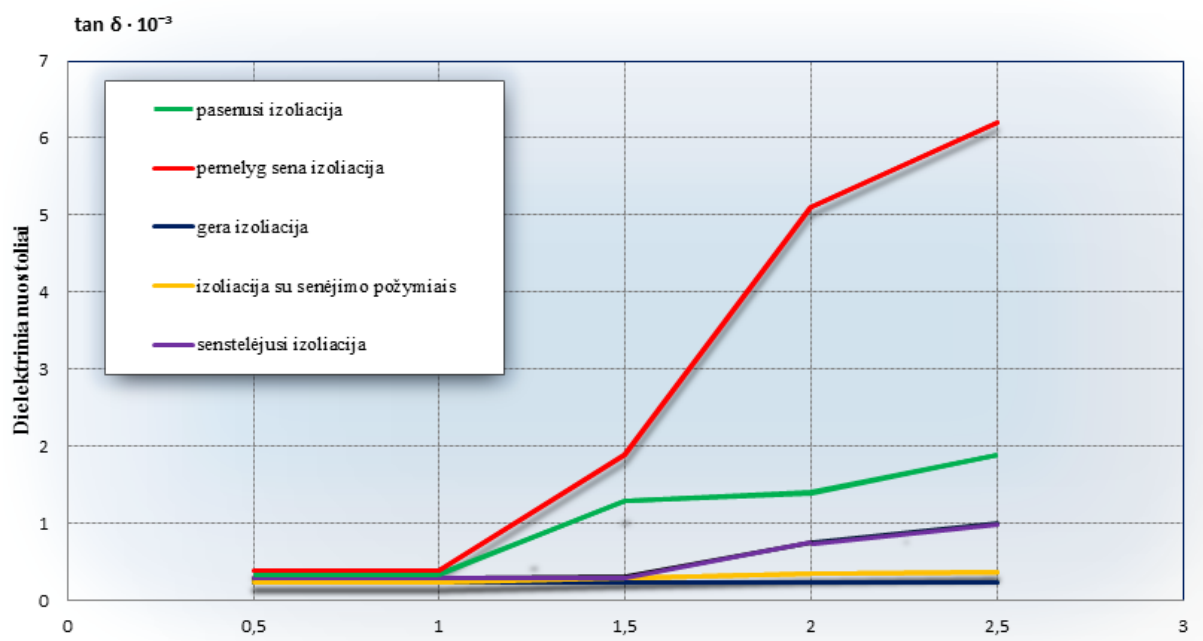
Integralinis metodas izoliacijos būklei įvertinti yra dielektrinių nuostolių matavimas. Dielektrinei nuostoliai ($\tan \delta$) yra suma kelių nuostolių:

- laidumo nuostolių laisvo krūvio pernašomis: jonais arba elektronais;
- poliarizacijos nuostolių;
- jonizacijos nuostolių per PD;
- vidinio paviršiaus nuostolių.

Matuojant $\tan \delta$ kaip įtampos funkciją, svarbūs du parametrai: absoliutus dydis ir atverčiamas dydis $\tan \delta$ arba $\Delta \tan \delta$ ($\tan \delta$ esant $2U_0$ - $\tan \delta$ esant U_0), kur pastarasis yra dažniausiai taikomas, nes jis nepriklauso nuo sandūrų tipo ir temperatūros.

Dielektrinės izoliacijos savybės nustatomos matuojant dielektrinius nuostolius, kurie susidaro dėl izoliacinių medžiagų poliarizacijos. Izoliacijos būklei įvertinti naudojamas $\tan \delta$ parametras – dielektrinių nuostolių kampas. Dielektrinių nuostolių kampas praktiškai nepriklauso nuo izoliacinės konstrukcijos parametru, tačiau priklauso nuo drėgmės kiekio izoliacijoje, skystosios terpės cheminių savybių pasikeitimo laike bei matavimo priemonių paklaidų.

Diagnostika $\tan \delta$ matavimu apibūdina tiek kabelių su XLPE izoliacija, tiek kabelių su popieriaus įmirkyta izoliacija senėjimo charakteristiką. Galima išskirti naujus, nestipriai ir labai pažeistus kabelius (1.2.1.1 pav.)

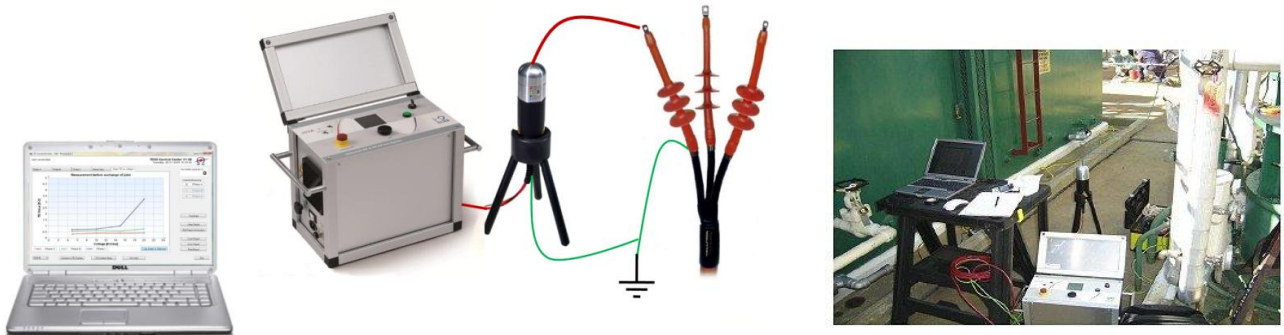


1.2.1.1 pav. Kabelinių linijų būklės rūšiavimas pagal izoliacijos dielektrinių charakteristikų lygį

Kabelio su XLPE izoliacijos būklė laikoma gera, jeigu $\text{tg} \delta (2U_0) < 0,12\%$ arba/ir $[\tan \delta (2U_0) - \text{tg} \delta (U_0) < 0,6\%]$.

Dielektrinių nuostolių $\tan \delta$ matavimas leidžia

- išskirti labiausiai problematiškus kabelius, kuriems reikalingas padidintas dėmesys;
- sukurti optimalią įmonių kabelių ūkio pertvarkos strategiją.



1.2.1.2 pav. Viena iš galimų $\tan \delta$ matavimo sistemų. Galima matuoti ne tik $\tan \delta$, bet ir izoliacinės konstrukcijos talpą.[1]

Dielektrinių nuostolių $\tan \delta$ reikšmės taip pat įtakoja lokalių dalinių išlydžių kabelyje intensyvumas. Be to, pastebima ryškesnė $\tan \delta$ priklausomybė nuo įtampos. Todėl, gavus išmatuoto $\tan \delta$ kampo neigiamus rezultatus, dar negalima konstatuoti kabelio netinkamumo tolimesnei eksploatacijai. Šis metodas leidžia greitai ir be neigiamo poveikio kabeliui gauti bendrą izoliacijos būklės vaizdą ir toliau kontroliuoti probleminius kabelius.

Atliekant dielektrinių nuostolių $\tan \delta$ matavimą, galime išskirti labiausiai probleminius kabelius, kuriems reikalingas padidintas dėmesys, taip pat matavimo reikšmės įtakoja lokalių dalinių išlydžių kabelyje intensyvumą. Be to, pastebima ryškesnė $\tan \delta$ priklausomybė nuo įtampos. Tačiau šis metodas nėra patikimas t.y. juo mes gauname bendrą izoliacijos būklę ir galime tęsti probleminio kabelio kontroliavimą, tačiau negalime patvirtinti remiantis vien tik šiuo metodu, kad kabelis netinkamas toliau eksploatuoti. [1]

1.2.2. Kabelių izoliacijos diagnostika grįžtamosios įtampos metodu

Transformatoriams naudojamų kabelių ir kitos aukštų aukštos įtampos įrenginių izoliacijos komponentų būklės diagnostika tampa vis svarbesnė. Vienas iš pakankamai gerų metodų tokiai informacijai gauti yra grįžtamosios įtampos matavimas. Matavimui atlikti skirtas eksperimentas vykdomas tokia tvarka: nuolatinės srovės (DC) įtampa yra panaudojama t_p laiko tarpą, sudaromas trumpasis jungimas t_d laiko tarpui, ir matuojama įtampa tarp išorės elektrodų,

pašalinus trumpąjį jungimą. Dažniausiai naudojami grįžtamosios įtampos kreivių parametrai: pikinė įtampa U_m , pikinės įtampos laikas t_m ir kreivės pradinis nuolydis s .

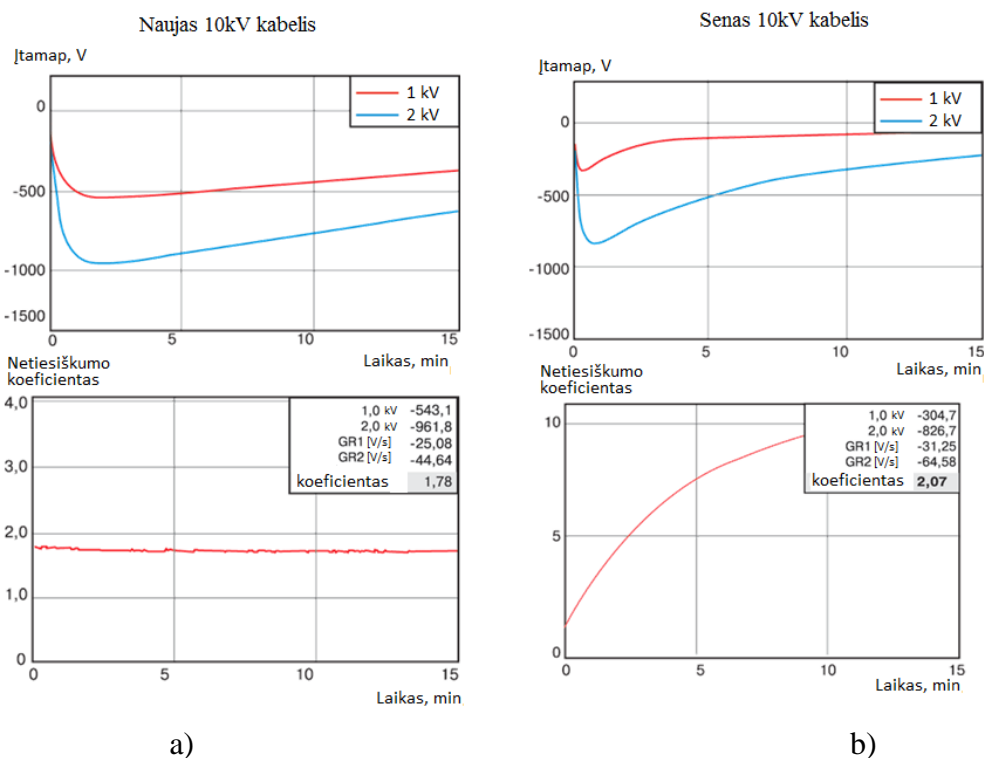
Matavimo principas žinomas jau nuo seno [20-22] ir pateikia patikimus duomenis, bet ne visada suteikia galimybę patikimai juos interpretuoti. Be to, grįžtamosios įtampos matavimas yra mažiau jautrus išorės triukšmą sukeliams trukdžiams – tai yra palanki savybė atliekant matavimus tokio stiprumo srityje. Gaunama informacija yra panaši į informaciją, kurią paprastai gauna taikant kitus dielektrinius metodus, pavyzdžiui, matuojant poliarizacijos ir depoliarizacijos sroves [23, 24].

Gamintojai paprastai naudoja vieną iš dviejų grįžtamosios įtampos matavimo būdų: vienas numato skirtingai ilgus poliarizacijos ir trumpojo jungimo laikus [25, 26], o kitas – ilgą poliarizacijos laiką ir trumpą (2 sek.) trumpojo jungimo laiką [27]. Duomenų interpretavimas taip pat skiriasi ir, deja, nėra orientuotas į tikruosius fizikinius parametrus.

Grįžtamosios įtampos diagnostikos įrenginys CD31 naudoja ilgus poliarizacijos ir trumpojo jungimo laikus, o CDS įrenginys, naudoja ilgą poliarizacijos laiką ir trumpą trumpojo jungimo laiką.

Grįžtamosios įtampos matavimo sistema CD31

Naudojant CD31 izoliacijos senėjimo lygis nustatomas pagal maksimalios grįžtamosios įtampos dydį, įtampos kitimo pagreitį ir netiesiškumo koeficientą (išmatuotų verčių santykis prie įvairių įkraunamos įtampos dydžių). Kabelio izoliacijos drėgnumo laipsnis nustatomas pagal įkraunamos srovės dydį (pastovi reikšmė) charakterizuojantį izoliacijos laidumą.



1.2.2.1 pav. CD31 sistema matuotų skirtingo būklės grįžtamosios įtampos kreivės [19]

Matuojant su sistema CD31 pastebėta, kad nepasenusių kabelių izoliacija turi nežymią poliarizaciją, atitinkamai ir mažą grįžtamosios įtampos pagreitį. Naujuose kabeliuose grįžtamosios įtampos pagreitis prie įkraunamos įtampos 1-2kV neviršija 5 ir 10 V/s. (1.2.2.1 a pav.).

Ilgą laiką eksploatuojamiems kabeliams (>30 - 40 metų) grįžtamosios įtampos pagreičio dydis senoje izoliacijoje gali viršyti 10 - 15 kartų palyginus su nauja popierine izoliacija.

Apie bandomojo kabelio izoliacijos būklę galima spręsti iš netiesiškumo koeficiento (žr. 1.2.2.1 pav.). Senų kabelių popierinei izoliacijai būdingas žymūs netiesiškumo koeficiento pokytis priklausantis nuo grįžtamosios įtampos pagreičio.

Eksploatacijos metu įvertinant kabelio izoliacijos būseną ir senėjimo laipsnį, panaudojant CD 31 davinius, reikšmingai padeda įvairių kabelių ir markių prie įvairių eksploatavimo sąlygų matavimų rezultatų kaupimas.

Tobulinant grįžtamosios įtampos metodą tikslinga nustatyti koreliaciją tarp senėjimo laipsnio (likusio resurso) ir izoliacijos išmatuotomis charakteristikomis. Bus galima gauti kokybiškus rezultatus nustatant kabelių izoliacijos likusį darbo resursą pagal įkrovos srovės ir grįžtamos įtampos matavimo rezultatus eksploatacijos metu.

Diagnostikos sistema CD31 susideda iš:

- aukštos įtampos bloko;
- valdymo bloko;
- aukštos įtampos kabelių.

Tam kad būtų patogiau valdyti diagnostikos procesus, sistema turi būti prijungta prie kompiuterio.

Sistema CD31 turi šiuos privalumus:

- galimybė atlikti bandymus visose fazėse iškart;
- nežymus rezultatų iškraipymas palyginus su kitomis sistemomis;
- paprastas kabelio prijungimas.

Sistemos CD31 trūkumas:

- sistema gali įvertinti izoliaciją visame kabelyje, bet negali to padaryti atskirose jo dalyse.

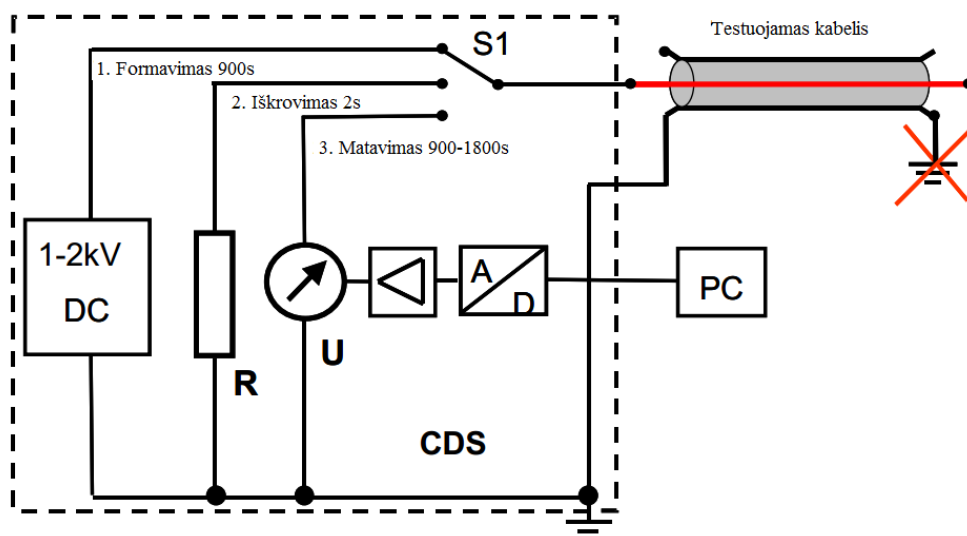
Grįžtamosios įtampos matavimo sistema CDS

Kabelių (XLPE/ PILC) integralinis senėjimas keičia izoliacijos morfologines savybes, veikiančias dielektrinį atsaką, kuris gali būti nustatomas analizuojant poliarizacijos spektro charakteringą diapazoną. Integralinių matavimų atveju galima taikyti kelis skirtingus laiku

paremtus metodus; du metodai yra IRC metodas (izoterminės relaksacijos grandinės metodas) ir RVM metodas (grįžtamosios įtampos matavimo metodas), kurie abu yra sujungti į vieną sistemą – CDS (kabelių diagnostikos sistemą).

Programinės įrangos valdomais konfigūravimo jungikliais CDS nustatomas IRC arba RVM matavimams. Žemas ominis IRC matavimas optimizuojamas eksponentiškai slopstančioms grandinėms iš poliarizuoto PE/XLPE dielektriko. Įtampos matavimui (RVM analizei) būtinas aukštas ominis grandinės matavimas reikalingiems dydžiams nustatyti. 1.2.2.2 paveiksle parodyta CDS ir matavimo principas [9].

Mišri sistema, dėl mažos įkraunamos įtampos, neturi įtakos kabelio izoliacijai ir movai. Sistemoje įdiegtas automatinis matavimo procesas. Įdiegta programa įtraukia kabelių konstrukcijos ypatumus ir klasifikuoja diagnozuojamo objekto būseną. CDS pagrindinės techninės charakteristikos: maksimali įtampa 5kV nuolatinės srovės, srovės matavimo ribos - 130 - +130 μ A, Pareikalaujamas galingumas – 50W.



1.2.2.2 pav. CDS ir matavimo principas charakteringiems senėjimo dydžiams per laiko intervalą nustatyti.

Visą matavimą sudaro trys etapai, kaip parodyta 1.2.2.2 paveiksle:

- formavimo etapas arba poliarizacijos etapas (šiuo etape kabelio izoliacija bus poliarizuojama naudojant 1 kV arba 2 kV DC įtampą kabelyje);
- iškvovimo etapas (šiuo etape kabelis bus iškrautas per rezistorių porai sekundžių siekiant atsikratyti aukšto dažnio talpinių srovių);
- matavimo etapas arba depoliarizacijos etapas (šiuo paskutiniame etape bus matuojamas dielektrinis atsakas, kuriuo remiantis bus nustatyta kabelio būklė).

IRC ir RVM yra pasaulyje pripažinti metodai, naudojami daugiau kaip 10 metų. Šie metodai išsamiai aprašyti [2, 5, 10-14].

RVM priklauso nuo ribinių dydžių, po matavimo bus nustatyti du faktoriai: Q_a faktorius ir p faktorius. Jie abu yra susiję su grįžtamosios įtampos netiesine elgsena palyginti su įkrovimo įtampos didėjimu ir matavimo kreivės forma.

Faktorius Q_a naudojamas siekiant nustatyti grįžtamosios įtampos pradinio nuolydžio netiesiškumą. Jis matuojamas esant dviem įkrovimo įtampoms, kurių santykis yra 2:1 (paprastai 1 kV ir 2 kV). Pradinių nuolydžių santykis yra 2,0 visiškai sauso kabelio atveju ir artėja prie 1,5 esant kuo aukštesniam drėgmės kiekiui izoliacijoje. Koeficiento Q_a empirinis vertinimas yra:

2.00 - 1.87 – sausa;

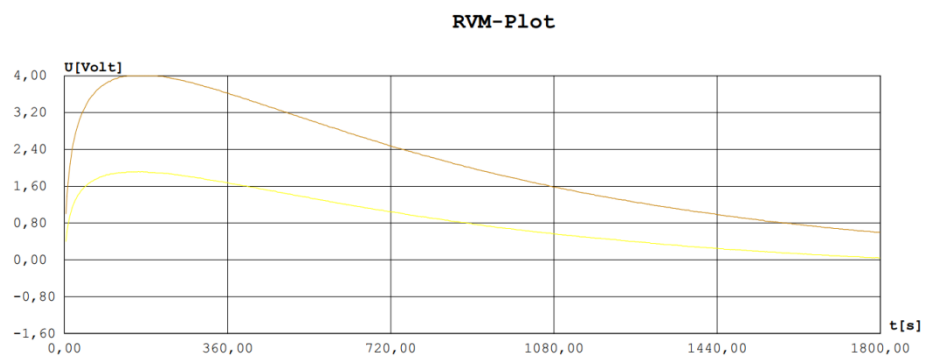
1.86 - 1.65 – drėgna;

< 1.65 – šlapia.

Kitas drėgmės kiekio PILC izoliacijoje vertinimo faktorius, kuris taip pat yra tiesiogiai susijęs su celiuliozės skaidymusi, yra vadinamasis p faktorius. Remiantis daugybe bandymų natūraliomis sąlygomis, įrodyta, kad jis gerai koreliuoja su senėjimu/drėgme. p faktoriaus apibrėžimas paremtas grįžtamosios įtampos kreivės forma, t.y. maksimaliu įtampos dydžiu U_m [V], laiku iki maksimalios įtampos t_p [s] ir pradiniu nuolydžiu s [V/s]. Jeigu kabelio izoliacija yra šlapia, faktorius p yra daugiau kaip 0,2 [14].

$$Q_a = \frac{\frac{U}{s}(2kV)}{\frac{U}{s}(1kV)}; \quad (2)$$

$$p = \frac{U_m}{s \cdot t_p}; \quad (3)$$



1.2.2.3 pav. Sudrėkusio kabelio RVM lauko rezultatas, $0,1 < p < 0,2$ ir Q_a faktorius $1,65 < Q_a < 1,86$.

Kabelių bandymo rezultatas, naudojant CDS sistemą, yra matavimo protokolas ir kiekvienos kabelio fazės grįžtamosios įtampos analizė, kurią sistema parodo automatiškai.

Sistemos CDS diagnostikos rezultatai parodė, kad kabeliai su popierine izoliacija jautresni senėjimo procesams, atsiranda didėjantis grįžtamosios įtampos pagreitis.

Diagnostinės informacijos perkėlimas į būklės vertinimo indeksus

Apžvelgus visą aktualią informaciją apie MV komponentus, diagnostika atliekama siekiant įvertinti kiekvienos rūšies komponento būklę (1.2.2.1 lentelė). Interpretavimas paremtas kiekvienos diagnostikos, kuri yra tinkama parodyti arba fiksuoti faktinę izoliacijos būklę, kriterijais. Visi rezultatai kartu yra analizuojami skirtingais metodais [8, 17] ir naudojami komponento priskyrimui trims galimoms būklių kategorijoms, žr. 1.2.2.1 lentelę.

1.2.2.1 lentelė. Ryšio tarp techninių sąlygų, būkle paremto priežiūros indekso ir reikiamų priežiūros darbų pavyzdys

Būklė	Eksploatacijos trukmės būseną	Svarbūs parametrai	Būtinai atlikti veiksmai
Nepastebėta jokių defektų ar senėjimo simptomų	Naujas arba senas	9	Nereikalingas joks ypatingas dėmesys, pvz., kita priežiūra po 5..10 metų
Pastebėtas tam tikras izoliacijos degradacijos laipsnis; nėra jokių kenksmingų defektų	Labai senas	6	Reikalingas ypatingas dėmesys, pvz., priežiūra po 1 metų
Pastebėta reikšminga izoliacijos degradacija ir yra rimtų defektų	Arti eksploatacijos termino pabaigos	1	Reikalinga priežiūra, pvz., remontas arba keitimas

Remiantis šia lentele, kuri yra sudaryta pasitelkus informaciją, pateikiama periodinės arba būkle paremtos patikros metu, MV kabelio ir komponentų faktinę būklę galima panaudoti planuojant reikalingus priežiūros darbus ir nustatant šio konkretaus turto patikimumą visoje tinklo konfigūracijoje.

Be diagnostikos metodais sukauptos informacijos, taip pat verta rinkti ir dalintis informacija apie stresą darbe, priežiūros patirtį, gedimus ir defektus, aptiktus sukauptame turte, ir informacija iš kitų šaltinių, tokių kaip laboratoriniai bandymai ir (arba) išleidžiamos medžiagos.

Sumontuotų MV galios kabelių bandymo/diagnostikos atlikimo darbo vietoje tikslai gali būti skirtingi. Ypač svarbūs šie tikslai:

- a) patikrinti, ar naujai sumontuotoje arba suremontuotoje grandinėje nėra gamybos kokybės problemų, kurios gali privesti prie lokalizuoto PD.
- b) įvertinti kabelių sistemos faktinę būklę, kaip turto valdymo programos dalį, pvz.:
 - palaikyti priežiūros ir keitimo valdymą.

Kaip matyti iš ankstesnės nuotraukos, darbo vietoje atliekama diagnostika gali suteikti vertingos informacijos apie faktinę izoliacijos degradaciją, t.y. izoliacijos defektinių vietų buvimas (daliniai išlydziai) ir vandens buvimas (IRC arba RVM metodas). Todėl, siekiant

palaikyti sprendimų dėl priežiūros ir keitimo procesą, šie diagnostiniai duomenys turi būti transformuojami į būklės indeksus, kaip 3 lentelėje nurodytame pavyzdyje.

1.2.2.2 lentelėje pateikti du matavimo IRC ir RVM metodais rezultatų transformavimo į būklės indeksus pavyzdžiai. Matyti, kad šie pavyzdžiai yra paprasti ir gali būti lengviau derinami su 1.2.2.1 lentele arba jos išplėsta versija (integruojantys poveikiai, tokie kaip VLF bandymai esant $3 U_0$, kai būklės indeksas yra 6, taip turėtų būti aptikti lokaliniai gedimai).

1.2.2.2 lentelė. Matavimo IRC ir RVM metodais transformavimo į būklės indeksus.

RVM Grįžtamosios įtampos metodas			
Matavimo rezultatas	$Q_a > 1,87$	$1,86 > Q_a > 1,65$	$Q_a < 1,65$
	$p < 0,1$	$0,2 > p > 0,1$	$p > 0,2$
Būklės indeksas	9	6	1
Būklės indekso vertinimas	sausas	drėgnas	šlapia
IRC Izoterminės relaksacijos grandinės metodas			
Matavimo rezultatas	"New" arba "Mid Life"	"Old"	"Critical"
Būklės indeksas	9	6	1
Būklės indekso vertinimas	naujas arba vidutinis	senas	kritinis

Remiantis dideliu kabelių segmentų, kurių senėjimas buvo įprastas, ir kabelių, kurių senėjimas buvo pagreitintas, matavimų darbo vietoje skaičiumi, buvo sukurta duomenų bazė, į kurią įeina visa svarbi informacija apie įvairius bandymų objektus. Todėl kabelių diagnostika yra įmanoma be jokių išankstinių bandomojo kabelio kontrolinių matavimų. Programinė įranga IRC skirsto schemą į vieną iš keturių senėjimo klasių: „Perfect“ („tobula“), „Mid Life“ („vidutinės trukmės“), „Old“ („sena“) ir „Critical“ („kritinė“). Kiekviena senėjimo klasė turi statistinę koreliaciją su daugelio kabelių elgsena žingsninio bandymo metu. Rezultatas – puikus pagrindas sprendimams dėl tolesnės konkretaus kabelio (arba segmento) eksploatacijos, atnaujinimo arba keitimo priimti.

1.3. KOMBINUOTOJI DIAGNOSTIKA

Kadangi vandens medžiai ir padidėjęs drėgmės kiekis PILC kabeliuose nesukelia išlydžių, šio tipo senėjimo reiškinių negalima išmatuoti lokalių diagnostikos matavimais. Bet kadangi šie reiškiniai izoliacijai nesudaro rimtos grėsmės, tai rodo integralinės diagnostikos metodų būtinybę ir įrodo, kad tokiu būdu integralinės ir lokalinės diagnostikos metodai yra papildantys vienas kitą.

Siekiant pateisinti elektros perdavimo įmonių lūkesčius dėl būklės vertinimo, renkantis tinkamą diagnostikos metodą darbo vietoje atliekamam būklės vertinimui, reikėtų atsižvelgti į

keletą aspektų. Apskritai, dėl pasitaikančių gedimų movose, tinkamas sprendimas yra lokalus metodas. Nukenčiant nuo gedimų izoliacijoje, tinkamas sprendimas bus integralinis metodas. 1.3.1 lentelėje pateikta tinkamo diagnostikos sprendimo pasirinkimo su jo sprendimų priėmimo kriterijų apžvalga.

1.3.1 lentelė. Darbo vietoje atliekamos diagnostikos metodų charakterizavimas atsižvelgiant į jos sprendimų priėmimo kriterijus

Būklės vertinimas	Diagnostikos rūšis	Svarbūs parametrai
Defektinės vietos	PD diagnostika	- PDIV/ PDEV
		- PD lygis esant U_0 ir $1,7 U_0$
		- PD vieta ir intensyvumas
Integralinė būklė	Dielektriniai nuostoliai ($\tan \delta$)	Absolūtus dydis esant $2 U_0$ arba atverčiamas dydis tarp $2 U_0$ ir $1 U_0$ kaip su IEEE [7]
	RVM	Q faktorius ir p faktorius (elgsena atsižvelgiant į tampą, formą ir laiką)
	IRC	IRC-A dydis (elgsena atsižvelgiant į esamąjį laiką)

Kabėlių linijos su XLPE izoliacija apvalkalo testai atliekami paaukštinta nuolatinės srovės įtampa, o izoliacijos pramušimo atveju atliekamas lokalinis pažeidimo vietos nustatymas.

Įvairių gamintojų yra specialiai sukurtos ypatingos įrangos sistemos, įgyvendinančios visą ciklą darbų testuojant kabelius ir kabelių apvalkalus, apytiksliai nustatančios pažeistas vietas ir tiksliai nustatančios apvalkalų defektų vietas naudojant žingsnio įtampos metodą (automatinis režimas).

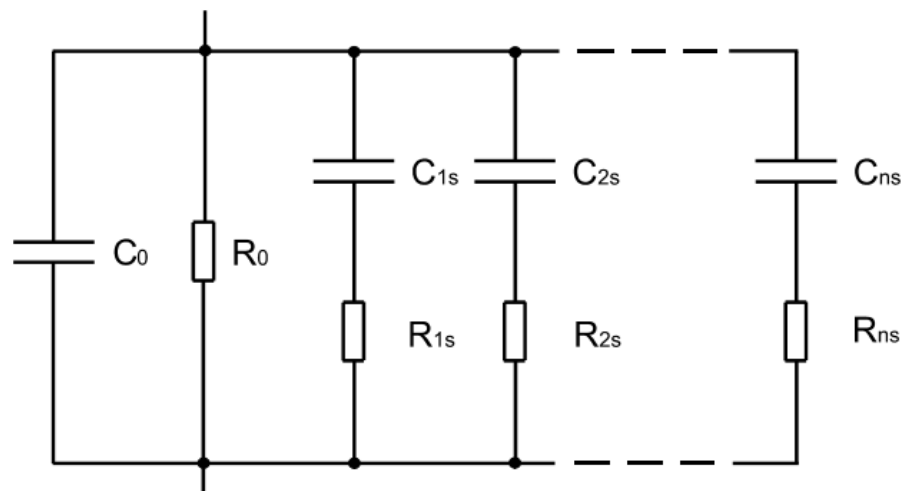
2. GRĮŽTAMOSIOS ĮTAMPOS PROCESAI IR DIAGNOSTINIAI PARAMETRAI

Poliarizacijos procesai dielektrike yra gerai ištirti, o praeityje ypač gerai išnagrinėtos molekulinės poliarizacijos ir relaksacijos procesų laiko priklausomybės. Molekuliniai poliarizacijos procesai vyksta labai greitai ir matuojami žymiai smulkesniais laiko mato vienetais nei sekundės, todėl nesitikima, kad tokie molekuliniai procesai turėtų žymios įtakos procesams, trunkantiems nuo dešimties iki kelių šimtų sekundžių ar daugiau – tokiems, kokie vyksta vykdant komercinės galios įrangos grįžtamosios įtampos matavimus.

Pavyzdžių su pakankamai stora homogeniškos medžiagos izoliacija ir pakankamai žemu laidumo rodikliu (dažniausiai – organiniai polimerai) didelio srovės stiprumo srityje (nuo kelių dešimčių kV/mm iki daugiau nei 100 kV/mm) atveju galima matyti, kad laiko diapazone nuo kelių minučių iki net kelių valandų galima aptikti nuo laiko priklausomas sroves. Pagrindinė priežastis – erdvinio krūvio susidarymas ir mažėjimas atitinkamame tūryje (dėl krūvininko vietinio pagavimo ir paleidimo procesų), turintys įtakos vietos lauko pasiskirstymui ir, atitinkamai, galintys sukelti srovę ir trumpojo jungimo sąlygomis [35].

Formalioji ekvivalentinė grandinė

Grįžtamosios įtampos kreivių ar poliarizacijos ir depoliarizacijos srovių analizė per tam tikrą laiko tarpą, dažnai atliekama skaitinė aproksimacija ekvivalentinių grandinių pagrindu (ekvivalentines grandines sudaro trys ar daugiau skirtingų lygiagrečių laiko konstantų). Standartinė RC sujungimų grandinė pavaizduota 2.1 pav. Ši ekvivalentinė grandinė fizikiniu požiūriu yra tinkama aprašyti izoliacijos medžiagą, kurios sudėtyje yra molekulių su skirtingomis poliarizacijos galimybėmis. Kitų procesų atveju, pavyzdžiui, erdvinio krūvio susidarymas ar ribinės poliarizacijos procesai, tokia ekvivalentinė grandinė tėra matematinės aproksimacijos įrankis.



2.1 pav. Dažniausiai naudojama dielektriko ekvivalentinė grandinė poliarizacijos procesams aprašyti [23]

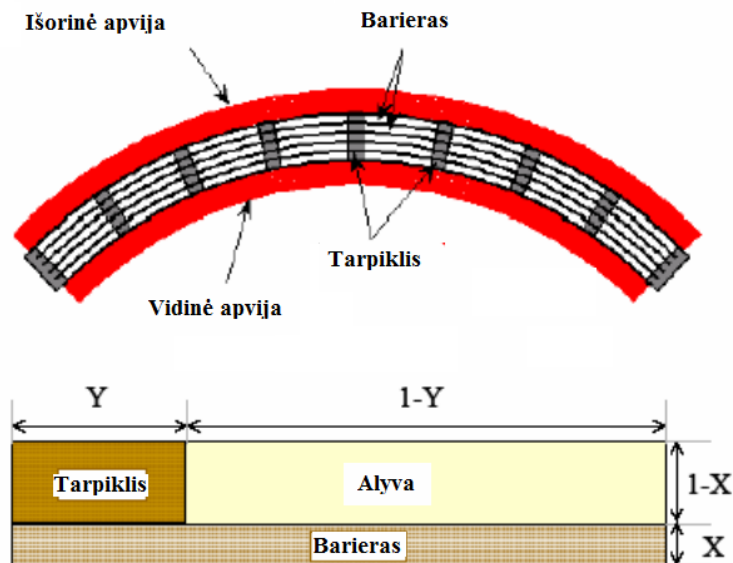
Toliau bus aptarti keli pagrindiniai faktai, susiję su įvairių rūšių daugiasluoksne izoliacija, ir jų įtaką duomenų interpretavimui.

2.1.RIBINĖ POLIARIZACIJA

Klasikinės galios įrangos, pavyzdžiui, alyva užpildytų kabelių ar galios transformatorių izoliaciją sudaro skirtingos dielektrinės medžiagos, pasižyminčios skirtingomis savybėmis. Dėl to per trumpą laiko tarpą vykstančių molekulinėse medžiagose procesų metu, atsiranda ribinės polimerizacijos reiškiniai, kai ties ribomis tarp skirtingų dielektrikų kaupiasi laisvieji krūvininkai.

Dielektriko būklės susijusių aukštos įtampos transformatoriuje tinkamai apibūrina XY modelis [36, 37], aprašantis skirtingų izoliacijoje naudojamų dielektrinių medžiagų skirtingas geometrijas. Potencialų skirtumas tarp aukštos įtampos ir transformatoriaus žemintų dalių išlyginamas skirtingomis dielektrinėmis medžiagomis, tokiu būdu pasiekiant įtampos pasiskirstymą, kuris priklauso nuo srovės talpinių ir ominių sudedamųjų.

Kabelio su alyvos-popierius izoliacija geometrinė situacija ne tokia sudėtinga, nes celiuliozės ir alyvos mišinyje yra tik viena dielektriko rūšis, ir nėra jokių atskirų sričių, kurias sudarytų vien alyva.



2.1.1 pav. Transformatoriaus izoliacijos atkarpa ir transformatoriaus izoliacijos su alyvos-popieriniu dielektriku XY modelis [36]

2.2.DIELEKTRINĖ ELGSENA

Vykstant kabelio įkrovimui skirtingų sluoksnių izoliacijoje krūvininkai juda skirtingų dielektrikų viduje, o jų dalis kaupiasi tarp sluoksnių, kur jie sukuria vietinius elektrinius laukus, būtinus pagal tolydumo lygtį, taikomą srovės tankiui. Šiuo laiko intervalu susidaro srovė, kurios

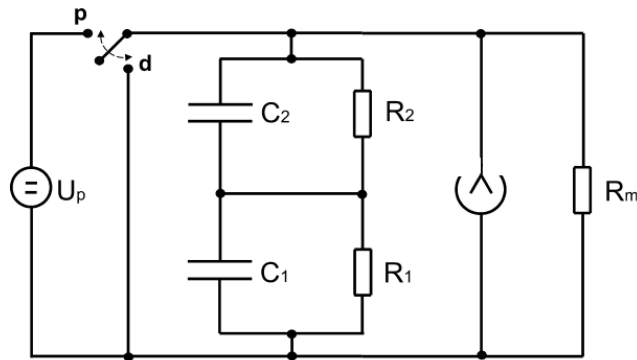
laiko priklausomybė primena Kiuri – Von Šveidlerio dėsnį [32]. Tam tikrais atvejais atsiranda sanklotinė srovė be laiko priklausomybės.

Pašalinus poliarizuojančią įtampą, trumpojo jungimo metu krūvininkai yra išlaisvinami prie išorės elektrodų, ir vietoje susikaupę krūvininkai juda dielektrinių medžiagų viduje, sukeldami iškrovos srovę.

Pašalinus trumpąjį jungimą, ši srovė sukuria įtampos skirtumą tarp dviejų išorės elektrodų, kuris pirma padidėja, viršija didžiausiąją vertę, o po to vėl mažėja, tokiu būdu sukurdamas grįžtamosios įtampos kreivę. Nenustatyta, kad eksperimentiniu būdu aptikta elgsena grįžtamosios įtampos matavimo metu būtų priklausoma nuo vienokio ar kitokio molekulinės poliarizacijos ar depoliarizacijos proceso. Tai reiškia, kad galima kelti klausimą dėl 1 pav. pavaizduotos ekvivalentinės grandinės taikymo tikslingumo, kai yra aišku, kad bet kuri kreivė, esant aprašytai laiko priklausomybei, gali būti pritaikyta tokiai ekvivalentinei grandinei. Visgi, lieka klausimas, ar aproksimuoti koeficientai turi tikrąją fizikinę reikšmę.

2.3.MAKSVELO MODELIS

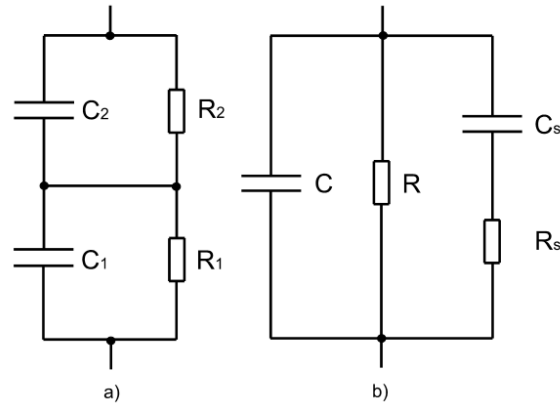
Ribinės poliarizacijos procesas yra svarbus galios įrangai su alyvos-popieriaus izoliacija. Čia aktualesnė kita ekvivalentinė grandinė, kur, pagal Maksvelo modelį, nuosekliai sujungtos dvi RC lygiagrečios grandinės, nes ji labai panašiai atkuria tikrąją fizikinę situaciją. 2.3.1 pav. vaizduojama bazinė ekvivalentinė grandinė. Ši grandinė gerai atitinka 2.3.2 pav. pavaizduotą modelį, aptartą darbuose, susijusiuose su transformatoriais [26].



2.3.1 pav. Alyvos-popieriaus dielektriko ekvivalentinė grandinė ir bazinė matavimo grandinė [30]

Dviejų RC lygiagrečių elementų laiko konstantos $\tau_2 = R_2 C_2$ ir $\tau_1 = R_1 C_1$ atitinka dviejų dielektrikų – celiuliozės ir alyvos – laiko konstantas, o R_m yra matavimo grandinės varža, ir iš to atsiranda modelio fizikinis aktualumas.

Grynai formalaus apibrėžimo tikslais galima ir ekvivalentinė grandinė su RC nuosekliai sujungtais elementais [30]. 2.3.2 pav. pavaizduotos šios dvi atitinkamos grandinės.



2.3.2 pav. Koreliacija tarp dviejų bazinių ekvivalentinių grandinių alyvos-popieriaus dielektriko atveju: a) Maksvelo grandinė ir b) atitinkama formalioji ekvivalentinė grandinė [30].

Maksvelo modelyje 2.3.2b) pav. esančių elementų skaitinės vertės koreliuoja su RC lygiagrečiai sujungtais elementais, bet netenkama fizikinės prasminės. Formaliosios ekvivalentinės grandinės

skaitinėms vertėms nustatyti surandame:

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}; \quad (4)$$

$$R = R_1 + R_2; \quad (5)$$

$$C_s = \frac{(R_2 \cdot C_2 - R_1 \cdot C_1)^2}{(R_1 + R_2)^2 \cdot (C_1 + C_2)}; \quad (6)$$

$$R_s = \frac{R_1 \cdot R_2 (R_1 + R_2) (C_1 + C_2)^2}{(R_2 + C_2 - R_1 C_1)^2}; \quad (7)$$

$$\tau_s = \frac{R_1 R_2 (C_1 + C_2)}{R_1 + R_2}; \quad (8)$$

Verta paminėti, kad tikimybė, jog gauti duomenys formaliai atitiks 2.3.2b) pav. pavaizduotą grandinę nereiškia, kad apibrėžimas tiesiogiai atspindi tikrąjį fizikinį procesą. 4a) pav. pavaizduotos grandinės laiko konstantos τ_1 ir τ_2 atitinka abiejų dielektrikų fizikinio dielektriko laiko konstantas. Kalbant apie skirtingas dielektrines medžiagas – popierių ir alyvą – tiesioginio fizikinio atitikimo tarp elementų R_s , C_s ir τ_s RC nuosekliai sujungtoje grandinėje nėra, todėl būtų sunku daryti išvadas pagal jų skaitines vertes. RC nuosekliai sujungtų elementų ypač negalima naudoti izoliacinių medžiagų fizikiniu požiūriu aktualioms dielektriko laiko konstantoms τ_1 ir τ_2 skaičiuoti.

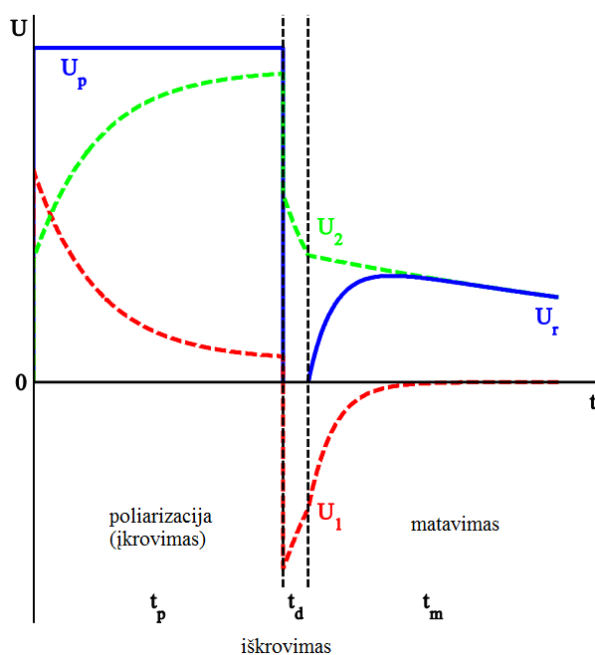
Kad skaičių atitikimo tikimybė būtų didesnė, paprastai naudojamos formaliosios ekvivalentinės grandinės su lygiagrečiai sujungtais trimis ar daugiau RC nuosekliųjų elementų. Fizikinio atitikimo atveju būtų dvi ar daugiau lygiagrečiai sujungtos Maksvelo grandinės, turinčios skirtingas laiko konstantas. Tai gali būti svarbu sudėtingesnei analizei aiškinant matavimus, atliktus tinklo grandinėse, kuriose naudojami skirtingi kabeliai ar jungtys, pasižyminčios skirtinga elgsena. Tokiu atveju lygiagrečių Maksvelo grandinių kondensatorių absoliutinės vertės nulemia laiko konstantų „vyraujančias“ vertes.

Skaitinės simuliacijos su dviem lygiagrečiai sujungtomis Maksvelo ekvivalentinėmis grandinėmis parodė galimybę simuliuoti eksperimentiniu būdu nustatytas grįžtamosios įtampos kreives parenkant atitinkamas grandinių elementų skaitines vertes.

Maksvelo ekvivalentinės grandinės vertinimas

Pirmasis grįžtamosios įtampos matavimo rezultatų analizės žingsnis gali būti atliekamas tik vieno Maksvelo modelio pagrindu. Pritaikius nuolatinės srovės (DC) įtampą, sistema paleidžiama talpiniu poliarizuojančios įtampos U_p paskirstymu į U_1 ir U_2 , kuris palaipsniui pasikeičia į varžinį pasiskirstymą pagal R_1 ir R_2 . Trumpojo jungimo metu du kondensatoriai keičiasi įkrovomis, kol įtampos tarp kondensatorių C_1 ir C_2 yra identiškos.

Trumpojo jungimo sąlygomis ši abiejų kondensatorių įtampa mažėja su laiko konstanta τ . Pašalinus trumpąjį jungimą, įtampa ties abiem kondensatoriais sumažėja nepriklausomai nuo laiko konstantų τ_1 ir τ_2 2.3.3 pav. vaizduojami įtampos pokyčiai per laiko tarpą skirtingais laiko intervalais grįžtamosios įtampos matavimo metu.



2.3.3 pav. Įtampa ties kondensatoriais C_1 ir C_2 poliarizacijos, trumpojo jungimo ir grįžtamosios įtampos matavimo metu, kai $\tau_1 < \tau_2$

Svarbus aspektas patikimai aiškinant išmatuotus duomenis yra diagnostikai naudojamų parametrų parinkimas. Jau minėta, kad diagnostikai paprastai parenkami tokie parametrai kaip grįžtamosios įtampos grandinės pradinis nuolydis s , maksimali grįžtamoji įtampa U_m ir šios maksimalios įtampos trukmė t_m arba šių parametrų priklausomybė nuo poliarizacijos įtampos U_p aukščio.

Empiriškai šie parametrai smarkiai varijuoja nesant „tiesioginei koreliacijai“, primenančiai monotonišką parametrų pokytį be senėjimo.

Vadovaujantis prielaida, kad įtampos matavimo sistemos varža R_m yra žymiai aukštesnė nei varžų R_1 ir R_2 , maksimalią grįžtamąją įtampą U_m , maksimalios grįžtamosios įtampos pradinį polinkį s ir laiką t_m nesunku paskaičiuoti analitiniu metodu [32]. 2.3.2 pav. pavaizduotai ekvivalentinei grandinei surandame:

$$U_r(t) = U_1(t) + U_2(t) = U_s \left(e^{-\frac{t}{\tau_2}} + e^{-\frac{t}{\tau_1}} \right); \quad (9)$$

$$\tau_1 = R_1 C_1, \quad \tau_2 = R_2 C_2, \quad \lambda = \tau_2 / \tau_1, \quad (10)$$

Jei R_m nėra žymiai didesnė nei R_1 ir R_2 , grįžtamosios įtampos kreivė taip pat yra dviejų eksponentinių funkcijų suma, bet, dėl dviejų RC elementų sujungimo per R_m , laiko konstantos τ_1 ir τ_2 skiriasi nuo $R_1 C_1$ ir $R_2 C_2$ verčių [38].

Dviejų kondensatorių įtampai po poliarizacijos laiko t_p ir trumpojo jungimo laiko t_d nustatome:

$$U_\tau = \frac{\lambda - 1}{1 + \lambda + \frac{R_2 + C_2}{R_1 + C_1}} U_F (1 - e^{-t_p/\tau}) e^{-t_d/\tau}; \quad (11)$$

$$\tau = \frac{\tau_2 R_1 + \tau_1 R_2}{R_1 + R_2}; \quad (12)$$

τ yra sistemos laiko konstanta, identiška τ_s 2.3.2b) pav. U_s akivaizdžiai sudėtinu principu priklauso nuo ekvivalentinės grandinės elementų, kuriuos lemia faktinė naudojamų izoliacijos medžiagų geometrija ir dielektrinės savybės.

Pradedant alyvos-popieriaus dielektrikuose vykstančių fizikinių senėjimo procesų, atsirandančių dėl cheminio irimo procesų, pradeda mažėti dielektriko laiko konstantos τ_1 ir τ_2 .

Ypač sumažėja τ_2 , celiuliozės laiko konstanta, dėl popieriaus irimo šalutinio produkto sukuriama vandens, kuris kaupiasi celiuliozėje.

Dėl to aiškiai sumažėja laidumas ir, atitinkamai, popieriaus dielektriko laiko konstanta τ_2 . Nedidelė vandens dalis bus praskiesta alyvoje, bet šis kiekis bus žymiai mažesnis nei vandens kiekis popieriuje. Apie pusiausvirąjį paskirstymą ir kitą informaciją skaitykite [31].

2.4. GRĮŽTAMOSIOS ĮTAMPOS DIAGNOSTINIAI PARAMETRAI

Klasikiniuose diagnostiniuose parametruose U_m ir s yra dedamoji U_s kaip faktorius ir santykio $\lambda = \tau_2/\tau_1$ funkcija. Maksimalios įtampos laikas t_p priklauso nuo τ_1 ir faktoriaus funkcijos $\lambda = \tau_2/\tau_1$.

$$U_m = U_s(\lambda^{1/(1-\tau)} - \lambda^{1/(1-\tau)}); \quad (13)$$

$$s = \frac{U_s}{\tau_1} \left(\frac{\lambda-1}{\lambda} \right); \quad (14)$$

$$t_p = \tau_1 \left(\frac{\lambda}{\lambda-1} \right) \ln \lambda; \quad (15)$$

Santykis U_m/s nepriklauso nuo U_s ir priklauso tik nuo τ_1 ir faktoriaus funkcijos $\lambda = \tau_2/\tau_1$. Todėl geometrijos poveikis diagnostiniams parametrams išnyksta.

$$\frac{U_m}{s} = \tau_1 \frac{\lambda}{\lambda-1} (\lambda^{1/(1-\tau)} - \lambda^{1/(1-\tau)}); \quad (16)$$

Be standartinių U_T per t atvejų, kuriais pirmą kartą dokumentuojamas matavimo rezultatas, grįžtamosios įtampos rezultatus galima efektyviau apibūdinti analizuojant priklausomybę tarp dviejų parametru: U_m/s ir t_p . Abejuose parametruose yra dedamoji τ_1 , ir jie priklauso tik nuo santykio $\lambda = \tau_2/\tau_1$. Santykį tarp šių dviejų parametru galima naudoti kaip naują parametru p [33].

p faktorius, apibrėžiamas kaip

$$p = \frac{U_m}{s t_p} = \frac{(\lambda^{1/(1-\tau)} - \lambda^{1/(1-\tau)})}{\ln \lambda}; \quad (17)$$

panaikina ne tik U_s – kadangi s yra priešingai, o t_p yra tiesiogiai proporcingas τ_1 – bet priklauso tik nuo dviejų laiko konstantų santykio $\lambda = \tau_2/\tau_1$, o ne atskirai nuo R_1 , C_1 , R_2 ir C_2 . Taigi, p faktorius ne tik nepriklauso nuo dviejų dielektrikų geometrinių matmenų, bet ir nuo visų parametru pokyčių, kurių turi vienodą įtaką τ_1 ir τ_2 .

Tokia situacija išlieka – bent pirmoje aproksimacijoje – pvz., matuojamo objekto temperatūros poveikio atžvilgiu. Tai gali būti svarbu, jei lyginami skirtingais metų laikais atlikti matavimai. Be to, p faktorius nepriklauso ir nuo poliarizacinės įtampos aukščio, nes tiek s , tiek U_m yra proporcingi U_p .

Labai įdomi ir unikali galimybė aiškinti eksperimento rezultatus Maksvelo modelio pagrindu yra galimybė pasitelkti U_m/s priklausomybę nuo t_p skaičiuojant dviejų dielektrikų, esančių ekvivalentinės grandinės elementuose, laidumo laiko konstantas τ_1 ir τ_2 . Šios laiko konstantos yra proporcingos dielektriko ϵ_r / σ dielektriko konstantos ir savitojo laidumo santykis) ir yra jautrios dielektriko konstantos ϵ_r ir σ pokyčiams, tuo tarpu celiuliozės

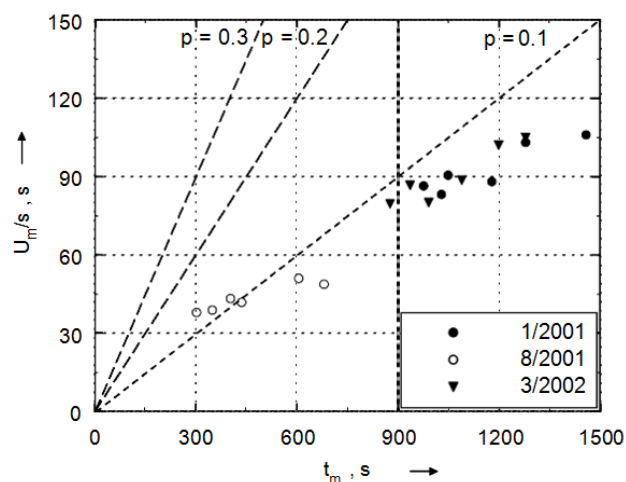
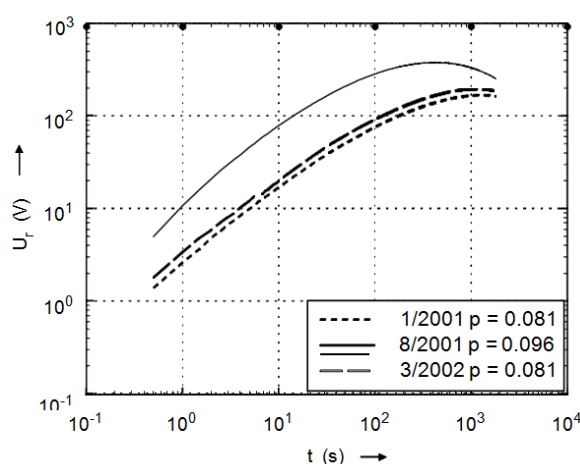
medžiagų atveju savitasis laidumas σ yra labai jautrus vandens kiekiui. Alyvos-popieriaus izoliacijos atveju, vienu iš pagrindinių senėjimo proceso parametrų yra vandens kiekis popieriuje, kuris, viena vertus, spartina senėjimą, o kita vertus, yra irimo produktas. Taigi, senėjimo procesas turi didelę įtaką atitinkamo dielektriko laiko konstantai.

3. SKIRTINGŲ VEIKSNIŲ ĮTAKA GRĮŽTAMAJAI ĮTAMPAI

Šiame skyriuje, naudojantis statistiniais duomenimis [34], aptariami pagrindiniai veiksniai įtakojantys grįžtamosios įtampos parametrus. Kai kurie pasirinkti veiksniai bus patikrinti eksperimentinėje dalyje.

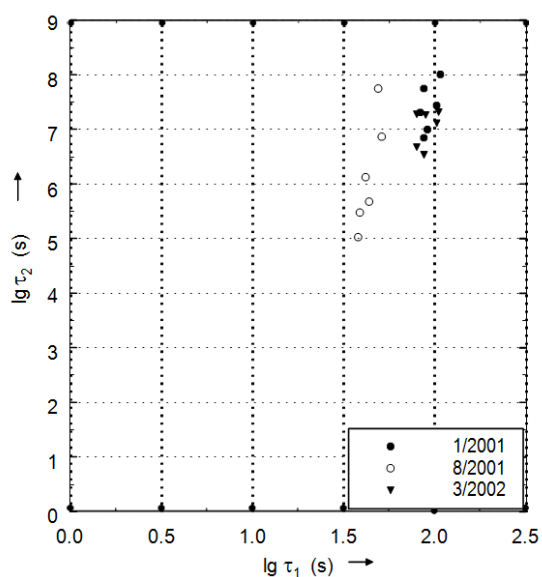
3.1. APLINKOS TEMPERATŪROS ĮTAKA

Nuo 3.1.1 pav. iki 3.1.3 pav. pavaizduoti trijų kabelio matavimų rezultatai skirtingais metų laikais ir diagnostiniais parametrais. 3.1.1 pav. rodoma, kad grįžtamosios įtampos kreivė buvo žymiai aukštesnė, kai matavimas buvo atliekamas vasarą. Dvi kreivės, gautos matuojant žiemą, yra beveik identiškos.



3.1.1 pav. DZR kabelio grįžtamosios įtampos kreivės matuojant skirtingais metų laikais [34]

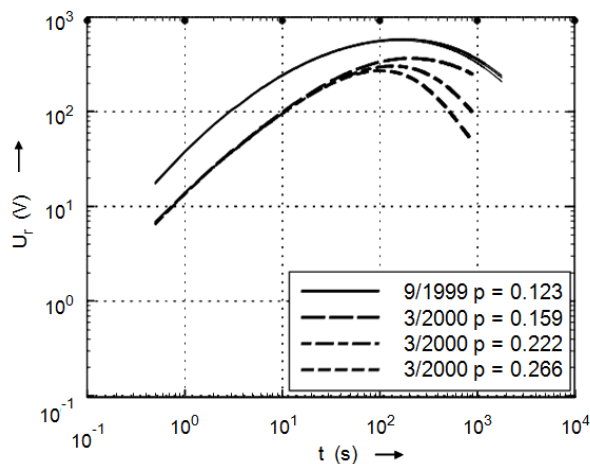
3.1.2 pav. DZR kabelio U_m/s priklausomybė nuo t_p matuojant skirtingais metų laikais [34]



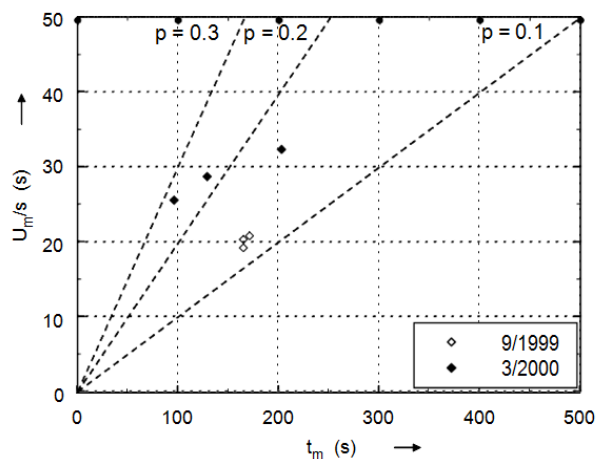
3.1.3 pav. DZR kabelio laiko konstantos τ_1 ir τ_2 matuojant skirtingais metų laikais (skaičiuota pagal 3.1.1 pav. pateiktus duomenis) [34]

Matuojant vasarą, p faktorius buvo tik nežymiai aukštesnis nei matuojant šaltuoju metų laiku.

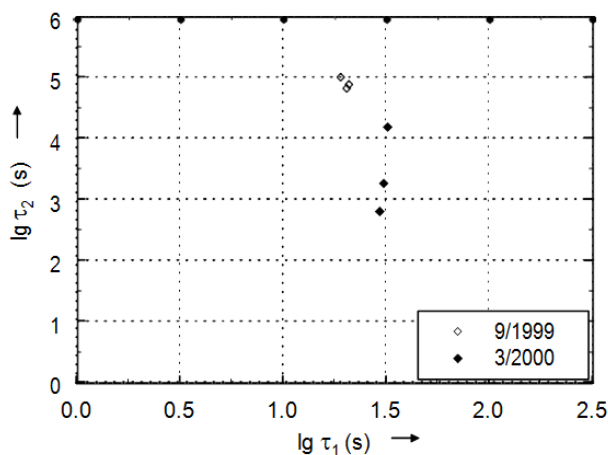
3.1.4 ir 3.1.5 pav. rodomi paskaičiuoti kito kabelio diagnostiniai parametrai U_m/s , t_p , τ_1 ir τ_2 . Dėl aukštesnės temperatūros vasaros metu, dielektriko laiko konstantos yra žemesnės. Lyginant du žiemą atliktus matavimus, matoma, kad laiko konstantos liko nepakitusios, ir tai rodo, kad laikotarpiu tarp dviejų matavimų neįvyko jokio senėjimo.



3.1.4 pav. GER6 kabelio grįžamosios įtampos kreivės matuojant skirtingais metų laikais[34]



3.1.5 pav. GER6 kabelio U_m/s priklausomybė nuo t_p matuojant skirtingais metų laikais[34]



3.2.6 pav. Laiko konstantos τ_1 ir τ_2 skaičiuotos pagal 3.1.4 pav. pateiktus duomenis[34]

3.2. SENĖJIMO ĮTAKA

Kito kabelio atveju senėjimo efektas buvo aiškiai matomas. Atliekant pirmąjį matavimą, nustatytos identiškios grįžamosios įtampos kreivės. Po pusmečio kreivės jau buvo skirtingos (žr. 3.1.4 pav). Papildomi matavimai parodė, kad dviejų iš trijų kabelio gyslų izoliacijos varža nukrito žemiau $1 \text{ G}\Omega$. p faktorius žymiai padidėjo ir ypač sumažėjo izoliacijos „kietosios dalies“

(celiuliozės medžiagos) laiko konstanta τ_2 . 3.2.5 ir 3.2.6 pav. rodomi atitinkami duomenys. Verta pažymėti, kad laiko konstanta τ_1 (koreliuota su alyva) nepasikeitė, o laiko konstanta τ_2 (koreliuota su popieriumi) žymiai sumažėjo, bet skirtingai kiekvienoje iš trijų fazių.

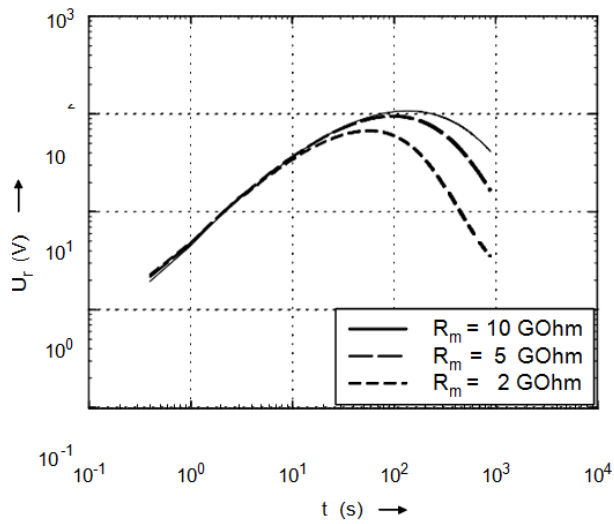
3.3. MATAVIMO VARŽOS R_M ĮTAKA

Kol įtampos matavimo sistemos varža R_M yra žymiai aukštesnė nei matuojamo objekto vidaus varžos, kurias ekvivalentinėje grandinėje žymi varžai R_1 ir R_2 , grįžtamosios įtampos kreivę galima paskaičiuoti analitiniu metodu ir apibrėžti kaip dviejų eksponentinių funkcijų sumą. Jei ši prielaida yra neteisinga, R_M sukelia dviejų kondensatorių C_1 ir C_2 įtampų susiejimą. Toks efektas neturi įtakos pradiniam nuolydžiui s , bet turi įtakos tolesnei formai. Žemos varžos R_M yra linkusios mažinti maksimalų grįžtamosios įtampos kreivės tašką ir skatina jo poslinkį į ankstesnį laiką. 3.2.7 pav. rodomi alyvos ir popieriaus izoliaciją turinčio kabelio vienos šerdies grįžtamosios įtampos kreivių matavimų rezultatai, naudojant skirtingus matavimo varžus $R_M = 10 \text{ G}\Omega$, $5 \text{ G}\Omega$ ir $2 \text{ G}\Omega$. 3.2.7 pav. rodoma atitinkama U_m/s per t_p diagrama visoms trimis šerdims. Verta pastebėti, kad duomenų taškai yra išdėstyti ant monotoniškai kylančios kreivės. 3.2.9 pav. galima matyti τ_2 per τ_1 diagramą. τ_1 nesikeičia, o τ_2 mažėja mažėjant R_M .

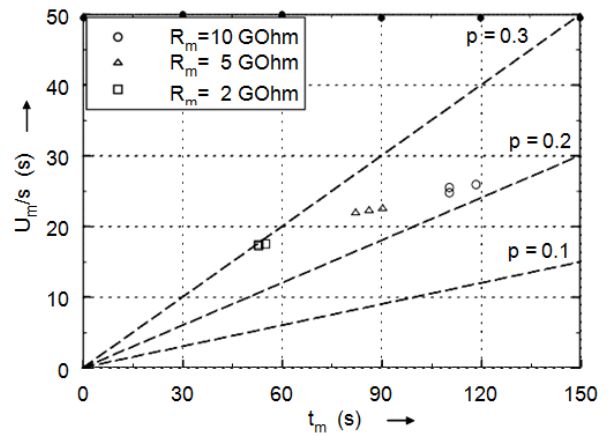
3.4. POLIARIZACIJOS LAIKO ĮTAKA

Norint iširti poliarizacijos laiko įtaką diagnostinių parametrų vertėms, 3.2.8 ir 3.2.9 pav. pavaizduotiems matavimams pritaikyti, atitinkamai, 600, 900 ir 1200 s poliarizacijos laikai.

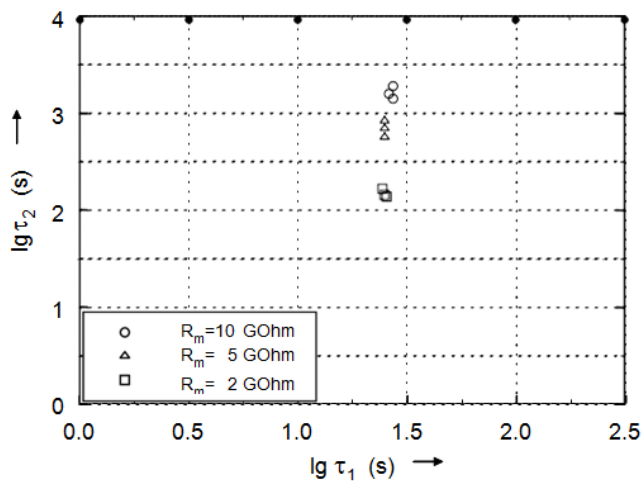
Poliarizacijos laikas daro skirtingą įtaką skirtingiems parametrų vertėms. Pradinis nuolydis s pakinta tik nežymiai, o maksimali įtampa U_m ir jos laikas t_m aiškiai padidėja didėjant poliarizacijos laikui t_c . Paskaičiuotos laiko konstantos τ_1 ir τ_2 rodo nežymią įtaką τ_1 ir nedidelį τ_2 padidėjimą didėjant t_c . Daugeliu atveju p faktorius, didėjant poliarizacijos laikui, mažėja nesmarkiai.



3.2.7 pav. S2 kabelio grįžtamios įtampos kreivės matuojant skirtingais matavimo varžais [34]



3.2.8 pav. S2 kabelio U/s priklausomybė nuo t_p naudojant skirtingas matavimo varžas [34]



3.2.9 pav. Laiko konstantos τ_1 ir τ_2 paskaičiuotos pagal 3.2.7 pav. Duomenis [34]

Praktinis stebėtos nežymios atitinkamų parametrų priklausomybės nuo poliarizacijos laiko pasekmė yra ta, kad galima sumažinti bendrąją matavimo trukmę kabelio izoliacijai įvertinti. Praktiniai rezultatai rodo, kad daugeliu atvejų pakanka 15 minučių. Pokyčiai lyginant su $t_p = 30$ min nėra labai reikšmingi.


4. LABORATORINIAI EKSPERIMENTAI

Šiame skyriuje aprašomi KTU universiteto laboratorijoje (pav.4.1) atlikti eksperimentai. Eksperimentams atlikti buvo naudojamas laboratorijoje esantys kabeliai. Jų techninės specifikacijos pateiktos 4.1. lentelėje.



4.1 pav. Tiriamasis kabelis esantis KTU aukštos įtampos laboratorijoje

4.1 Lentelė. Tiriamojo kabelio specifikacijos

Gamintojas	Draka
Kabelio tipas	AHXAMK-W 3x120Al+35Cu 
Izoliacija	XLPE
Aukščiausia leistinoji ilgalaikio darbo laidininko temperatūra	90°C
Vardinė įtampa	10kV
Laidininko dydis	120mm ²
Kabelio Ilgis	170m

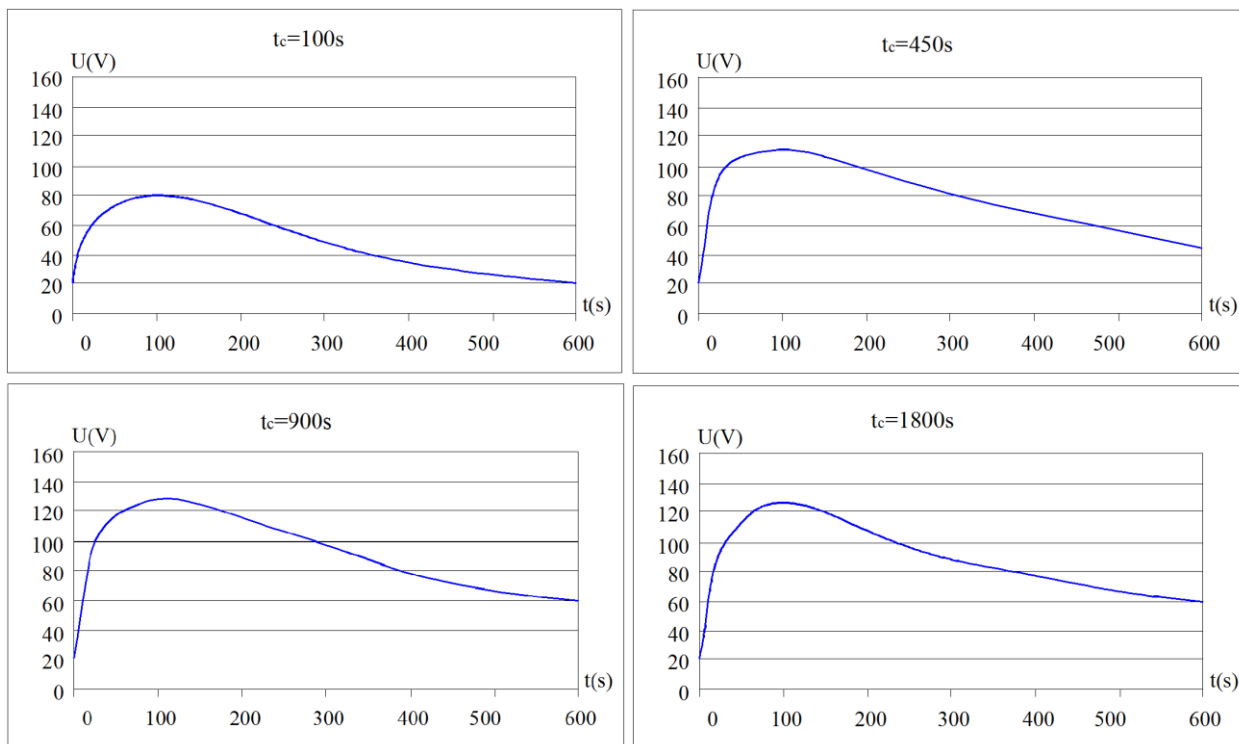
4.1.BANDYMO PARAMETRŲ POVEIKIS GRĮŽTAMAJAI ĮTAMPAI

Šiuo eksperimentu buvo siekiama ištirti grįžtamosios įtampos matavimo parametrus keičiant kabelio įkrovimo įtampą bei įkrovimo ir iškrovimo trukmes.

Šiems tyrimams atlikti buvo naudojamas prietaisas CD31. Jo veikimo principas aprašytas 1.1.2 skyriuje.

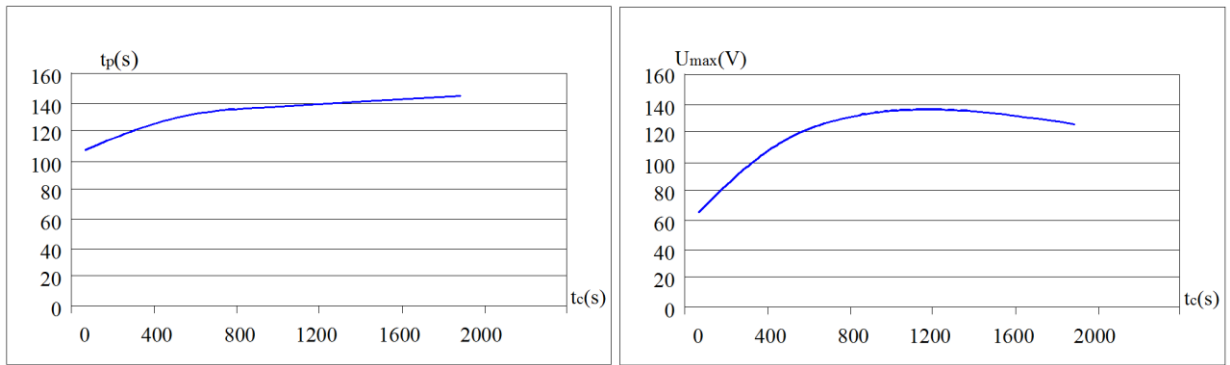
4.1.1. Įkrovimo trukmė

Šiame skirsnyje grįžtamosios įtampos matavimais demonstruojamas įkrovimo trukmės (t_c) poveikis, pateikti keturi grafikai, vaizduojantys skirtingas įkrovimo trukmes. Trukmė kinta nuo 100 iki 1800 sekundžių.



4.1.1.1 pav. Priklausomybė nuo įkrovimo trukmės atliekant grįžtamosios įtampos matavimus. Visuose pavyzdžiuose naudota 2 kV įkrovimo įtampa ir pastovus 10 sekundžių iškrovimo laikas.

Įkrovimo trukmę padidinus nuo 100s iki 900s, grįžtamosios įtampos maksimali vertė padidėja nuo 65V iki 129V. Tai yra 97,5% padidėjimas, reiškiantis beveik dvigubai didesnę grįžtamąją įtampą. Trukmės padidinimas nuo 900s iki 1800s, šiuo atveju, neturi įtakos grįžtamosios įtampos maksimaliai vertei. Pikinės vertės laikas t_p padidėja didėjant įkrovimo trukmei – ši priklausomybė yra demonstruojama 4.1.1.2 pav. ir išvedama iš 4.1.1.1 pav. Grafike, kuriame U_m vaizduojama kaip t_c funkcija, parodoma, kad didesnė nei 900 sekundžių įkrovimo trukmė (t_c) neturi įtakos grįžtamosios įtampos aukščiui.

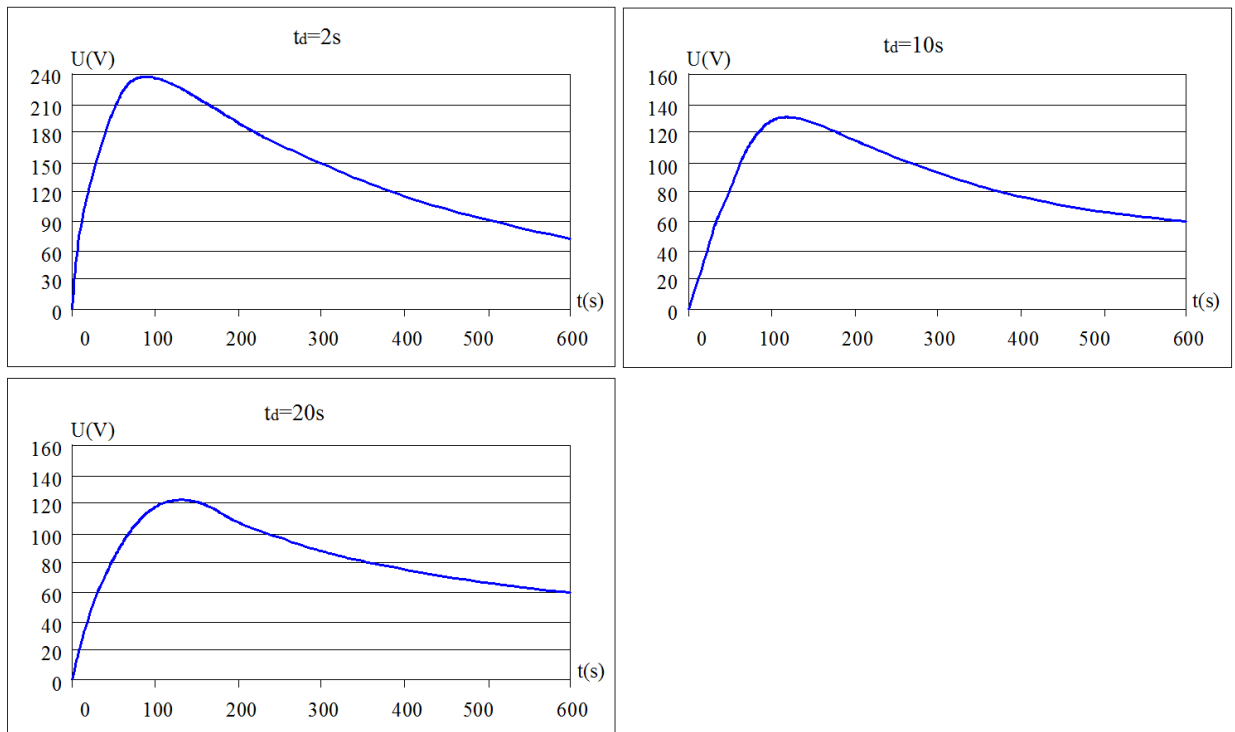


4.1.1.2 pav. Maksimali grįžtamoji įtampa (U_m) ir jos laikas (t_p) kaip įkrovimo trukmės funkcija

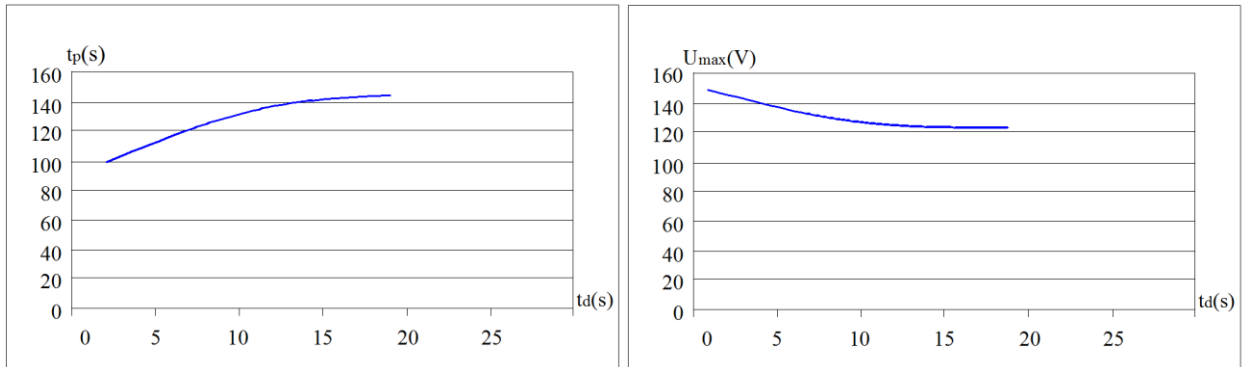
4.1.2. Iškrovimo trukmė

Iškrovimo trukmė grįžtamosios įtampos matavimuose naudojama siekiant iškrauti kabelio geometrijos lemiamą talpą. Numanoma, kad didinant iškrovimo trukmę, grįžtamoji įtampa sumažės. Tai yra aiškinama tuo, kad kabeliui iškrauti reikia daugiau laiko, todėl grįžtamosios įtampos matavimo momentu kabelyje laikoma mažiau energijos. Tai yra vaizduojama 4.1.2.1 pav.

Padidinus iškrovimo trukmę t_d , U_m sumažėja, o t_p padidėja. Grįžtamosios įtampos galinė dalis pasidaro mažiau nuožulni. Iškrovimo trukmės pokyčio poveikis grįžtamosios įtampos maksimalios vertės laikui ir maksimaliai vertei pavaizduotas 4.1.2.2 pav.



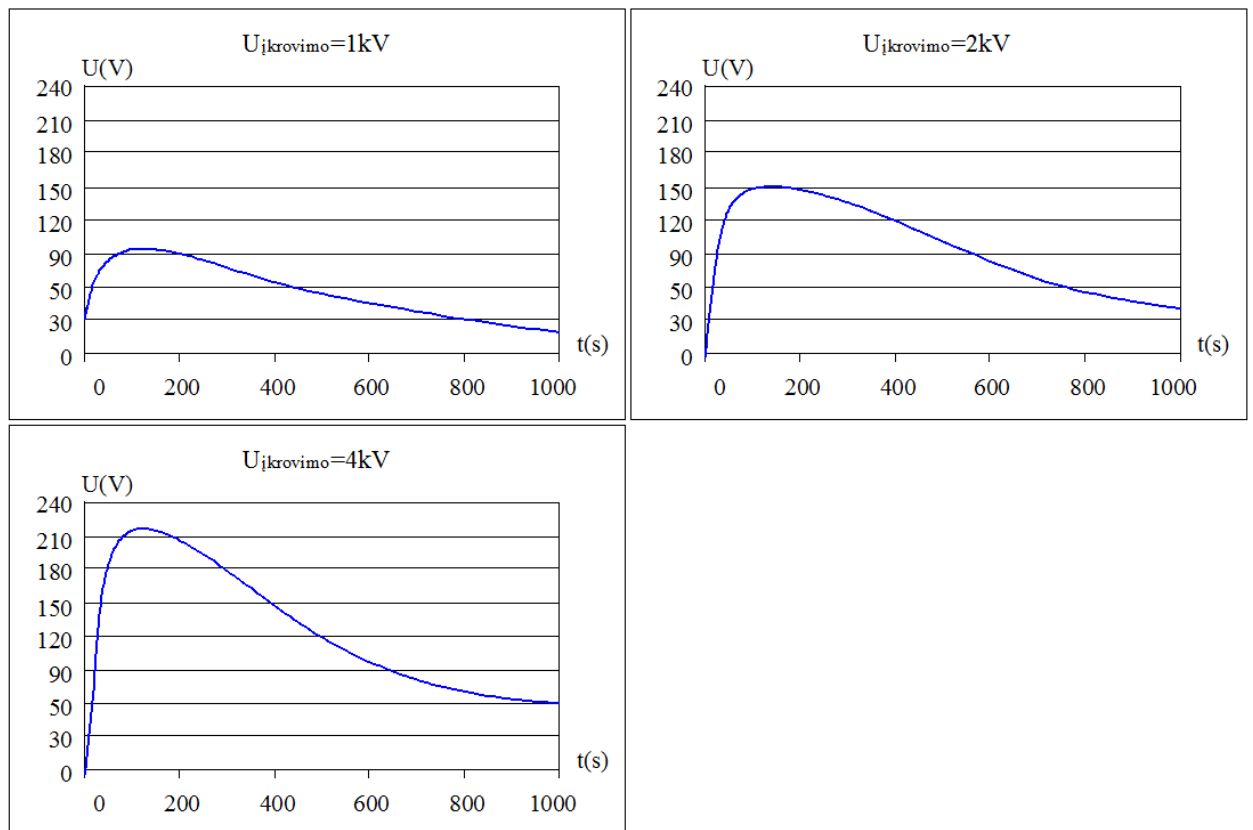
4.1.2.1 pav. Iškrovimo trukmės t_d koregavimas nuo 2, 10 iki 20 sekundžių. Įkrovimo trukmė sudarė 900 sekundžių, įkrovimo įtampa – 2 kV.



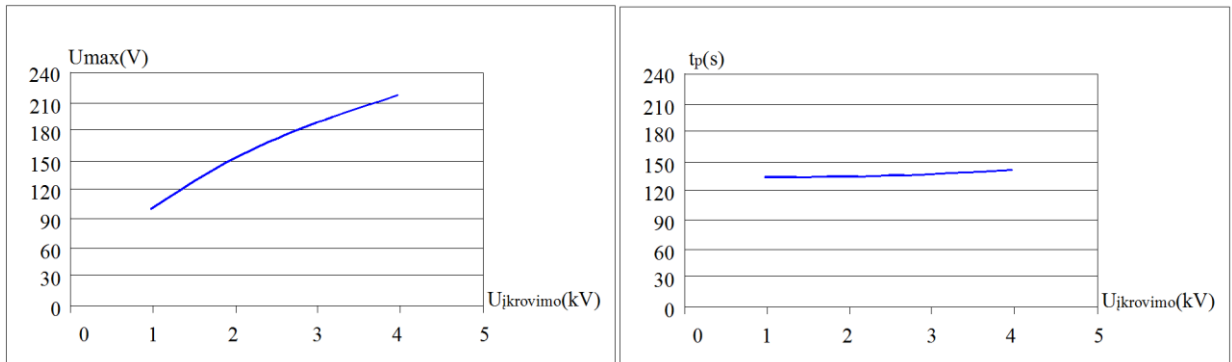
4.1.2.2 pav. Iškvrimo trukmės t_d poveikis maksimaliai grįžtamajai įtampai U_m ir maksimalios grįžtamosios įtampos lakui t_p .

4.1.3. Įkrovimo įtampa

Įkrovimo įtampos U_{ikrov} tyrimo rezultatai pavaizduoti 4.1.3.1 pav. Įkrovimo įtampa didinama nuo 1 kV iki 4 kV. Padidėja grįžtamosios įtampos maksimali vertė. Šiuo atveju pasiekiamas aukštas tiesiškumo laipsnis. Tai pavaizduota ir 4.1.3.2 pav. Įkrovimo įtampos padidinimas neturi įtakos maksimalios įtampos laikui t_p .



4.1.3.1 pav. Įkrovimo įtampa didinama nuo 1, 2 iki 4 kV.



4.1.3.2 pav. Grįžtamosios įtampos maksimali vertė U_m ir maksimalios vertės laikas t_p kaip įkrovimo įtampos funkcija

Padidinus įkrovimo įtampą, įvyksta tiesinis grįžtamosios įtampos maksimalios vertės padidėjimas: didinant įkrovimo įtampą $U_{įkrov.}$ nuo 1 iki 2 kV, maksimali grįžtamoji įtampa padidėja 50 %. Tai yra akivaizdus padidėjimas 50,61 voltais. Vėl dvigubai padidinus įkrovimo įtampą – nuo 2 iki 4 kV, grįžtamoji įtampa padidėja 60,96 voltų, t.y. 40 %.

Vertinant grįžtamosios įtampos galinę dalį, matoma, kad esant aukštesnei įkrovimo įtampai, grįžtamosios įtampos galinė dalis pasidaro nuožulnesnė.

4.1.4. Bandymo parametrų poveikio grįžtamosios įtampos charakteristikoms įvertinimas

4.1.1 skirsnyje pateiktame pavyzdyje, didėjant įkrovimo trukmei t_c , U_m nepadidėja. Kituose pavyzdžiuose matomas kitoks poveikis. Padidinus įkrovimo trukmę iki didesnės nei 900 sekundžių, grįžtamoji įtampa padidėja. U_m įkrovimo trukmės atžvilgiu priklauso nuo medžiagos. Dėl šios priežasties siūloma atlikti eksploatacinius matavimus naudojant dvi skirtingas įkrovimo trukmes.

Keičiant iškrovimo trukmes t_d nuoseklaus grįžtamosios įtampos parametrų pokyčio nepastebėta. Iškrovimo laikotarpis skirtas iškrauti geometrijos lemiamą talpą, todėl siūloma, kad iškrovimo laikas sudarytų 2 – 10 sekundžių.

Iškrovimo įtampos tyrimo rezultatai 4.1.3.2 pav. rodo, kad, didėjant $U_{įkrov.}$, parametras t_p nekinta.

Skirtingos $U_{įkrov.}$ parametro vertės gali suteikti vertingos informacijos apie kabelio izoliaciją. Jei laikoma, kad kabelio izoliacija yra ideali, t.y., laidininką veikiant nuolatinei (DC) srovei, izoliacija visiškai neteka aktyvioji srovė (angl. „resistive current“). Tokiu atveju galima numanyti, kad tiesiškumo tarp grįžtamosios įtampos maksimalių verčių laipsnis bus aukštas, dvigubai padidinus įkrovimo įtampą.

Tikrosiomis sąlygomis visada bus aktyvioji nuotėkio srovė, dėl kurios teoriškai pasiekama grįžtamoji įtampa bus mažesnė. Lyginant grįžtamosios įtampos padidėjimo pokytį

esant 1-2 kV ir 2-4 kV įkrovimo įtampoms, idealiomis sąlygomis, galima nustatyti idealų tiesiškumo arba, blogiausiu atveju, netiesišką ryšį. Pastaruoju atveju numatoma, kad, didėjant įkrovimo įtampai, tiesiškumas tarp 1-2kV ir 2-4kV sumažėja.

Tokį tiesiškumo faktorių galima pasitelkti ir stebint senėjimo procesus. Galima pastebėti, kad tiesiškumas kinta, kai grįžtamosios įtampos matavimai atliekami tam tikrais laiko intervalais.

4.2.GRĮŽTAMOSIOS ĮTAMPOS PARAMETRŲ PRIKLAUSOMYBĖ NUO TEMPERATŪROS

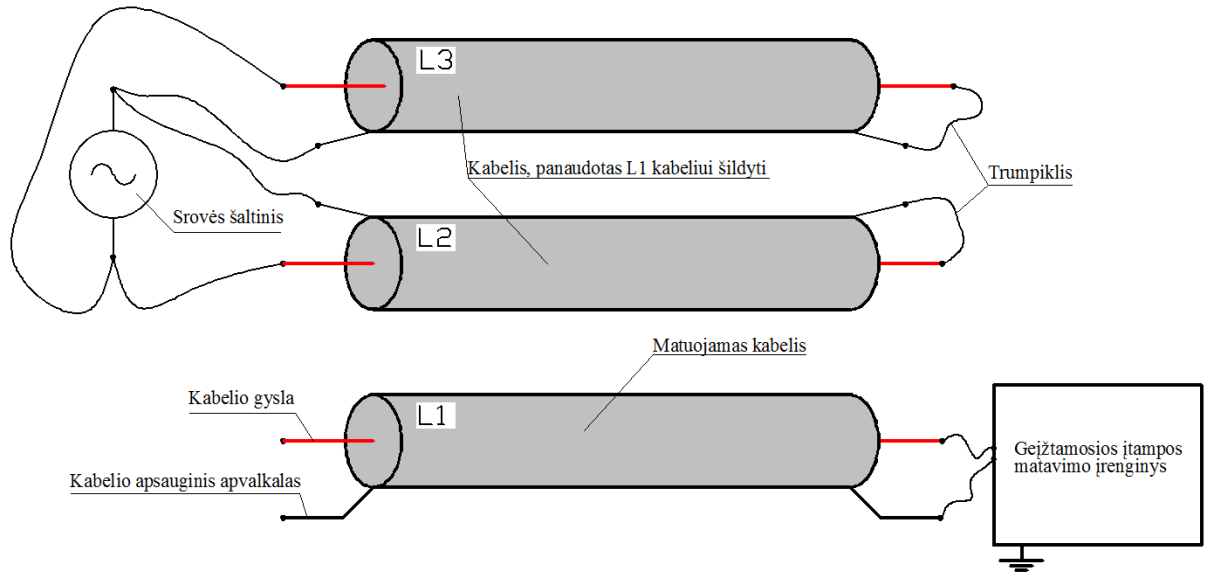
Žinoma, kad, kaip ir kitų dielektrikų matavimo atveju, grįžtamosios įtampos kreivėms įtaką daro matuojamo objekto temperatūra, ir į šį poveikį privaloma atsižvelgti ir patikrinti 3.1 skyriuje gautus rezultatus. Šiuo eksperimentu siekiama išanalizuoti grįžtamosios įtampos matavimo parametrus kaip temperatūros funkciją.

4.2.1. Eksperimento modelis

Šiam tyrimui atlikti buvo naudojamas kabelis Al 3x120, reguliuojamas srovės generatorius, grįžtamosios įtampos matavimo įrenginys CD31, termovizorius FLIR E40 ir tanδ diagnostikos įranga HVA28 TD.

Kadangi tiriamosios linijos gyslos liečia viena kitą, L2 ir L3 panaudoti kaip kaitinimo elementas, L1 gyslos pašildymui (žr. 4.2.1.1 pav.) Vieni L2 ir L3 kabelių galai buvo užtrumpinti, o kitame gale prijungti prie reguliuojamo srovės šaltinio. Jo pagalba per kabelių L2 ir L3 izoliaciją teka srovė, ją įkaitindama iki reikalingos temperatūros, kuri stebima termovizoriumi. Linijos L1 fazė palikta atvira ir naudojama grįžtamosios įtampos matavimams atlikti.

Toks šildymo būdas buvo pasirinktas, nes grįžtamosios įtampos matavimas užtrunka apie 1 valandą. Jeigu įkaitintume kabelį, o paskui tą patį kabelį matuotume, jo temperatūra pradėtų kristi matavimams neįsibėgėjus ir dėl pasikeitusios temperatūros matavimo duomenys gautūsi klaidingi.

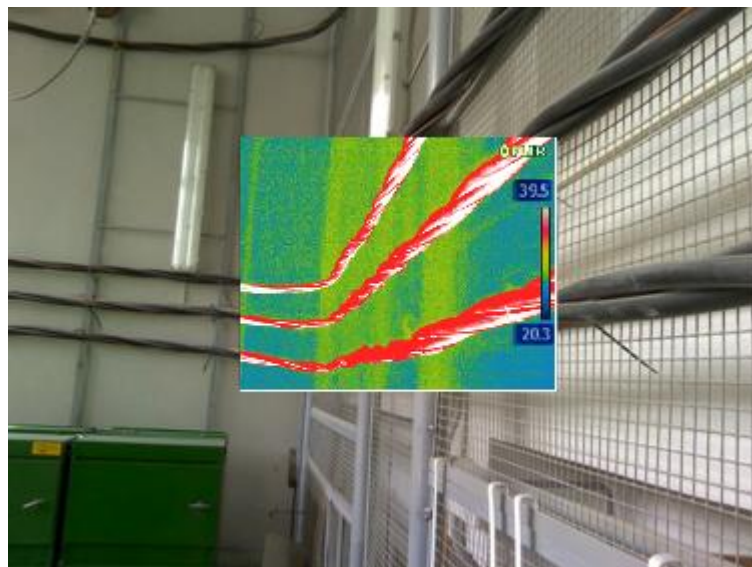


4.2.1.1 pav. Eksperimento modelis.

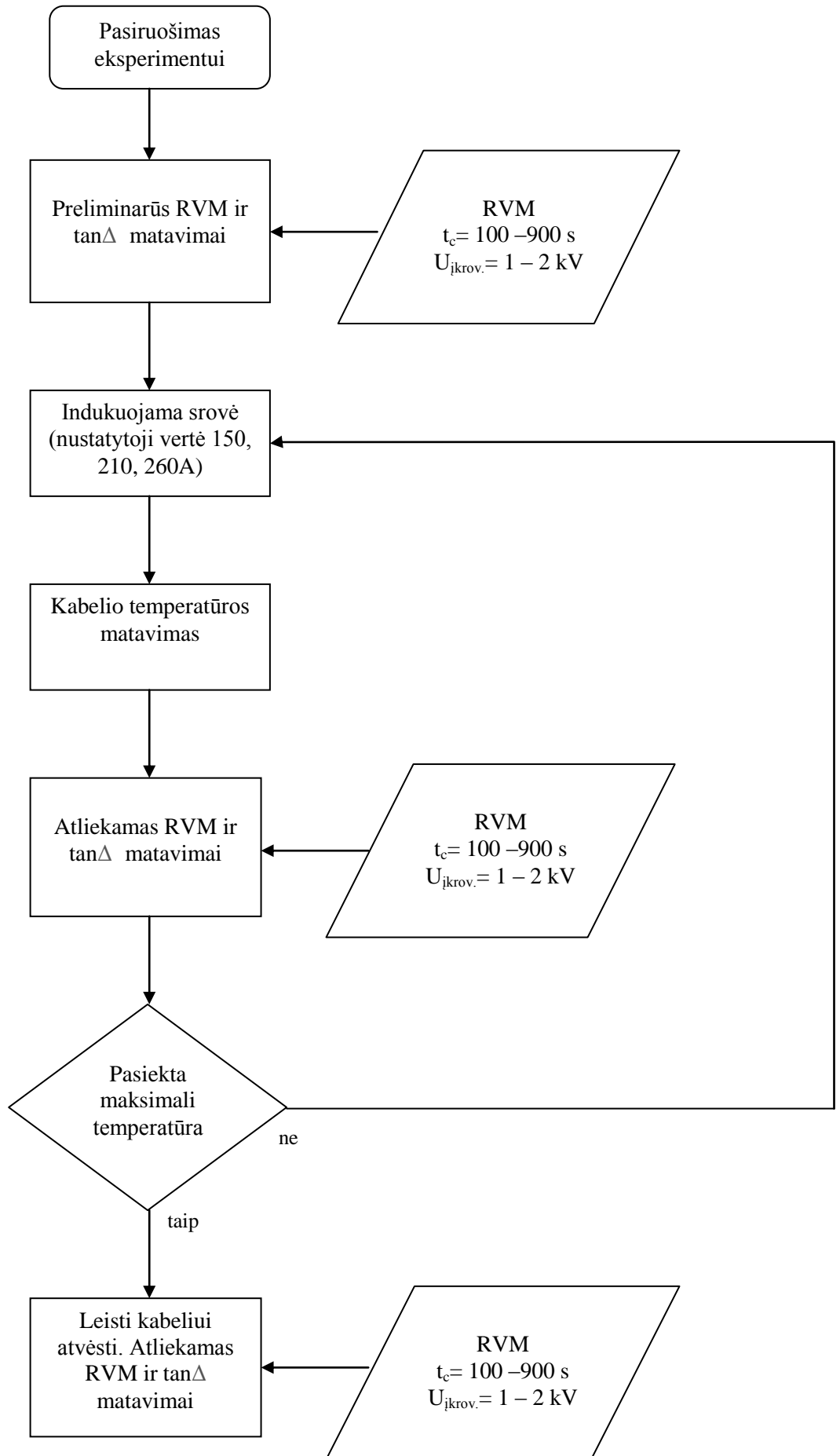
4.2.2. Matavimo procedūra

Prieš pradėdant kabelio kaitinimo procesą, atliktas jo grįžtamosios įtampos ir tanδ matavimai 20°C temperatūroje.

Pradėjus eksperimentuoti pastebėta, kad iš srovės generatoriaus paduodama 160A srovė į kaitinamą kabelį įkaitina jį iki 29 °C. Tai įvertinus, buvo nuspręsta didinti srovę maždaug kas 50A po kiekvieno matavimo etapo. Naudotos šios kaitinimo srovės vardinės vertės: 100, 150, 210 ir 260A. Kaitinamų kabelių temperatūra buvo nuolat stebima termovizoriumi, kad nepasiektų aukščiausios leistinosios vertės - 90 °C (žr. 4.2.1.1 pav.). Matavimų eiliškumas pateiktas 4.2.2.2 paveiksle.



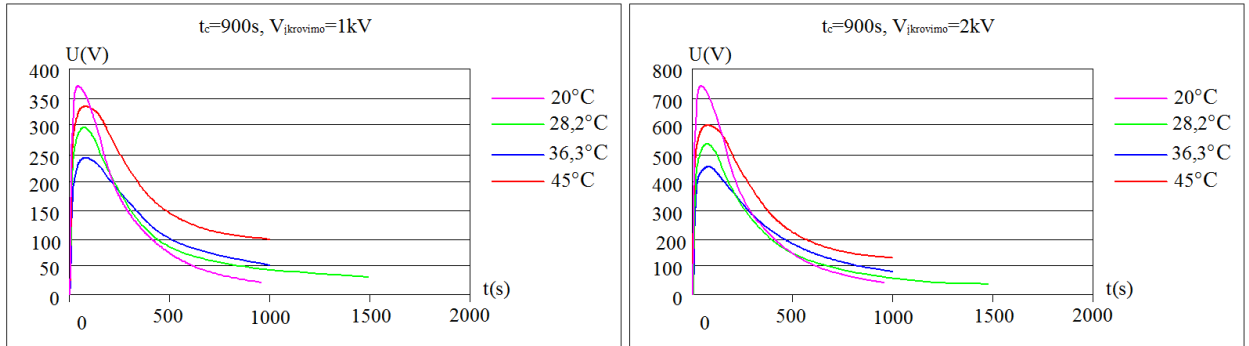
4.2.2.1. pav. Kabelio temperatūros matavimas termovizoriumi



4.2.2.2 pav. Eksperimento kaitinant matavimo procedūros schema

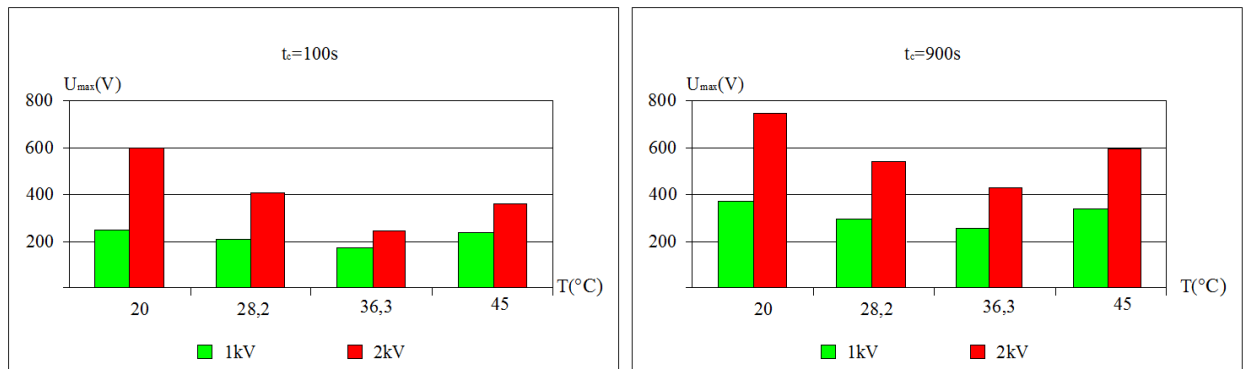
4.2.3. Rezultatai

Šiame skirsnyje pristatomi grįžtamosios įtampos (RVM) matavimo rezultatai. Matavimai atliekami pagal 4.2.2.2 pav. pateiktą schemą. 4.2.3.1 pav. parodyta grįžtamoji įtampa, kai įkrovimo trukmė yra 900 sekundžių. Kabelis buvo įkraunamas naudojant 1 ir atitinkamai 2 kV.



4.2.3.1 pav. L1 fazės grįžtamosios įtampos grafikas esant 900 sekundžių įkrovimo trukmei

Apžvelgus rezultatus, pastebėta tendencija, kad, kylant temperatūrai, U_m mažėja. Ypatingas dėmesys parametru U_m skiriamas 4.2.3.2 pav. histogramose. Čia grįžtamosios įtampos parametras U_m pavaizduotas kaip temperatūros funkcija, kai įkrovimo trukmė yra 100 ir 900 sekundžių. Nors stebima mažėjimo tendencija, tuo atveju, kai kabelio temperatūra yra 45,4°C, maksimali, įtampa didėja, bet vis tiek lieka žemesnė nei esant 20 °C.



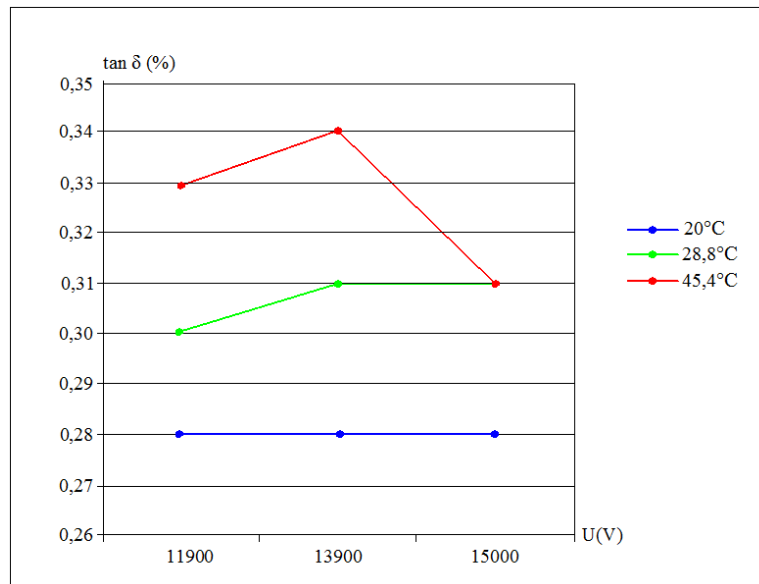
4.2.3.2 pav. U_m kaip temperatūros funkcijos histograma.

Santykis tarp maksimalių grįžtamųjų įtampų esant skirtingoms įkrovimo įtampoms (2kV ir 1kV) mažėja kylant temperatūrai, ir, esant 20 °C, šis santykis sudaro 2,36 (100s) ir 2 (900s). Tai pavaizduota 4.2.3.1 lentelėje.

4.2.3.1 lentelė. U_m nurodyta skirtingoms įkrovimo trukmėms (100, 900s), esant skirtingoms įkrovimo įtampoms (1, 2kV). Santykis apibrėžiamas kaip $U_{m\ 2kV} / U_{m\ 1kV}$.

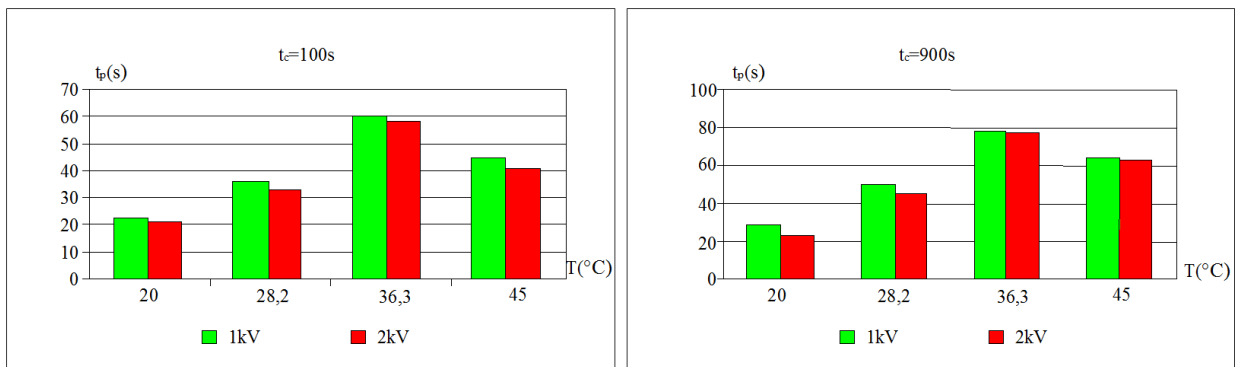
Temp. °C	U_m 100(s), 1kV	U_m 100(s), 2kV	Santykis	U_m 900(s), 1kV	U_m 900(s), 2kV	Santykis
20,0	250,93 (V)	591,94 (V)	2,36	364,05	730,79	2,01
28,2	203,53 (V)	402,90 (V)	1,98	290,74	526,91	1,80
36,3	172,73 (V)	250,07 (V)	1,44	245,16	421,58	1,72
45,4	241,02 (V)	354,30 (V)	1,47	332,84	587,13	1,76

4.2.3.3 pav. pateikti $\tan \delta$ rezultatai kaip įtamos funkcija. Kabelio temperatūra yra nurodyta legendoje. $\tan \delta$ didėja didėjant temperatūrai.



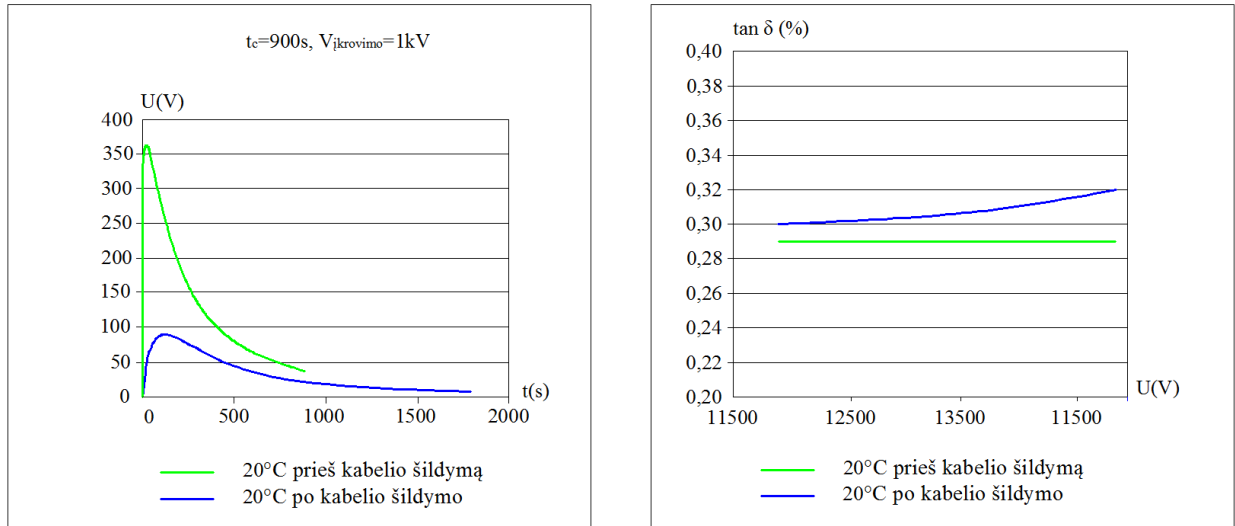
4.2.3.3 pav. Tan delta rezultatai esant 20, 28,8 ir 44.4 laipsnių pagal Celsijų temperatūrai.

4.2.3.4 pav. yra parodyta maksimalios grįžtamosios įtamos laikas t_p , pateiktas kaip temperatūros funkcija esant įkrovimo įtampoms 1 kV ir 2 kV. T_p didėja iki 36,3 °C, o po to t_p mažėja. Skirtumo tarp įkrovimo įtampų 1 ir 2 kV nenustatytas. .



4.2.3.4 pav. t_p kaip temperatūros funkcija

Matavimai, atlikti prieš ir po kaitinimo ciklą, pateikė skirtingus rezultatus. Tai parodo 4.2.3.5(a) pav.: po kaitinimo ciklo t_p padidėjo, o U_m sumažėjo. 4.2.3.5 (b) pav. pateikti $\tan \delta$ rezultatai kaip įtampos funkcija. Pagal 12 kV, 14kV ir 15 kV taškus matyti, kad $\tan \delta$ didėja po kaitinimo ciklo, lyginant su $\tan \delta$ prieš kaitinimo ciklą.



4.2.3.5 pav. (a) Grįžtamosios įtampos matavimas prieš ir po kaitinimo ciklo. (b) $\tan \delta$ rezultatai, gauti matuojant prieš ir po kaitinimo ciklo.

4.2.4. Temperatūros poveikio grįžtamosios įtampos charakteristikoms įvertinimas

Nuo 20,0 °C iki 36,3 °C temperatūros diapazonu stebimas U_m mažėjimas atitinkamai kintant temperatūrai. Vis dėlto, nuo 36,3 iki 45,4 °C temperatūros diapazonu U_m didėja, bet vis tiek lieka žemesnė nei tuo atveju, kai kabelis buvo matuojamas esant 20 °C temperatūrai. Šiai elgsenai paaiškinti naudotas dvisluoksnis modelis. Dėl kabelyje susidariusio temperatūros gradiento, varža sumažės arčiau laidininko. Tai taip pat rodo 4.2.3.3 pav. pateikti $\tan \delta$ matavimai. Šiame paveiksle demonstruojama, kad, didėjant temperatūrai, varžinis komponentas mažėja. Dėl to U_m yra žemesnė. 4.2.3.2 pav. tokia situacija stebima ties 28,2 ir 36,3 °C. Vis dėlto, 45,4 °C atveju U_m didėja. Pagal dvisluoksnio modelio teoriją, to galima priežastis yra tai, kad, šiuo atveju, dėl susidariusio temperatūros gradiento kaitinimas sukiamas kabelio išoriniam sluoksniui, o ne vidiniam.

Išorinis sluoksnis turi skirtingas charakteristikas, todėl U_m yra skirtinga.

Parametras t_p yra linkęs didėti esant iki 36,3 °C temperatūrai, tačiau esant 45,4°C t_p mažėja, nors ir lieka didesnis nei 20 °C atveju. Siejant tai su Makvelo modeliu, aprašytame 2.3 skyriuje, galima teigti, kad didėja $R_p C_p$ šakos laiko konstanta. Kinta dominuojantis poliarizacijos procesas. Vadovaujantis 2.3 skyriumi, taip įvyksta dėl varžos R_p . Dėl to mažėja

U_m ir didėja t_p . Esant 45,4 °C, t_p mažėja, lyginant su 36,3°C. Tai gali įvykti dėl tokios pat priežasties, kaip ir U_m atveju. Dėl temperatūros gradiento, izoliacijos išorinė dalis patiria įtempį, todėl šioje dalyje grįžtamosios įtampos charakteristika yra skirtinga dėl skirtingų izoliacijų sudėčių.

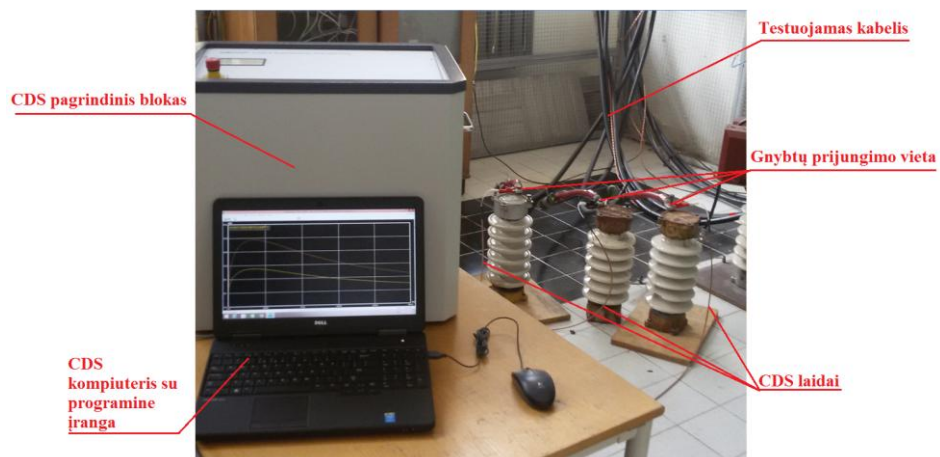
Santykis tarp $t_{p36.3}$ ir t_{p20} yra įdomus parametras tuo, kad didėjant temperatūrai, izoliacijos viduje pradeda vykti tam tikri procesai, pavyzdžiui, padidėja molekulių judrumas. Numanoma, kad senėjimo atveju toks t_p santykis kinta. Tokia pati prielaida daroma ir t_p atžvilgiu, kaip ir U_m atveju – šio parametro vertę galima panaudoti, kai objektas yra stebimas intervalais. Matavimus galima palyginti nuosekliai apibrėžiant santykį tarp naujojo pamatuoto $t_{p \text{ naujasmatav.}}$ ir senojo pamatuoto $t_{p \text{ senasmatav.}}$. Vienetui lygus santykis žymi gerą būklę.

Įkrovimo įtampai didėjant nuo 1 iki 2 kV, skirtumo tarp t_p nepastebėta. To ir buvo tikimasi, nes sukliamas tas pats dominuojantis poliarizacijos procesas, o vienintelis skirtumas yra tai, kad jį sukelia kitokia įtampa.

Matuojant grįžtamąją įtampą prieš įkaitinimo ciklą, lyginant su matavimu po kaitinimo ciklo, rezultatai yra skirtingi. Tai gali reikšti, kad kabelio atminties efektas pasikeitė dėl kaitinimo ciklų. Tan δ matavimai, atlikti prieš kaitinimo ciklą ir po kaitinimo ciklo ties 12,14 ir 15kV patvirtina pokytį, žr. 4.2.3.5 (b) pav.

4.3. KABELIO ILGIO ĮTAKA GRĮŽTAMAJAI ĮTAMPAI

Šiuo eksperimentu buvo siekiama išanalizuoti grįžtamosios įtampos matavimo parametrus keičiant kabelio ilgį. Kabelio talpa didėja didėjant kabelio ilgiui – tą atspindi grįžtamosios įtampos parametrai U_m ir t_p . Atliekamas eksperimentas siekiant ištirti ilgio įtaką grįžtamosios įtampos matavimo rezultatams. Matavimams naudota diagnostinė sistema CDS aprašyta 1.2.2 skyriuje.



4.3.1 pav. Grįžtamosios įtampos matavimas su CDS

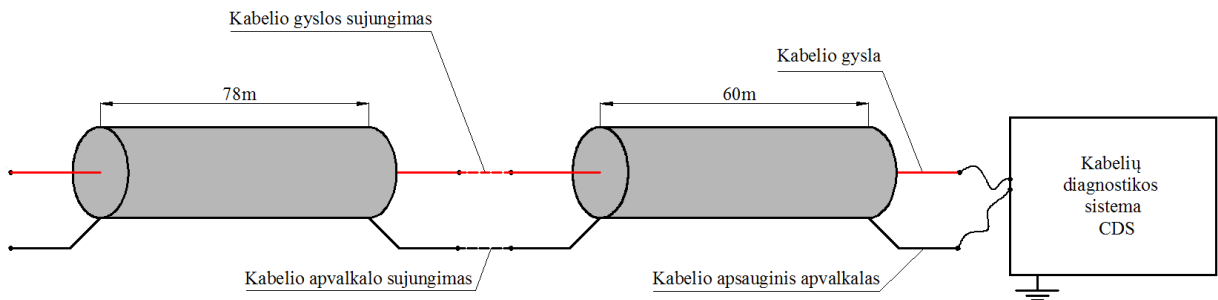
4.3.1. Matavimo modelis

Du kabeliai pirma matuojami atskirai, pagal 4.3.1.1 lentelėje pateiktą konfigūraciją. Kabeliai yra 60 ir 78 metrų ilgio.

4.3.1.1 lentelė. Matavimo parametrai, naudojami tiriant kabelio ilgio įtaką grįžtamajai įtampai

Parametras	Vertė
t_c	900 (s)
t_d	2 (s)
$U_{ikrovimo}$	2 (kV)

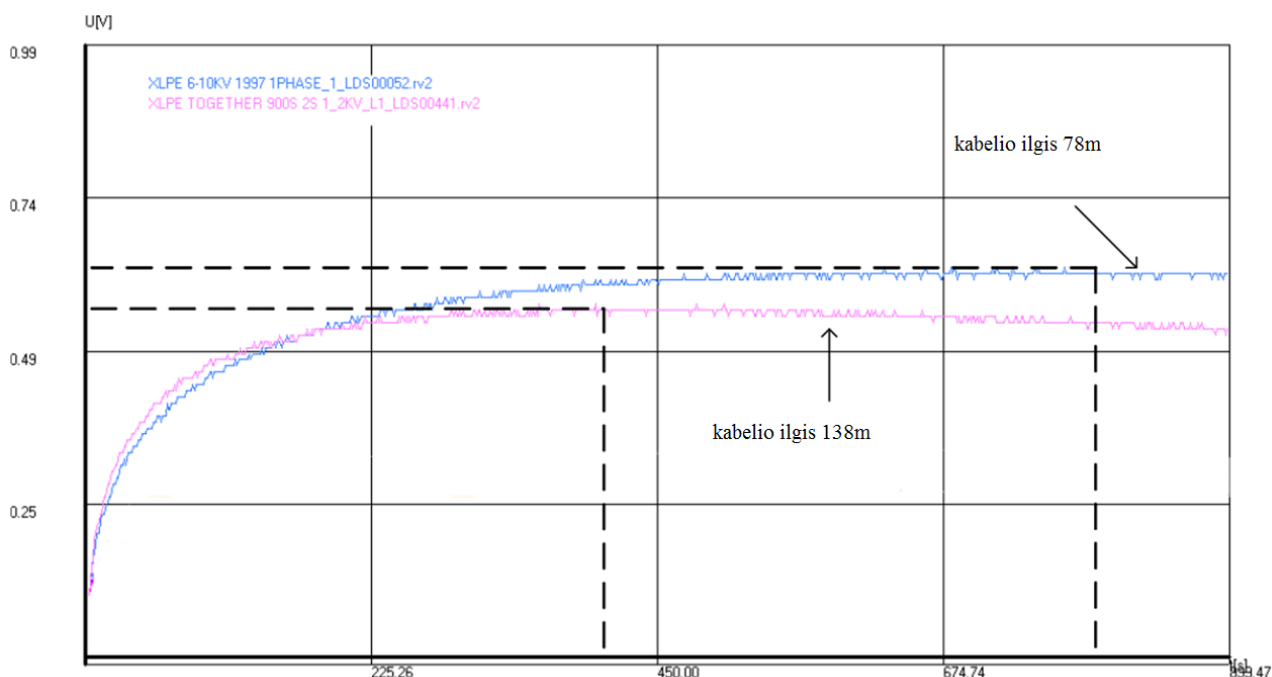
Kabėlių laidininkai yra sujungti, kad kabelio ilgis būtų ilgesnis. Grįžtamoji įtampa vėlgi matuojama naujoje situacijoje, schematiškai pavaizduotoje 4.3.1.1 pav.



4.3.1.1 pav. Matavimo modelis, kai XLPE kabeliai yra sujungti tarpusavyje

4.3.2. Matavimų rezultatai

Kabelio ilgio įtakos grįžtamajai įtampai tyrimo rezultatai rodo, kad, didėjant ilgiui, parametrai t_p ir U_m mažėja. Tai yra vaizduojama 4.3.2.1 pav., kur mėlyna linija nurodo RVM (grįžtamajai įtampai) matavimą, atliekamą vienam XLPE kabeliui, o violetinė linija – RVM matavimą dviem nuosekliai išdėstytiems XLPE kabeliams.



4.3.2.1 pav. Ilgio poveikis grįžtamosios įtampos matavimo rezultatams. Violetinė linija atspindi rezultatą, gautą tarpusavyje sujungus dviejų XLPE kabelių laidininkus (bendrasis ilgis – 138 metrai). Punktyrinės linijos žymi t_p ir U_m skirtumus. Šiais atvejais įkrovimo įtampa U_{ikrov} sudarė 2kV.

Santykis tarp U_m esant 1kV ir 2kV įkrovimo įtampai, abiem atvejais, paskaičiuotas 4.3.2.1 lentelės C stulpelyje. Taikomos šios vertės: vienam kabeliui – 2, pailgintam kabeliui – 1,97. Jos nepriklauso nuo ilgio. 4.3.2.1 lentelėje taip pat paskaičiuojamas tas pats santykis, tik kaip ilgio funkcija: jis nurodytas D eilutėje U_m vertei ir E eilutėje – t_p vertei. Abiejų parametrų atveju šis faktorius turi tokią pačią reikšmę esant skirtingoms įkrovimo įtampoms.

4.3.2.1 lentelė. U_m ir t_p vertės nurodytos A, B stulpeliuose. U_{max} ir t_p santykis esant skirtingoms įkrovimo įtampoms, bet tam pačiam ilgiui, nurodytas C stulpelyje. Eilutėse D ir E nurodytas U_m ir t_p santykis esant tai pačiai įkrovimo įtampai, bet skirtingiems ilgiams.

	<u>A</u>	<u>B</u>	<u>C</u>	
Ilgis	U_m 1kV (V)	U_m 2kV (V)	U_m 2kV/ U_{max} 1kV	
78(m)	0,31	0,62	2	
138(m)	0,29	0,57	1,97	
U_m 1(2)kV 78m / U_m 1(2)kV 138m	1,07	1,09		D
Ilgis	t_p 1kV (s)	t_p 2kV (s)	t_p 2kV/ t_p 1kV	
78(m)	450	786	1,74	
138(m)	249	400	2,39	
t_p 1(2)kV 78m / t_p 1(2)kV 138m	1,8	1,9		E

Vertinama dalyba $t_{p\ 1kV\ 78m} / t_{p\ 1kV\ 138m}$. Ši dalyba atitinka atvirkštinę atitinkamų ilgių dalybą, žr. 15 lygtį.

$$\frac{t_{p\ 1kV\ 78m}}{t_{p\ 1kV\ 138m}} = \frac{450(s)}{249(s)} = \left(\frac{78(m)}{138(m)}\right)^{-1} = 1,8 \quad (15)$$

4.3.3. Kabelio ilgio įtakos grįžtamajai įtampai įvertinimas

4.3.2.1 pav. nustatoma kabelio ilgio įtaka grįžtamajai įtampai. Galime teikti, kad grįžtamoji įtampa priklauso nuo ilgio – tai atspindi parametrų t_p ir U_m mažėjimas.

Ilgis neturi įtakos tiesiškumo faktoriui tarp grįžtamosios įtampos maksimalių verčių esant skirtingoms įkrovimo įtampoms ($U_{m\ 2kV} / U_{m\ 1kV}$), žr. 4.3.2.1 lentelę. Kabeliuose su popieriumi ir alyva izoliacija vykstantys poliarizacijos procesai nėra stebimi XLPE kabeliuose. Tą atspindi tiesiškumas tarp $U_{m\ 2kV}/U_{m\ 1kV}$, kuris yra lygus 2, tais atvejais, kai įkrovimo įtampa yra dvigubai didesnė.

Atsižvelgiant į tyrimo rezultatus, grįžtamosios įtampos matavimas yra patikimas metodas charakterizuojantis viso kabelio senėjimą. Šis diagnostikos būdas efektyviausias matuojant kabelius su popierius – alyva izoliacija.

IŠVADOS

1. Išanalizuoti kabelių būklės vertinimo metodai nustatant lokalius defektus ir izoliacijos senėjimą. Renkantis tinkamą diagnostikos metodą kabelių būklės vertinimui, turi būti atsižvelgta į keletą aspektų. Dėl pasitaikančių gedimų movose, tinkamas sprendimas yra lokalus metodas matuojant dalinių išlydžių parametrus. Bendrai būklei ar sudrėkimui įvertinti gana efektyvus yra grįžtamosios įtampos (RVM) metodas.

2. Grįžtamosios įtampos metodas gali padėti aptikti izoliacijos dielektrinių savybių pokyčius ir, atitinkamai, stebėti kabelių senėjimo procesus. Grįžtamosios įtampos metodą galima taikyti visoms daugiasluoksnėms sistemoms, kuriose naudojamos skirtingų dielektrinių savybių izoliacijos, ir kurios patiria ribinės poliarizacijos reiškinį. Duomenų vertinimas Maksvelo modelio pagrindu padeda juos patikimai paaiškinti. Koreliacijos tarp U_m/s ir t_p vertinimo rezultatus galima panaudoti skaičiuojant izoliacijos medžiagų dielektriko laiko konstantas τ_1 ir τ_2 , kurios yra gana patikimi senėjimo procesų ar dielektrikų vandens kiekio indikatoriai.

3. Keičiant diagnostinius bandymo parametrus t_c , t_d ir $U_{jkrov.}$, keičiasi ir grįžtamosios įtampos rezultatų interpretavimas. Galima teikti, kad šiuos parametrus reikia standartizuoti. Tai padarius bus lengviau įvertinti kabelio būklę, lyginant juos su kitais matavimais. Siūlomi standartiniai parametrai: $t_c - 1800s$, $t_d - 4s$, $U_{jkrov.} - 1$ ir $2kV$.

Ištyrus kabelio ilgio įtaką grįžtamajai įtampai, galima teikti, kad ilgis turi įtakos grįžtamosios įtampos parametrams. Lyginant skirtingų ilgių kabelių grįžtamosios įtampos kreives, $t_{p\ ilgis1}/t_{p\ ilgis2}$, santykį reikėtų lyginti su atitinkamų ilgių atvirkštiniu santykiu. Jei kabelių izoliacijos būklė yra panaši, šios dvi vertės turėtų sutapti, priešingu atveju, skirtumas gali būti vertinamas kaip papildomas rodiklis, nurodantis būtinybę vertinti izoliacijos būklės pablogėjimą.

4. Grįžtamosios įtampos rodikliai priklauso nuo temperatūros ir įtakoja metodo efektyvumą keisdama matavimų rezultatų interpretavimą. Matuojamo kabelio temperatūra turi tik nežymią įtaką p faktoriui, skirtingai nei kitiems parametrams: didėjant temperatūrai U_m mažėja, o t_p didėja. Reikalingi tolesni grįžtamosios įtampos charakteristikų ir temperatūros įtakos tyrimai, metodo tikslesniam efektyvumui įvertinti.

LITERATŪROS ŠALTINIAI

1. Pabarčius, A., Malnikas, V. (2013). Galios kabelių linijų su XLPE izoliacija diagnostika // Energijos erdvė. Nr. 4 (19), p. 28.
2. S. Hvidsten, H. Faremo, J.T. Benjaminsen, E. Ildstad, “Condition assessment of water treed service aged XLPE cables by dielectric response measurements”, Cigre Session, Paris, 2000.
3. V.Colloca, A.Fara, M.d.Nigris, G.Rizzi, “Comparison among different diagnostic systems for medium voltage cable lines”, paper 15-109, CIRED 2001 Paris
4. R. Patsch, P. Romero, “Verlustfaktormessungen bei unterschiedlichen Frequenzen als Diagnoseverfahren water tree geschädigter Isolierungen”, 40 IWK, Ilmenau, 1995 Germany.
5. G. Hoff, H.G. Kranz, “Correlation Between Return Voltage and Relaxation Current Measurements on XLPE Medium Voltage Cables”, ISH, London, UK, paper 5.102. S14, 1999.
6. R.Plath, W.Kalkner, I.Krage, “Vergleich von Diagnosesystemen zur Beurteilung des Alterungszustandes PE/VPE-isolierter Mittelspannungskabel“, Elektrizitätswirtschaft J.96 (1997); Heft 20 Seite 1130-1140
7. IEEE 400.2001, “IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems”, Table 2, 2002
8. E. Gulski, J.J. Smit, P.N. Seitz, J.C. Smit, “PD measurements on- site using oscillating wave test system”, IEEE, 1998 pp.420-423 vol.2 [9] H.T. Putter, “Investigation of Water Treeing – Electrical Treeing Transition in Polymeric Insulation of Service Aged Power Cables“, Thesis Delft University of Technology, 2007, Netherlands.
10. G. Hoff, H.G. Kranz, “Isothermal Relaxation Current Analysis: A New Non-destructive Diagnostic Tool for Polymeric Power Distribution Cables”, April 1999 IEEE / PES Panel on Diagnostic Measurement Techniques for Power Cables, New Orleans, USA
11. G. Schmidt, H.G. Kranz, “Grundsätzliche Abgrenzungen und Wechselwirkungen zwischen Alterungs- und Schädigungsdiagnose polymerisolierter Kabel“, März 2004, ETG Köln, Germany
12. M. Beigert, R. Madarasz, “Predictive Maintenance and Proof tests on MV-cables”, DISEE, Slovak Republic, 2000.
13. S. Hvidsten, J.T. Benjaminsen, “Condition assessment of water tree aged XLPE cables, comparison of four commercial methods”, Trondheim, Norway 2000.
14. R. Patsch, O. Kouzmine, “P-factor, A meaningful Parameter for the evaluation of return voltage measurements”, CEIDP Cancun, Mexico 2002.

15. F.J. Wester, "Condition Assessment of Power Cables Using PD Diagnosis at Damped AC Voltages", ISBN 90-8559-019-1, Ph.D. thesis, TU Delft, The Netherlands.
16. E. Gulski, J. Smit, F. Petzold, P. Seitz, E.Groot, "Integral Insulation Diagnosis of Distribution Power Cables", CMD (International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis) 2006 Korea.
17. E. Gulski, F.J. Wester, W. Boone, N. van Schaik, E.F. Steennis, E.R.S. Groot, J. Pellis, B.J. Grotenhuis, "Knowledge Rules Support for CBM of Power Cable Circuits" Cigre Paris 2002, SC 15 paper 104
19. Кустов А. Существует ли в России диагностика силовых кабельных линий и электрооборудования... и зачем она нужна / Энергетика и промышленность России. 2006. № 8 (72).
20. Németh, E.: Zerstörungsfreie Prüfung von Isolatio- nen mit der Methode der Entlade- und Rückspan- nungen. IWK'66, Ilmenau, Germany, (1966), 87-91
21. Bognar, A.; Kalocsai, L.; Csepes, G.; Nemeth, E.; Schmidt, J: Diagnostic Tests of High Voltage Oil- Paper Insulating Systems (In Particular Transformer Insulation) using DC Dielectrometrics, CIGRE'90, Paris, France, (1990), 15/33-08
22. Németh, E.: Practical experiences of diagnostic test- ing of power cable lines by the voltage-response method. IWK'95, Ilmenau, Germany, (1995), 699- 708
23. Zaengl, W. S.: Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment, Part I: Theoretical Considerations. IEEE EI-Mag., 19, No. 5, (2003), 5-19
24. Zaengl, W. S.: Applications of Dielectric Spectros- copy in Time and Frequency Domain for HV Power Equipment. IEEE EI-Mag., 19, No. 6, (2003), 9-22
25. Urbani, G.M.; Brooks, R.S.: Using the Recovery Voltage Method to evaluate Aging in Oil-Paper In- sulation. ICSD'98, Västeras, Sweden, (1998), 93-7
26. Houhanessian, V.D.: Measurement and Analysis of Dielectric Response in Oil- Paper Insulations Sys- tems. PhD-Thesis, ETH Zürich, Switzerland, (1998)
27. Beigert, M.; Kamenka, D.; Kouzmine, O.: Dielek- trische Alterungsdiagnose an Öl- Papier-Iso- lierungen. EVU-Betriebspraxis, 10, (2000), 22-30
28. Curie, J. : Recherches sur la conductivité des corps cristallisés. Ann. De Chimie et de Physique, Sixième Série, Tome 18, (1889), 203-269
29. E. v. Schweidler: Studien über die Anomalien im Verhalten der Dielektrika. Ann. D. Physik, 4. Folge, Bd. 24. (1907), 711-70
30. Alekseev, B. A.: A new method for detecting mois- ture in the insulation of transformer windings. Elek- trichestvo, No.2, (1959),58-63

31. Oommen, T.V.: Moisture Equilibrium Charts for Transformer Drying Practice. IEEE Trans. on PAS, Vol.103, (1984), 3063-67
32. Böning, P.: Bemerkenswerte Zusammenhänge zwischen den anomalen Strömen, dem Verlustfaktor, der scheinbaren Kapazität und der Rückspannung bei Isolierstoffen. Z. f. techn. Physik, Nr. 8, (1938), 241-7
33. Patsch, R.; Kouzmine, O.: p-Factor, a Meaningful Parameter for the Evaluation of Return Voltage Measurements. CEIDP'02, Cancun, Mexico, (2002), 906-9
34. Patsch, R.; Kouzmine, O.: The Influence of Climatic Conditions on the Diagnostic Results of Return Voltage Measurements. ISEI'02, Boston, USA, (2002), 191-4
35. Patsch, R.: Space Charge Phenomena in Polyethylene at High Electric fields. J. Phys. D: Appl. Phys., 23, (1990), 1495-1505
36. Gäfvert, U.; Adeen, L., Tapper, M., Ghasemi, P., Jönsson, B.: Dielectric Spectroscopy in Time and Frequency Domain Applied to Diagnostics of Power Transformers. ICPADM'2000, Xian, China, (2000), 825-30
37. Gäfvert, U.: Influence of Geometric Structure and Material Properties on Dielectric Frequency Response of Composite Oil Cellulose Insulation. ISEIM'05, Kitakyushu, Japan (2005), 73-6
38. Patsch, R.; Kouzmine, O.: The Influence of the Ambient Temperature on the Diagnostic Response of Paper-Oil Insulated Cables. APTADM'01, Wrocław, Poland, (2001), 34-7