



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS

Kristina Malažinskienė

DALINIŲ IŠLYDŽIŲ KIETOJOJE IZOLIACIJOJE
CHARAKTERISTIKŲ TYRIMAS, DEFEKTO VIETOS
NUSTATYMAS

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas
Lekt. Povilas Valatka

KAUNAS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS
ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA

DALINIŲ IŠLYDŽIŲ KIETOJOJE IZOLIACIJOJE
CHARAKTERISTIKŲ TYRIMAS, DEFEKTO VIETOS
NUSTATYMAS

Baigiamasis magistro projektas
Elektros energetikos sistemos (621H63005)

Vadovas
Lekt. Dr. Povilas Valatka

Recenzentas

Projektą atliko
Kristina Malažinskienė

KAUNAS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir Elektronikos fak.

(Fakultetas)

Kristina Malažinskienė

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos sistemos, 621H63005

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto

„Dalinių išlydžių kietojoje izoliacijoje charakteristikų tyrimas, defekto vietos nustatymas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 16 m. gegužės mėn. 23 d.
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Kristinos Malažinskienės**, baigiamasis projektas tema „Dalinių išlydžių kietojoje izoliacijoje charakteristikų tyrimas, defekto vietos nustatymas“ 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)

Malažinskienė K., Dalinių išlydžių kietojoje izoliacijoje charakteristikų tyrimas, defekto vietos nustatymas. Elektros energetikos sistemų magistro baigiamasis projektas / vadovas lekt. Povilas Valatka; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Kaunas, 2016. 41 psl.

SANTRAUKA

Baigiamajame magistro projekte išanalizuotos dalinių išlydžių charakteristikos ir parametrai kietojoje izoliacijoje. Imitacinis dalinių išlydžių modelis pritaikytas kietojoje izoliacijoje vykstančių dalinių išlydžių charakteristikoms skaičiuoti. Įvesti defekto vietos nustatymo skaičiavimai. Naudojant Doble PD smart įrenginį, tiesioginiams dalinių išlydžių matavimams, atliktas kabelio su kietąja (XLPE) izoliacija bandymas. Bandymo metu imituotas defektas kabelio izoliacijoje. Dėl izoliacijoje esančio defekto, buvo užfiksuoti dalinių išlydžių vyksmai. Gauti parametrai panaudoti dalinių išlydžių charakteristikoms nustatyti. Panaudojus Doble PD smart įrenginio funkciją „Fault Location“, nustatyta defekto vieta kabelio izoliacijoje.

Reikšminiai žodžiai: dalinis išlydis; kietoji izoliacija; gedimo vieta; charakteristika; tyrimas; kabelis.

Malažinskienė Kristina, Investigation of Partial Discharge Characteristics and Fault Location in Solid Insulation, Master's degree of Electrical Power Systems, supervisor lekt. Povilas Valatka; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, department of Electric Power Systems.

Kaunas, 2016. 41 psl.

SUMMARY

The final master's project analyzed partial discharge characteristics and parameters of the solid insulation. Simulation model was adapted to calculate partial discharges characteristics and parameters, including fault location calculation. Doble PD smart device was used for cable of solid insulation (XLPE) testing for direct measurement of partial discharges. The test simulated a defect in the insulation of the cable. Because of the defect, partial discharges were registered. Obtained parameters were used to determine the characteristics of partial discharges. Location of the defect in the cable insulation was determined by using Doble PD smart function "Fault Location".

Keywords: partial discharge; solid insulation; fault location; characteristic; investigation; cable.

TURINYS

ĮVADAS	9
1. KIETOSIOS IZOLIACIJOS CHARAKTERISTIKOS, DALINIŲ IŠLYDŽIŲ SUSIDARYMAS IR TYRIMAS	11
1.1 Aukštos įtampos kabelių su XLPE izoliacija sandara ir charakteristikos	11
1.2 Dalinių išlydžių susidarymas kietojoje izoliacijoje.....	12
1.3 Izoliacijos būklės nustatymo metodai	14
1.4 Atliekami kabelinių linijų bandymai ir matavimai	15
1.5 Kabelių būklės tyrimų apžvalga.....	16
2. KIETOSIOS IZOLIACIJOS BŪKLĖS ĮVERTINIMAS, IMITACINIO MODELIO TIKSLINIMAS.....	19
2.1 Dalinių išlydžių charakteristikų apskaičiavimas ir modeliavimas	19
2.2 Dalinių išlydžių charakteristikų tyrimas	21
2.3 Dalinių išlydžių charakteristikų XLPE ir alyvos izoliacijoje palyginimas	25
2.4 Defekto vietos apskaičiavimas	30
3. KABELIO KIETOSIOS IZOLIACIJOS PARAMETRŲ TYRIMAS, DEFEKTO VIETOS NUSTATYMAS, TIESIOGINIO MATAVIMO BŪDU	32
3.1 Dalinių išlydžių charakteristikų tyrimas	35
3.2 Defekto vietos nustatymas	36
IŠVADOS.....	40
LITERATŪRA.....	41
PRIEDAS Nr. 1 DEFEKTO VIETA KABELYJE.....	43
PRIEDAS NR. 2 DEFEKTO VIETOS NUSTATYMAS KABELYJE.....	54
PRIEDAS NR. 3 REALIOS GEDIMO VIETOS NUSTATYMAS.....	55
PRIEDAS NR. 4 MATLAB PROGRAMOS KODAS	56

ILIUSTRACIJŲ SĄRAŠAS

1.1 pav. Viengyslio 10-35 kV kabelio su polietilene (XLPE) izoliacija sandara	11
1.2 pav. Defekto susidarymo eiga	13
2.1 pav. Dalinių išlydžių kietojoje (XLPE) izoliacijoje schema:.....	19
2.2 pav. Dalinis išlydis izoliacijoje, fazių atvaizdavimas	21
2.3 pav. Dalinių išlydžių charakteristikos XLPE izoliacijoje, kai $D=0,5$ mm	22
2.4 pav. Dalinių išlydžių charakteristikos XLPE izoliacijoje, kai $D=1$ mm	23
2.5 pav. Dalinių išlydžių charakteristikos XLPE izoliacijoje, kai $D=1,4$ mm	24
2.6 pav. DI srovės impulsų vyksmai, kai defektų skersmuo kinta 0,5, 1 ir 1,4 mm	24
2.7 pav. Defekto savitosios talpos priklausomybė nuo defekto dydžio izoliacijoje	26
2.8 pav. Defekto pramušimo įtampos priklausomybė nuo defekto dydžio izoliacijoje	27
2.9 pav. Įtampos, pirmojo izoliacijos pramušimo metu, priklausomybė nuo defekto dydžio izoliacijoje	28
2.10 pav. Dalinių išlydžių tariamojo krūvio priklausomybė nuo defekto dydžio izoliacijoje	28
2.11 pav. Dalinių išlydžių energijos priklausomybė nuo tariamojo krūvio	29
2.12 pav. Tiesioginio ir atspindžio impulso sklidimo eiga	30
2.13 pav. Impulso atsispindėjimas	30
3.1 pav. Dalinių išlydžių bandymo stendas	33
3.2 pav. Tiriamas kabelis su XLPE izoliacija	33
3.3 pav. Tiriamo kabelio principinė sujungimų schema	34
3.4 pav. Defekto imitavimo schema.....	34
3.5 pav. Daliniai išlydžiai 10 kV kabelyje su XLPE izoliacija	35
3.6 pav. Įtampos ir dalinių išlydžių kitimas bandymo metu	35
3.7 pav. Dalinių išlydžių energijos pasiskirstymas tarp fazės kampų.....	36
3.8 pav. Dalinių išlydžių tariamojo krūvio pasiskirstymas tarp fazių.....	36
3.9 pav. Defekto vieta kabelio ilgyje	38
3.10 pav. Defekto vieta nustatyta bandymo metu	38
3.11 pav. Realiomis sąlygomis nustatyta defekto vieta.	38

LENTELIŲ SĄRAŠAS

2.1 lentelė Kabelio techninė specifikacija.....	20
2.2 lentelė. Dalinių išlydžių XLPE ir alyvos izoliacijoje charakteristikos	25
3.1 lentelė. Defekto vieta kabelio ilgyje.....	37

SANTRUMPOS

DI	Daliniai išlydžiai
XLPE	Sausa polietileno izoliacija
AB „ESO“	Akcinė bendrovė „Energijos skirstymo operatorius“

ŽYMĖJIMAI

U_p	Izoliaciją veikianti įtampa
D	Defekto skersmuo
s	Defekto atstumas iki elektrodo
C_{DI}	Defekto savitoji talpa
C_{id}	Kietosios izoliacijos talpa išlydžio srovės kelyje
C_{iz}	Kietosios izoliacijos talpa, priklausanti nuo laidininko geometrinių savybių
U_k	Defekto kietojoje izoliacijoje pramušimo įtampa
i_d	Išlydžio srovė
ϵ	Dielektrinė skvarba
E_0	Elektrinio lauko stipris
τ	Parinkta dalinio išlydžio srovės impulso trukmė
U_{DI}	Defektą izoliacijoje veikianti įtampa
I_{dm}	Srovės šuolis kondensatorių persikrovimo metu
q	Dalinių išlydžių tariamasis krūvis
W	Dalinių išlydžių energija
U_{DIpr}	Įtampa, kurios reikia defekto tarpeliui pramušti
I_d	Srovės šuolio amplitudė
t_1	Tiesioginio impulso sklidimo laikas
t_2	Impulso atspindžio laikas
ΔT	Laiko skirtumas
L	Laikas per kurį impulsas nukeliaujanuo kabelio pradžios iki pabaigos
PD%	Dalinio išlydžio vieta kabelio ilgyje procentais
Lg	Defekto vieta kabelio ilgyje
l	Kabelio ilgis

IVADAS

Lietuvos elektros tinkle plačiausiai išvystytas 10-0,4 kV kabelinių linijų tinklas. 10 kV kabeliuose naudojama įvairi izoliacija: elektrotechninis popierius, alyva, sausa polietileno izoliacija. Pastaruoju metu, dėl savo gerų izoliacinių savybių, atsparumo aplinkos poveikiui, paprastesnio montavimo, vis plačiau naudojami kabeliai su polietileno (XLPE) izoliacija. Tokio tipo kabeliai naudojami naujų kabelinių linijų tiesimui. Kabelinės linijos plačiai naudojamos, dėl mažos įtakos išorinių objektų statybai, saugesnės žmonėms eksploatacijos, mažesnio avaringumo, taip pat lyginant su oro linijomis, negadina kraštovaizdžio. Tačiau kabelinių linijų remontas ir gedimų paieška sudėtingesnė už oro linijų.

Elektros įrenginių izoliacija nepriklauso nuo atmosferos sąlygų, arba yra mažai veikiama. Vis dėl to eksploatacijai trunkant ilgą laiko tarpą, arba netinkamai eksploatuojant elektros įrenginius, jų izoliacija sensta. Izoliacijai senėjant, blogėja jos dielektrinės savybės. Dėl kabelinių linijų montavimo specifikos, ilgoms kabelių linijoms montuojamos jungiamosios movos, o kabelio galams apdirbti naudojamos galinės movos. Nesilaikant kabelio sujungimo ir galų apdirbimo technologijos, movų vietose padidėja tikimybė įvykti kabelio gedimui. Laikui bėgant šiuose kabelio sujungimuose, intarpuose, ar kitose pažeistose vietose, atsiradus oro tarpui, oras jonizuojasi ir susidaro daliniai išlydžiai, pereinantys į šliaužiamuosius. Daliniai išlydžiai gadina, ardo įrenginių izoliaciją. Blogėjant izoliacinėms savybėms, izoliacija kaista, todėl kabelis nepakankamai aušinamas praranda dielektrines savybes, įvykus izoliacijos pramušimui, gali būti sugadintas negrįžtamai. Taigi eksploatuojant elektros įrenginius, būtina kontroliuoti izoliacijos būklę.

Kietosios izoliacijos kokybės nustatymas yra aktuali problema, kurios sprendimui naudojami įvairūs metodai. Tiriant, vykstančių dalinių išlydžių charakteristikas, galima tiksliau įvertinti izoliacijos būklę, defekto pobūdį. Stebint izoliacijos būklę, nustatant defektus ir jų pobūdį, vykdoma gedimų prevencija, kuri leidžia prailginti įrenginių saugią eksploataciją, atnaujinti izoliacijos resursą, planuoti remonto darbus, tikslingiau panaudoti lėšas. Tačiau bandymai paaukštinta įtampa, gadina kabelių izoliaciją ir mažina jos resursą. Magistriniame darbe tiriamos kietosios izoliacijos charakteristikos, kurios gali padėti nustatyti izoliacijos būklę. Atliekamas tiesioginis dalinių išlydžių matavimas, nustatoma defekto kabelio izoliacijoje vieta.

Problema:

Praktikoje taikomi defekto aptikimo metodai, kurie gadina elektros įrenginių izoliaciją, tačiau nenustato izoliacijos būklės ir tikslios defekto vietos.

Tikslas: Ištirti kietojoje izoliacijoje vykstančių dalinių išlydžių charakteristikas, galinčias padėti nustatyti izoliacijos būklę ir defekto vietą izoliacijoje.

Uždaviniai:

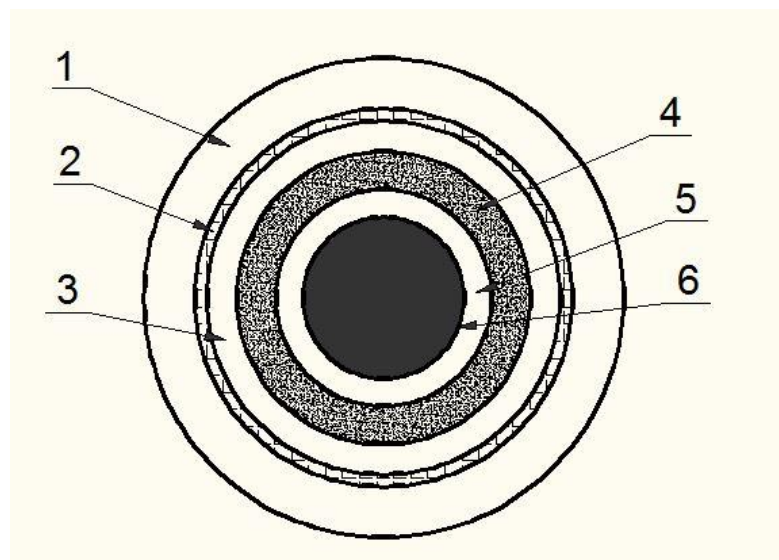
- Išanalizuoti kietojoje izoliacijoje vykstančių dalinių išlydžių charakteristikas, galinčias padėti nustatyti izoliacijos būklę;
- Patikslinti imitacinį dalinių išlydžių modelį kietajai (XLPE) izoliacijai. Imitacinį modelį papildyti defekto vietos nustatymo skaičiavimais.
- Atlikti kabelio bandymą, tiesiogiai matuojant dalinius išlydžius. Nustatyti defekto vietą kabelyje.

1. KIETOSIOS IZOLIACIJOS CHARAKTERISTIKOS, DALINIŲ IŠLYDŽIŲ SUSIDARYMAS IR TYRIMAS

1.1 Aukštos įtampos kabelių su XLPE izoliacija sandara ir charakteristikos

Kabelių linijų svarbiausias elementas yra jų izoliacija, kuri turi būti patikima. Pagrindinė kabelių izoliacija būna plastikinė arba iš popieriaus. 10-35 kV kabeliuose su alyvine, popierine ar plastikine izoliacija defekto vystymosi greitis priklauso nuo elektrinio lauko stiprio, susidariusio izoliacijos defekto vietoje, ir nuo defekto pobūdžio.

Magistriniame darbe, tiriamas vidutinės įtampos 10 kV įtampos kabelis, suvytas iš trijų 1.1 pav. pavaizduotų kabelių ir neizoliuotos varinės gyslos. Šie kabeliai yra skirti kloti žemėje ir atvirame ore. Tokio tipo kabeliai naudojami, tiesiant naujas kabelines linijas 10/0,4 kV tinkle. Pagal AB „ESO“ keliamus techninius reikalavimus kabeliai turi atitikti LST HD 620 arba IEC 60502-2 standartą [1].



1.1 pav. Viengyslio 10-35 kV kabelio su polietilenine (XLPE) izoliacija sandara:

1 – polietileninis apsauginis kabelio sluoksnis; 2 – varinis ekranas, 3 - pusiau laidži drėgmei medžiaga, kartu su izoliaciniu variniu ekranu; 4 – polietileninė izoliacija; 5 – puslaidininkinis ekranas iš drėgmei nelaidžios medžiagos; 6 – aliuminio arba vario gysla.

Kabelis sudarytas iš daugiagyslių aliuminių ar varinių laidininkų, kurie suvyti į kabelio gyslą (1.1 pav). Gyslą dengia pusiau laidūs ekranai, kurie kartu su izoliacija tolygiai užpildo erdvę apie gyslą. Taip kabelis apsaugomas nuo dalinių išlydžių susidarymo oro tarpuose, tarp gyslos ir ekrano. Kabelio ekranas apsaugo kabelį, įžemėjimo srovę praleisdamas į žemę, kabelio izoliacijoje tolygiai paskirsto elektrinio lauko stiprumą [2].

Kietųjų dielektrikų vidinė struktūra yra gana sudėtinga, todėl juos veikiant elektriniu lauku, vyksta visų rūšių poliarizacija. Atsižvelgiant į techninius poreikius, kietajai izoliacijai, įmaišoma kitų elementų. Taip keičiama izoliacinės medžiagos dielektrinė skvarba. Kietosios XLPE izoliacijos dielektrinė skvarba $\epsilon=2,3$ F/m [3].

Dažniausiai kabeliai gaminami 500 m ilgio ir susukami į būgną, kad kabelis būtų apsaugotas transportavimo ir klojimo darbų metu nuo per didelių įlinkių ir laužimų. Tiesiant ilgesnę nei 500 m ilgio kabelinę liniją, kabeliai sujungiami specialiomis jungiamosiomis movomis, o jų galai apdirbami ir sumontuojamos galinės movos. Movas sumontuoti, nepažeidus kabelio techniškai sudėtinga, todėl rekomenduojama, movomis sujungimų daryti kuo mažiau. Tačiau įvykus kabelio gedimui, pažeista kabelio vieta iškerpama ir sumontuojamas naujo kabelio intarpas su dviem jungiamosiomis kabelio movomis. Taip mažinamas kabelio atsparumas ir sutrumpėja kabelio tarnavimo laikas, nes nekokybiškai sumontavus movas padaugėja dalinių išlydžių. Tokių kabelių toliau eksploatuojant arba atliekant periodinį kabelio bandymą paaukštinta įtampa, tikėtinas gedimas movos vietoje dėl atsiradusių dalinių išlydžių [2].

Pagrindinės izoliacijos senėjimo priežastys:

- įtampos poveikis (viršįtampiai, žaibo smūgiai, daliniai išlydžiai);
- šiluminis poveikis (apkrovos sąlygomis);
- mechaninės jėgos (tempimas, lenkimas, pamato sėdimas);
- cheminė korozija (vandens, druskos, alyvos poveikis ir dujų tarša);
- išorės poveikis (aplinkos tarša, vandens patekimas).

Pagrindiniai kabelių su XLPE izoliacija pažeidimo tipai:

- išoriniai izoliacijos pažeidimai, kuriuos sukelia kabelio klojimo technologijos nesilaikymas (netinkamas galinių ir jungiamųjų movų montavimas);
- vidinis izoliacijos pažeidimas dėl netaisyklingos eksploatacijos (bandymai nuolatine paaukštinta įtampa) arba izoliacijos senėjimo;
- kabelio apsauginio ekrano pažeidimas;
- kabelio gyslų pažeidimas.

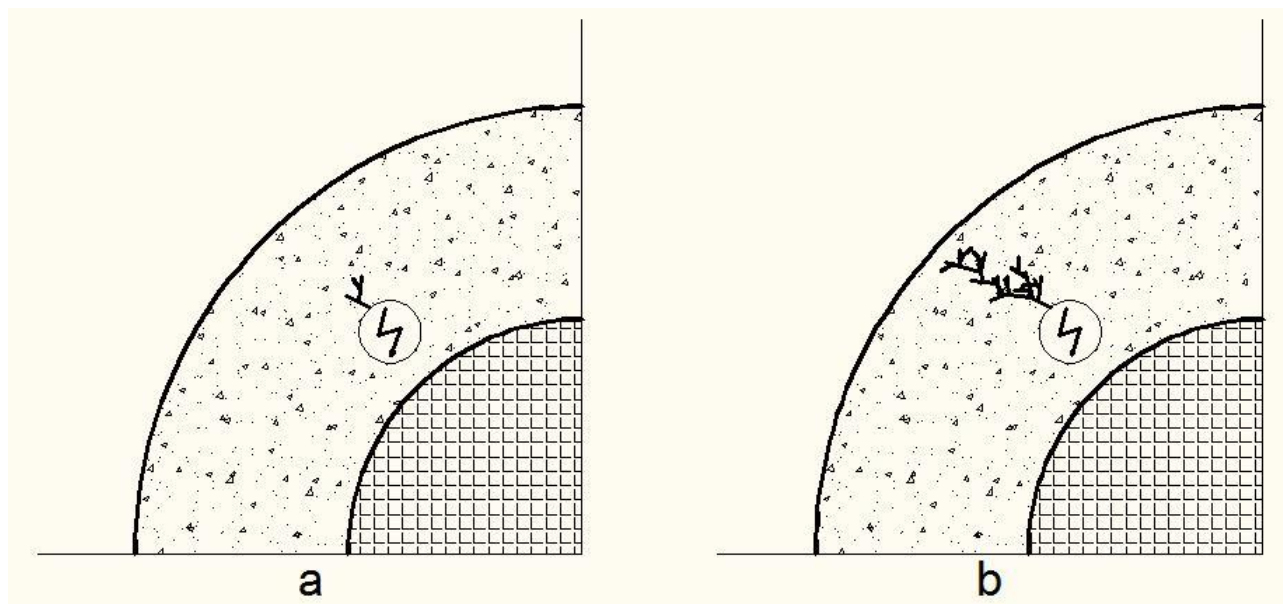
1.2 Dalinių išlydžių susidarymas kietojoje izoliacijoje

Veikiant daliniams išlydžiams, izoliacija priklausomai nuo įrenginių eksploatavimo trukmės, netenka savo izoliacinių savybių. Toks procesas vadinamas izoliacijos senėjimu. Kietosios izoliacijos senėjimas yra negrįžtamas procesas. Besivystantis izoliacijos senėjimas yra pavojingas tuo, kad eksploatuojant įrenginius nuolat vyksta sunkiai nustatomi daliniai išlydžiai. Dėl to izoliacija gali būti pramušama [4].

Aukštos įtampos įrenginių izoliacija gali būti pramušama dėl elektrinio arba terminio poveikio. Tačiau izoliacijos pramušimas gali įvykti ir nepasiekus elektrinio ar temperatūrinio poveikio atsparumo ribos dėl dalinių išlydžių izoliacijos viduje. Tokie daliniai išlydžiai vyksta susidariusiose erdmėse tarp izoliacijos sluoksnių.

Vykstančių dalinių išlydžių elektrinis lauko stipris pasiekia didesnę lygį už tą, kurią gali atlaikyti izoliacinė medžiaga, nes jos elektrinis atsparumas mažesnis. Toks izoliacijos irimas vadinamas dendritiniu.

Izoliacijos defekto vystymosi greitis priklauso nuo elektrinio lauko stiprio, susidariusio izoliacijos defekto vietoje, ir nuo defekto pobūdžio. Defekto vystymosi eiga pavaizduota kabelio skerspjūvyje 1.2 pav. Izoliacijai senėjant, netinkamai eksploatuojant ar gamybos metu izoliacijoje atsiradus defektui, įtrūkimui, oro burbuliukui ar kt. Kai oro tarpas patenka į stiprų elektrinį lauką prasideda jonizacija defekto viduje ir vystosi daliniai išlydžiai 1.2 a. pav. Prasidėjus daliniams išlydžiams ir elektros įrenginį eksploatuojant toliau, defektas plinta, prasideda šliaužiantysis išlydis – dendritas. 1.2 b. pav. Toliau eksploatuojant įrenginį, izoliacija pramušama ir toks įrenginys tampa avarinės būklės [4].



1.2 pav. Defekto susidarymo eiga: a-įvyksta dalinis išlydis, išsivystė elektrai laidus kanalas, b – besivystantis defektas, šliaužiantysis išlydis.

Taigi, vidiniai daliniai išlydžiai (kietųjų dielektrikų viduje) yra laikomi pavojingiausiais ir labiausiai kenkiančiais izoliacijai veiksniais. Vidiniai daliniai išlydžiai yra sunkiai aptinkami ir kontroliuojami. Dėl šios priežasties vis stiprėjantys daliniai išlydžiai stipriai blogina izoliacines savybes ir spartina izoliacijos senėjimą. Dalinių išlydžių lygis senstant izoliacijai didėja vidutiniškai 5-8 proc. per metus.

1.3 Izoliacijos būklės nustatymo metodai

Energetikos sistemos veikimo patikimumas priklauso nuo elektros įrenginiu patikimo darbo. Elektros įrenginiu būklės įvertinimui ir atsirandantiems defektams prognozuoti yra taikomi įvairūs periodinės ar nuolatinės stebėsenos metodai, kuriais nustatomi atsirandančių defektų generuojami trikdžiai ir stebimos susidarantys šalutiniai produktai. Gana paprasta ir efektyvi elektros įrenginių kokybės ir patikimumo užtikrinimo sistema yra periodiniai patikrinimai, nustatantys įrenginių defektus.

Periodinė stebėsenos sistema - kai periodiškai registruojamas parametrų rinkinys (izoliacijos varžos, nuostolių kampas $\text{tg}\delta$, įvairių ištirpusių dujų kiekis izoliacinėje alyvoje ir kt.) ir vertinami jų kitimo dėsningumą, kai nuolat stebimas vienas parametras (pvz., $\text{tg}\delta$), apimantis daug galimų defektų. Galima vertinti grupę vienos rūšies parametrų (įvairių dujų kiekius), iš kurių santykio nustatomas galimas izoliacijos defektas, arba visa kompleksą įvairių parametrų (temperatūrą įvairiuose taškuose, daliniai išlydžiai, dujų kiekis). Gali būti įvertinami inertiški izoliacijos būklės kitimą sąlygojantys parametrai, kurių kitimo vyksmas lėtas ($\text{tg}\delta$, izoliacijos varža, elektrinė talpa ir kt.), arba dinamiški parametrai, kai dėl staigaus įtampos ar srovės pokyčio atsiranda įvairių bloginančių izoliacijos kokybę produktų (išsiskiriančios dujos, nuosėdos ir kt.) [5].

Nuolatinės įrenginių būklės sekimo metodai skirstomi į [5]:

• dalinių išlydžių įtakos izoliacijai analizė:

DI vyksmų vyksta skystosios ir kietosios izoliacijos intarpuose, dujiniuose mikrosluoksniu sujungimuose ar įtrūkimuose. Juose esantys elektriniai laukai silpnesni, negu skystoje ar kietoje įrenginio izoliacijoje. Bendroju atveju DI atsiranda kaip impulsai, kurių trukmė yra mažesnė nei 1 μs .

• izoliacinės alyvos analizė:

Izoliacinės alyvos tyrimai gali būti skirstomi į dvi kategorijas: naudojamos izoliacinės alyvos analizė ir izoliacinėje alyvoje nustatytų senėjimo dalelių analizė. Taikant naudojamos izoliacinės alyvos analizę, nustatomi alyvos kokybiniai rodikliai ir parodoma, ar ji tinkama toliau naudoti. Taikant senėjimo dalelių analizę, nustatoma kietosios izoliacijos būklė, kuri yra susijusi su izoliacine alyva. Atlikus senėjimo dalelių analizę, galima nustatyti kietųjų dalelių sudėtį, įvertinti esančių dalelių tipą, dydį, koncentraciją, pasiskirstymą ir morfologiją.

• vibracinių charakteristikų analizė:

Elektros įrenginiu defektai gali būti nustatyti matuojant vibracijų parametrus: švytavimų amplitudę, švytavimų dažnį ir kt.

• temperatūros stebėjimo metodas:

Elektros įrenginių ir srovėlaidžių įšilimo, dėl darbo sąlygų ir konstrukcijos būklė įvertinama temperatūros normomis (temperatūros perviršiu, pertekline temperatūra, defekto koeficientu,

temperatūros kitimu laike, keičiantis apkrovai), lyginant išmatuotą temperatūrą fazės aplinkoje, bei tarp gretimų fazių su akivaizdžiai gerais elementais ar kitais tokio paties tipo įrenginiais ir pan.

Kokybei tirti taikomi įvairūs būdai ir metodai sudaro izoliacijos tyrimo sistemą, - diagnostinę struktūrą. Izoliacijos kokybės tyrimo sistema susideda iš matavimo, duomenų kaupimo, analizės ir apibendrinimo metodikų. Kiekvienam aukštosios įtampos įrenginių tipui taikomi diagnostikos metodai, atitinkantys izoliacijos ypatumus, konstrukciją ir nemažinantys resurso. Šiuo metu dažniausiai diagnostikos metodais tiriami dielektriniai, fiziniai ir cheminiai parametrai. Tiriant kombinuotosios izoliacijos kokybę, nustatomi parametrai, parodantys bendrąsias (viso izoliacijos komplekso) ir savitąsias (atskiro izoliacijos komponento ar sluoksnio) savybes.

Bendrujų izoliacijos savybių tyrimams naudojami šie diagnostikos metodai:

- dielektrinių nuostolių matavimo;
- izoliacijos varžos matavimo ir absorbcijos koeficiento nustatymo;
- talpio matavimo;
- veikiančių įrenginių termografinės analizės;
- dalinių išlydžių registravimo (akustinis, elektromagnetinis ir tiesioginis metodai).

1.4 Atliekami kabelinių linijų bandymai ir matavimai

Laikantis IEC 60840 standarto, visi pagaminti įrenginiai bei kabeliai turi būti išbandomi ir atitikti gamintojo pateiktus gaminio sertifikatus, atitikties deklaracijas [5]. Prieš pradėdant eksploatuoti naujas vidutinės ir aukštos įtampos kabelių linijas, pagal anksčiau minėtą standartą, būtina atlikti kabelių bandymą paaukštinta įtampa. Kabelis bandomas 50 Hz dažnio vardine įtampa. Taip pat fazinės įtampos (U_f) impulsas bandymo metu (1,0-1,73) U_f . Galima bandymo trukmė ir vardinė įtampa nustatoma gamintojo. Lietuvoje 10 kV kabelinių linijų tinkle daugiausiai naudojami kabeliai su popieriaus – alyvos arba XLPE izoliacija. Eksploatuojamos kabelinės linijos, turi būti periodiškai bandomos minėtu metodu. Bandymo paaukštinta įtampa periodiškumas priklauso nuo kabelių eksploatavimo vietos ir įtampos. Nagrinėjami magistriniam darbe vidutinės įtampos 3-35 kV įtampos kabeliai bandomi [5]:

- maitinantieji atsakingus vartotojus – 1 kartą per 2 metus;
- esantys transformatorių pastočių ir skirstyklų teritorijoje (savųjų reikmių) – kompleksiskai remontuojant pastotes, bet ne rečiau kaip 1 kartą per 8 metus;
- elektrinių kabeliai, maitinantieji pagrindinių įrenginių mechanizmus (pagrindinių mechanizmų sąrašai tvirtinami technikos vadovo nustatyta tvarka) – remontuojant įrenginį, bet ne rečiau kaip 1 kartą per 4 metus;

- elektrinių kabeliai, turintys jungiamąsias movas arba kurių galinės movos sumontuotos skirtingame aukštyje (aukščiau skiriasi daugiau kaip 10 m), – kas 2 metai. Reikalavimas netaikomas kabeliams su XLPE izoliacija;
- avaringi kabeliai – rekomenduojama 1 kartą per metus. Avaringas kabelis yra toks, kuris per paskutinius 5 metus gedo 4 ir daugiau kartų.

Jeigu bandymo metu, kabelio izoliacija nepramušama ir neatsiranda gedimų, tuomet kabelis laikomas tinkamu eksploatuoti. Tačiau kiekvieną kartą atliekant, tokio tipo bandymą kabelio izoliacija gadinama ir mažėja jo saugios eksploatacijos trukmė.

1.5 Kabelių būklės tyrimų apžvalga

Dalinių išlydžių matavimas suteikia vertingos informacijos, vertinant aukštos įtampos izoliacijos būklę, padeda užtikrinti reikiamą izoliacijos kokybę. Skirtingos dalinių išlydžių matavimo technologijos buvo intensyviai plėtojamos pastaraisiais metais, ypatingai vystomos tiesioginės stebėsenos sistemos.

Matuojant tiesiogiai dalinių išlydžių signalus ir juos apdorojant, yra galimybė gauti tikslią izoliacijos gedimo diagnozę, tačiau būtina tinkama defektų aptikimo ir analizės metodika. Autoriai: Alvarez F; Garnacho F; Ortego J aprašo optimizuotą elektromagnetinį defekto aptikimo metodą, kuris remiasi, kombinuotų plačiajuosčių PID jutiklių atliekamais HF ir UHF dažnių diapazonuose, matavimais ir rezultatų apdorojimu. Autorių atliekamas bandymas ir analizė remiasi IEC 60270 standarto rekomendacijomis, kurios yra skirtos aukštos įtampos įrenginių tyrimams, kai dažnis nesiekia 1 MHz [6].

HFCT jutikliai – plačiai naudojami dalinių išlydžių aptikimui, taip pat jų vietos ir gedimo izoliacijoje nustatymui. HFCT jutiklis taip pat vadinamas radijo dažnių srovės keitikliu (RFCT), kuris susideda iš indukcinės ritės su feromagnetine šerdimi. Taikomas pereinamųjų signalų kaip DI arba impulsų formos triukšmams, trikdžiams matuoti[6].

Naudojant HFCT jutiklius autoriai atliko bandymus imituodami defektus kabelio izoliacijoje. Defektai buvo išskirti į grupes:

- Talpa, susidariusi kabelio puslaidininkiniame sluoksnyje, bandyme imituota padarius 1,5 mm gylio išilginį pjūvį XLPE izoliacijoje. Eksploatuojant kabelius toks defektas gali susidaryti netinkamai sujungus kabelius movomis, paruošiant kabelio galuose galines movas.
- Ertmė, susidariusi tarp kabelio izoliacijos sluoksnių, bandyme defektas imituotas suraizant kabelio puslaidininkinę izoliaciją 1,5 mm gylio ir 1 mm skersmens rėžiais. Tuomet sudaryti defektai užtepami puslaidininkiniu laku ir pritvirtinamas viršutinis apsauginis kabelio

sluoksnis. Šis defektas atsiranda kai kabelio gamybos arba eksploataavimo metu atsiranda tuštumos kabelio izoliacijoje.

- Koronos poveikis izoliacijai buvo tiriamas pritvirtinus išorinę talpą, kuri susideda iš smailiojo ir plokščiojo elektrodo. Tarp elektrodų esantis oro tarpas pramušamas.

HFCT daviklis naudojamas daliniams išlydžiams registruoti ir jų priežasčiai nustatyti. Atliekant kabelio tyrimą, atskiriami atsiradę triukšmai ir trikdžiai nuo dalinių išlydžių, vykstančių kabelio izoliacijoje, dėl izoliacijos pažeidimo. Tiriant didelį kiekį impulsų ir iš atskirų šaltinių, impulsai išrūšiuojami ir išskiriami atskiri defektai [6].

Autoriai A. Haddas ir D.F. Warne aprašo akustinius dalinių išlydžių matavimo metodus. Išskiriami pagrindiniai metodai [7]:

- Bandomo grandinė pagal IEC 270 standartą - per matavimo grandinę teka srovė ir registruojamas krūvis. Naudojant detektorius matuojamas DI srovės impulsas, kuris į matavimo įrenginį grįžta per 1 ns. Detektorius užfiksuoja impulso atsispindėjimą nuo defekto vietos. Jeigu defekto nėra, impulsas neatsispindi ir sunyksta. Tam, kad tiksliau nustatyti gedimo vieta, matavimo grandinė dalinama į keletą sekcijų ir palaipsniui nustatoma gedimo vieta.
- UHFC metodas – vykstant daliniams išlydžiams izoliacijoje, elektromagnetinis laukas per 1 ns pradeda spinduliuoti elektromagnetines bangas, kurių energijos spektrai siekia 2000MHz ar daugiau. Gaunami įvairių rūšių elektros rezonansai, kurie dėl sąlyginai mažos talpos, gali tęstis iki 1ms. Gauti rezonansai parodo vykstančius dalinius išlydžius, analizuojant elektromagnetinių bangų spektrinę analizę.

Dalinių išlydžių matavimo akustiniu metodu privalumas – detektoriaus jautrumas. UHF įranga tinkama, vykdant įrenginių periodinį stebėjimą, dalinių išlydžių monitoringą. Akustiniams matavimams svarbu, kad signalas nebūtų slopinamas matavimo atkarpoje. Taip pat akustinis matavimas galimas tik išoriniams įrenginiams, todėl netinkamas dalinių išlydžių stebėjimui kabelinėse linijose [7].

Elektros įrenginių būklės įvertinimui ir atsirandantiems defektams prognozuoti yra taikomi įvairūs periodinės ar nuolatinės stebėsenos metodai, kuriais nustatomi atsirandančių defektų generuojami trikdžiai ir stebimos susidarantys šalutiniai produktai. Gana paprasta ir efektyvi elektros įrenginių kokybės ir patikimumo užtikrinimo sistema yra periodiniai patikrinimai, nustatantys įrenginių defektus [8].

Autorius P. Valatka patikslina periodinės ir nuolatinės stebėsenos būdus. Izoliacijos būklei įvertinti. Periodinė stebėsenos sistema - kai periodiškai registruojamas parametru rinkinys (izoliacijos varžos, nuostolių kampas $\tan \delta$, įvairių ištirpusių dujų kiekis izoliaciniame alyvoje ir kt.)

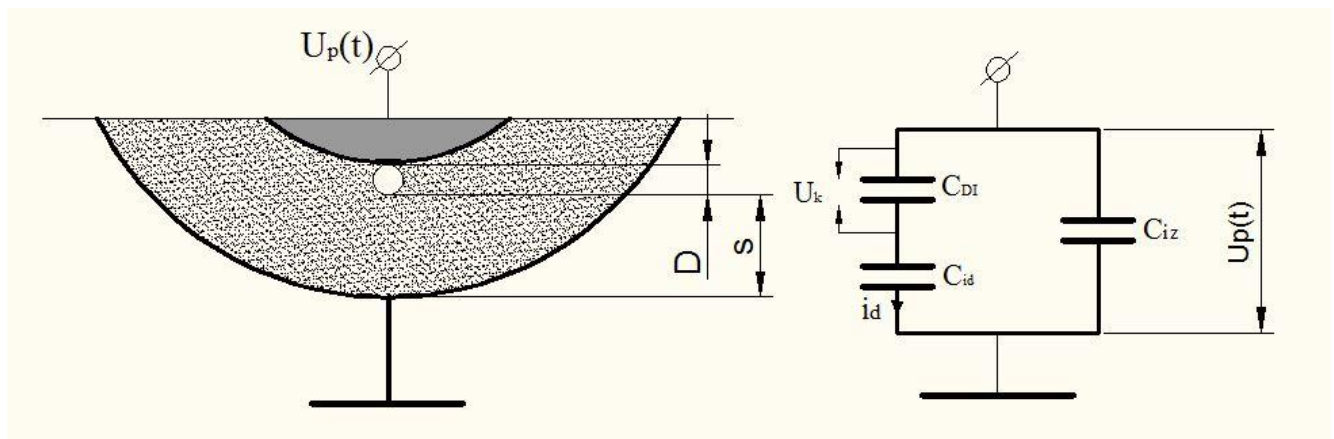
ir vertinami jų kitimo dėsningumai, kai nuolat stebimas vienas parametras (pvz. tgδ), apimantis daug galimų defektų. Galima vertinti grupę vienos rūšies parametrų (įvairių dujų kiekius), iš kuriu santykio nustatomas galimas izoliacijos defektas, arba visa kompleksą įvairių parametrų (temperatūrą įvairiuose taškuose, daliniai išlydžiai, dujų kiekis). Gali būti įvertinami inertiški izoliacijos būklės kitimą sąlygojantys parametrai, kurių kitimo vyksmas lėtas (tgδ, izoliacijos varža, elektrinė talpa ir kt.), arba dinamiški parametrai, kai dėl staigaus įtampos ar srovės pokyčio atsiranda įvairių bloginančių izoliacijos kokybę produktų (išsiskiriančios dujos, nuosėdos ir kt.) [8].

Magistriniame darbe tiriamas 10 kV kabelis su kietąja XLPE izoliacija. Tyrimui pasirinktas tiesioginės stebėsenos metodas, naudojant Doble PD smart įrenginį.

2. KIETOSIOS IZOLIACIJOS BŪKLĖS ĮVERTINIMAS, IMITACINIO MODELIO TIKSLINIMAS

2.1 Dalinių išlydžių charakteristikų apskaičiavimas ir modeliavimas

Naudojantis Matlab programinėje įrangoje sudarytu dalinių išlydžių modeliu, aprašytu autoriaus [8], magistriniame darbe tiriami daliniai išlydžiai ir jų charakteristikos kietojoje polietileno (XLPE) izoliacijoje, tikslinamas modelis. Matlab programos kodas pateiktas priede Nr.4. Daliniams išlydžiams, kietojoje izoliacijoje modeliuoti, pasirinkta schema pateikta 2.1 pav.



2.1 pav. Dalinių išlydžių kietojoje (XLPE) izoliacijoje schema:

Schemeje pateikti dydžiai: $U_p(t)$ – izoliaciją veikianti įtampa; D – defekto skersmuo; s – defekto atstumas iki elektrodo; C_{DI} – defekto savitoji talpa; C_{id} – kietosios izoliacijos talpa išlydžio srovės kelyje; C_{iz} – kietosios izoliacijos talpa, priklausanti nuo laidininko geometrinių savybių (kabelio ilgio); U_k – defekto kietojoje izoliacijoje pramušimo įtampa; i_d – išlydžio srovė.

Modelis sudarytas sujungus nuosekliai du kondensatorius. Defektą imituojantis kondensatorius, šuntuojamas kibirkštiniu tarpeliu imituojančiu dalinį išlydį. Dalinių išlydžių modelyje modeliuojamas defektas – sfera. Skaičiavimai atlikti pagal 10 kV kabelio su XLPE izoliacija techninės specifikacijos (**lentelė Nr. 2.1**). Taip pat pasirinkto kabelio izoliacijai parenkami parametrai:

- defekto skersmuo $D = 0,5 \text{ mm}, 1 \text{ mm}, 1,4 \text{ mm}$;
- defekto atstumas iki elektrodo $s = 3 \text{ mm}, 2,5 \text{ mm}, 2,1 \text{ mm}$;
- dielektrinė skvarba $\epsilon = 2,3 \text{ F/m}$ (XLPE izoliacijos), $2,0 \text{ F/m}$ (alyvos)
- parinkta dalinio išlydžio srovės impulso trukmė $\tau: 0,01 \mu\text{s}$.

2.1 lentelė Kabelio techninė specifikacija

Tiriamąo kabelio techninė specifikacija	
Kabelio tipas	AHXAMK-W 6/10 (12) kV, 3x150AL+35Cu, trys gyslos suvytos aplink centrinę laidininką
Izoliacijos tipas	XLPE
Izoliacijos vardinis storis	3,4 mm
Vienos gyslos skersmuo	31 mm
Vardinė įtampa	12 kV
Impulsinė įtampa	75 kV
Aukščiausia leistinoji ilgalaikio darbo laidininko temperatūra	90°C

Imitaciniame modelyje atliekami skaičiavimai

Defekto savitoji talpa apskaičiuojama [5]:

$$C_{DI} = 2\pi\epsilon D \quad (2.1)$$

Kietosios izoliacijos talpa srovės kelyje apskaičiuojama [5]:

$$C_{id} = \pi\epsilon \frac{D}{2} \left[1 + \sum_{n=1}^4 \rho^2 \right] \quad (2.2)$$

Defekto pramušimo įtampą skaičiuojama [5]:

$$U_k = DE_0\delta; \quad (2.3)$$

čia: E_0 – elektrinis lauko stipris normaliomis atmosferinėmis sąlygomis; δ – temperatūros ir slėgio pataisos koeficientas, D - defekto skersmuo izoliacijoje.

Pagal imitacinio modelio schemą 3.1 pav., kurioje talpos C_{id} ir C_{DI} sujungtos nuosekliai, todėl defektą izoliacijoje veikianti įtampa apskaičiuojama:

$$U_{DI} = \left(\frac{C_{id}}{C_{DI} + C_{id}} \right) \cdot U_p \quad (2.4)$$

Srovės šuolis kondensatorių persikrovimo metu skaičiuojamas [5]:

$$i_d(t) = I_{dm} \cdot \tau \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}; \quad (2.5)$$

$$I_{dm} = \frac{C_{id} \cdot U_{DI}}{\tau}; \quad (2.6)$$

Dalinių išlydžių tariamasis krūvis [5]:

$$q = U_{DI} C_{id} \quad (2.7)$$

Apskaičiuojama dalinių išlydžių energija kabelio izoliacijoje [5]:

$$W_{DI} = \frac{q \cdot U_{DI}}{2}; \quad (2.8)$$

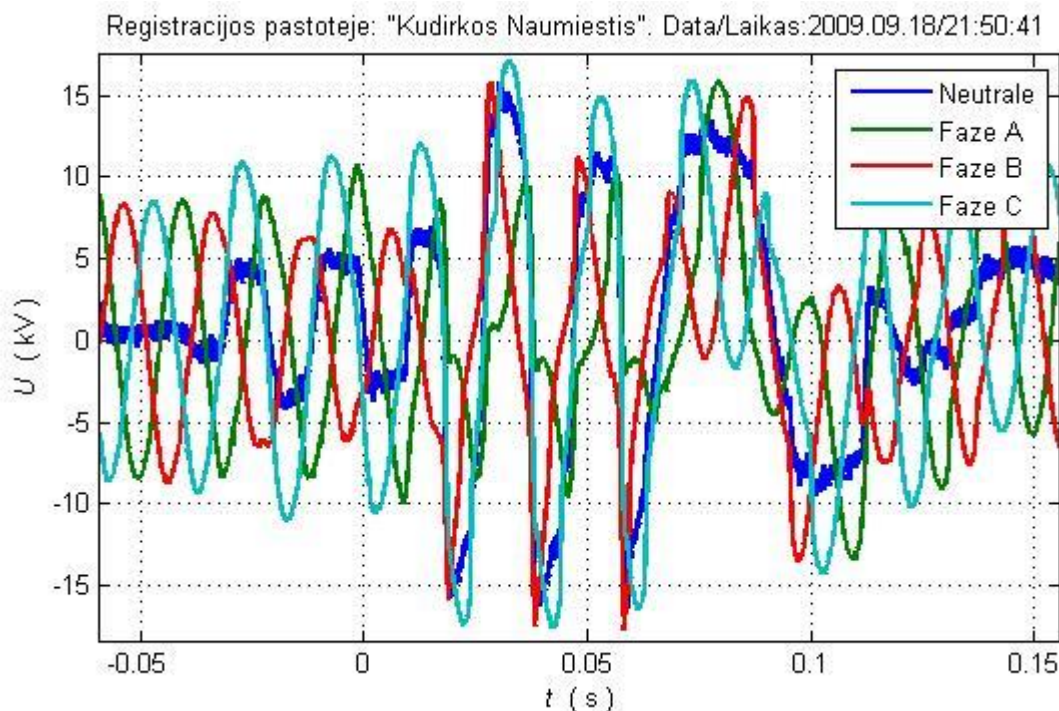
Dalinių išlydžių tariamasis krūvis skirstomas į tris lygius:

- **pradiniai daliniai išlydžiai** (0,01 iki 100 pC) – mažai pavojingi izoliacijai, bet spartina izoliacijos senėjimo procesą;
- **vidutiniai daliniai išlydžiai** (100 iki 1000 pC) – spartina izoliacijos senėjimą, didina izoliacijos pramušimo tikimybę;
- **kritiški, stiprūs daliniai išlydžiai** (1000 iki 10000 pC) – prasideda intensyvus izoliacijos irimo procesas, gali įvykti izoliacijos pramušimas.

2.2 Dalinių išlydžių charakteristikų tyrimas

Vykstant virštampiams arba leistinajai įtampai, izoliacijoje atsiradusio defekto vietoje įtampa U_{DI} pasiekia kibirkštinio tarpelio pramušimo įtampą U_k . Įvykus DI defekto talpa šuntuojama, o kondensatorius C_{DI} išsikrauna per kibirkštinį tarpelį.

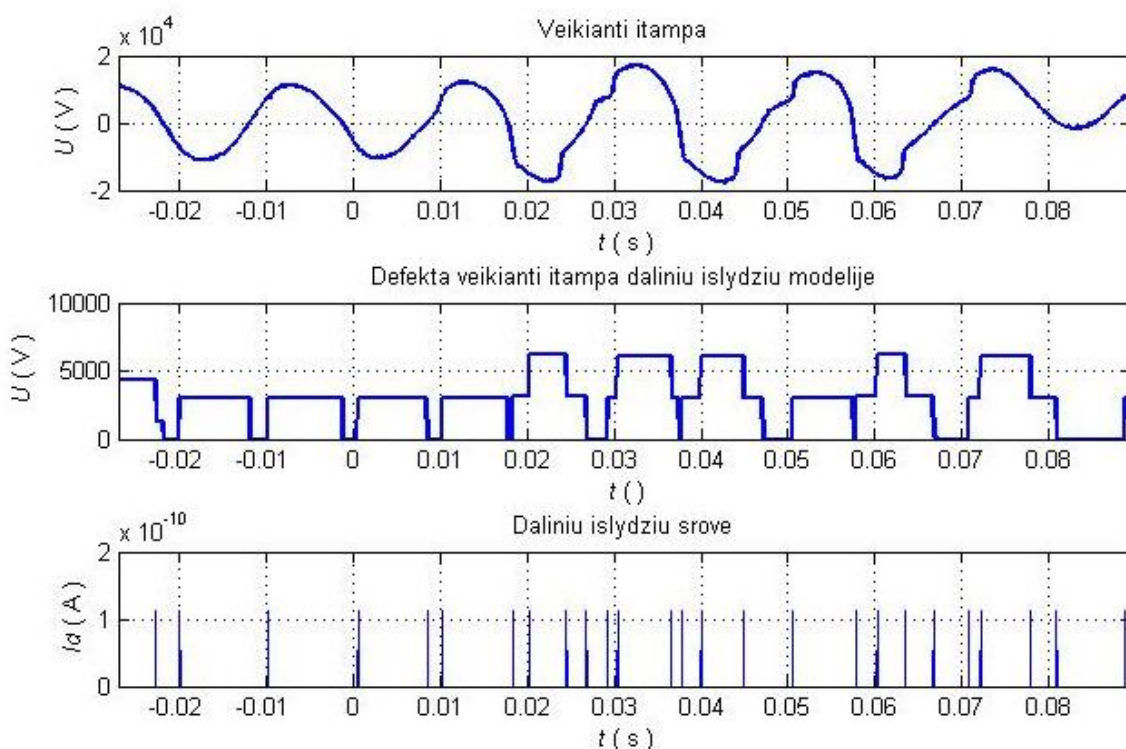
Imitaciniame modelyje, naudojamas dalinis išlydis, užfiksuotas Kudirkos Naumiesčio transformatorių pastotėje 2009 m. rugsėjo 18 d. atvaizduotas 2.2 pav.



2.2 pav. Dalinis išlydis izoliacijoje, fazių atvaizdavimas

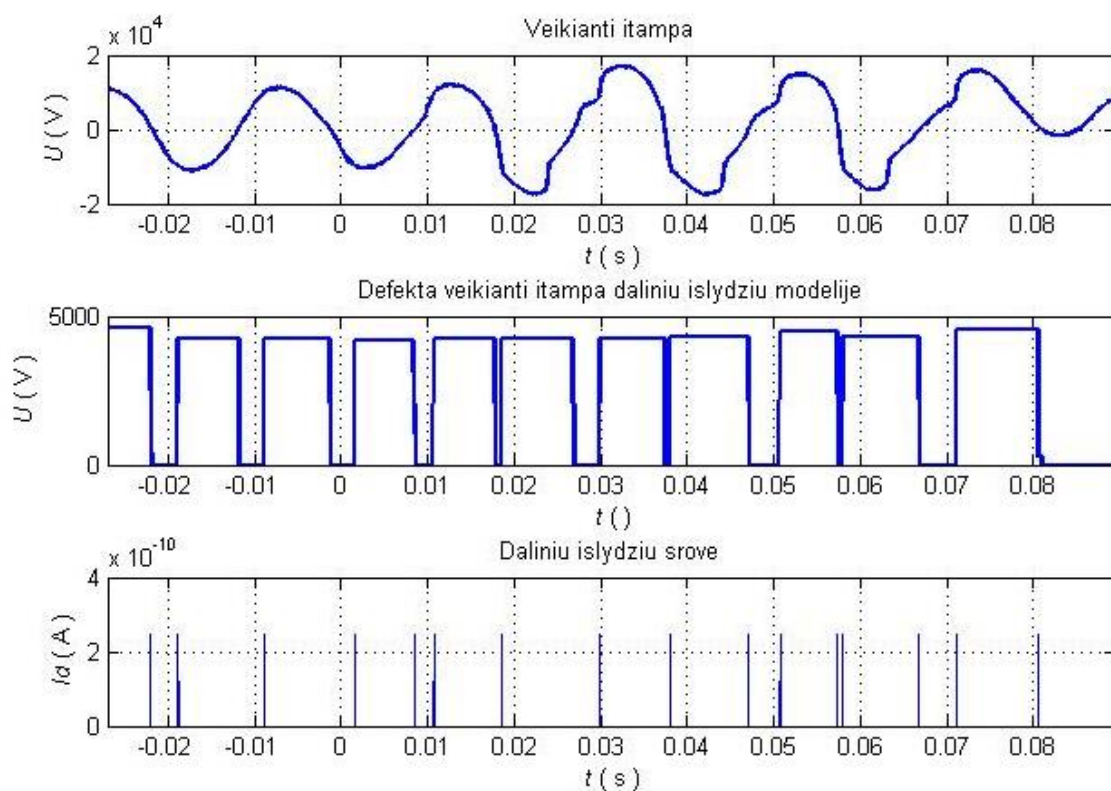
Toliau, skaičiavimams pasirinkta fazė C, nes dalinio išlydžio metu pasiekta didžiausia įtampos amplitudė 17 kV, tai reiškia, kad šioje fazėje vyksta ir didžiausios galios daliniai išlydžiai. Daliniams išlydžiams įvertinti, imitaciniame modelyje, skaičiuojami parametrai: Defektą veikianti įtampa, dalinių išlydžių srovė, defekto pramušimo įtampa, tariamasis krūvis, dalinių išlydžių energija. Matlab programos aplinkoje sumodeliuoti trijų lygių DI:

Pradiniai daliniai išlydžiai, vyksta kai defekto skersmuo $D=0,5$ mm (2.3 pav.). Įtampa veikianti defektą dalinio išlydžio metu siekia 6 kV. Dalinių išlydžių srovė $I_d=2,5 \cdot 10^{-11}$ A. Taip pat apskaičiuotas dalinių išlydžių tariamasis krūvis (2.2 lentelė), kuris XLPE izoliacijoje $q_{DI}=25,6$ pC.



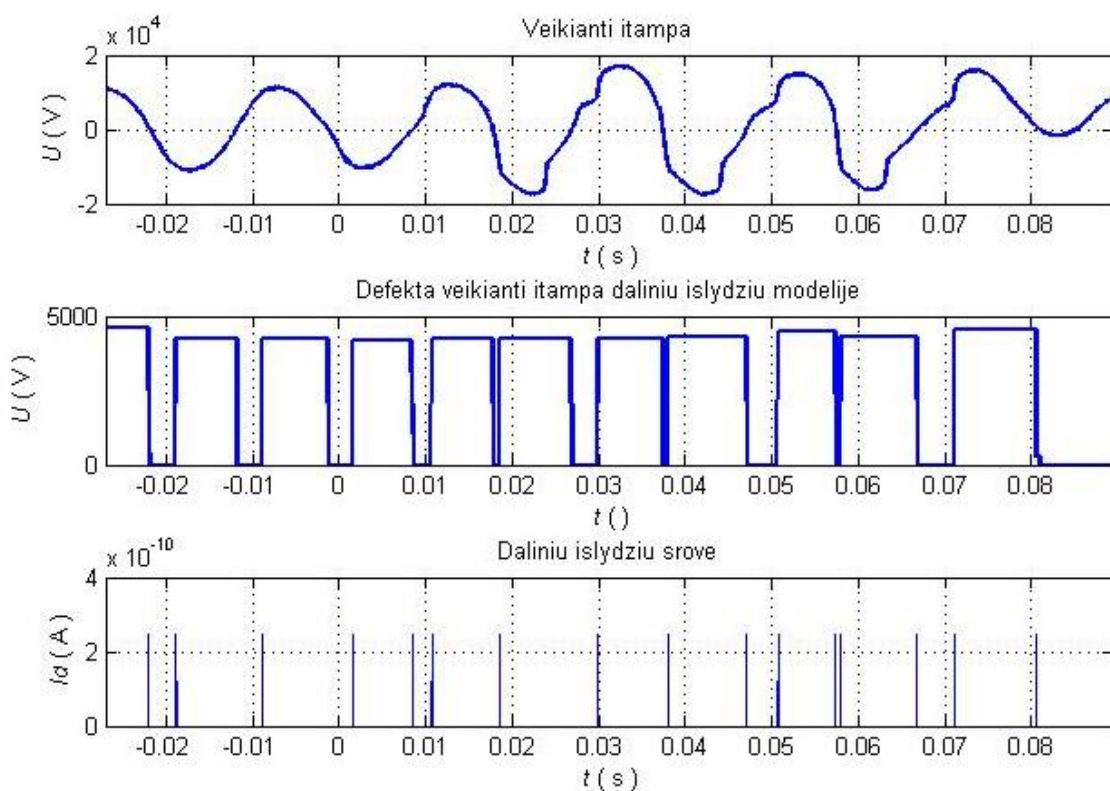
2.3 pav. Dalinių išlydžių charakteristikos XLPE izoliacijoje, kai $D=0,5$ mm

Vidutiniai daliniai išlydžiai, vyksta kai defekto skersmuo $D=1$ mm (2.4 pav.), Įtampa veikianti defektą dalinio išlydžio metu siekia 6 kV. Dalinių išlydžių srovė $I_d=1,2 \cdot 10^{-10}$ A. Taip pat apskaičiuotas dalinių išlydžių tariamasis krūvis (2.2 lentelė), kuris XLPE izoliacijoje $q_{DI}=111,40$ pC.

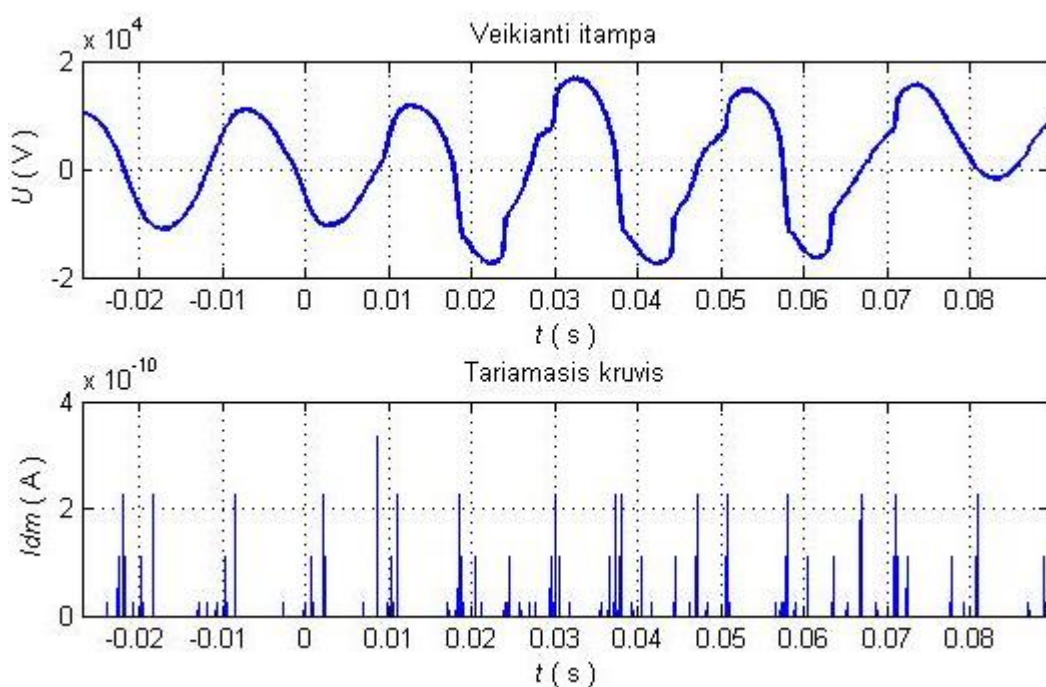


2.4 pav. Dalinių išlydžių charakteristikos XLPE izoliacijoje, kai $D=1$ mm

Kai defekto skersmuo $D=1,4$ mm (2.5 pav.), įtampa veikianti defektą dalinio išlydžio metu siekia 6 kV. Dalinių išlydžių srovė $I_d=2,5 \cdot 10^{-10}$ A. Taip pat apskaičiuotas dalinių išlydžių tariamasis krūvis (2.2 lentelė), kuris XLPE izoliacijoje $q_{DI}=244,44$ pC.



2.5 pav. Dalinių išlydžių charakteristikos XLPE izoliacijoje, kai $D=1,4$ mm



2.6 pav. DI srovės impulsų vyksmai, kai defektų skersmuo kinta 0,5, 1 ir 1,4 mm

Izoliacijoje vykstančių dalinių išlydžių impulsai ir vyksmai atvaizduoti 2.6 pav. Keičiantis defekto dydžiui (0,5, 1, 1,4 mm), kinta ir DI srovės impulsų reikšmės. Mažiausia gauta DI srovės impulso reikšmė 30 nA, kai $D=0,5$ mm, o didžiausia gauta reikšmė 320nA, kai $D=1,4$ mm. Kuo

didesnis defektas izoliacijoje, tuo didesnės ir srovės impulso reikšmės. Nustatyta, kad dalinių išlydžių srovės impulso stiprumas priklauso nuo defekto dydžio XLPE izoliacijoje.

2.3 Dalinių išlydžių charakteristikų XLPE ir alyvos izoliacijoje palyginimas

Tam, kad būtų galima palyginti XLPE izoliacijos savybes ir charakteristikas su kita izoliacine medžiaga, modeliuojami daliniai išlydžiai ir alyvoje. Alyva pasirinkta, nes ši izoliacinė medžiaga taip pat dažnai naudojama kabelių izoliacijoje. Apskaičiuoti dydžiai pateikti lentelėje Nr. 2.2.

2.2 lentelė. Dalinių išlydžių XLPE ir alyvos izoliacijoje charakteristikos

	XLPE	Alyvinis	XLPE	Alyvinis	XLPE	Alyvinis
Defekto dydis D, m	0,0005	0,0005	0,001	0,001	0,0014	0,0014
Defekto atstumas iki elektrodo s, m	0,003	0,003	0,0025	0,0025	0,0021	0,0021
Izoliacijos dielektrinė skvarba ϵ , F/m	2,3	2	2,3	2	2,3	2
Defekto savitoji talpa C_{DI} , pF	0,028		0,056		0,078	
Izoliacijos sluoksnio talpa C_{id} , pF	0,017	0,015	0,037	0,032	0,058	0,051
Defekto pramušimo įtampa U_k , kV	1,50		3,00		4,20	
Įtampa pirmo izoliacijos pramušimo metu U_{Dipr} , kV	3,96	4,33	7,49	8,17	9,82	10,63
Dalinių išlydžių tariamasis krūvis q_{DI} , pC	25,46	22,14	111,40	96,87	244,44	212,56
Dalinių išlydžių energija W_{DI} , nJ	50,39	47,90	417,45	395,65	1200,30	1133,30

Dalinių išlydžių charakteristikų skaičiavimo imitaciniame modelyje pavyzdys:

Skaičiuojamos DI charakteristikos XLPE izoliacijoje, kai bendras izoliacijos storis 0,0035 m, defekto skersmuo $D=0,0005$ m, o defekto atstumas iki elektrodo $s=0,003$, savitoji XLPE izoliacijos dielektrinė skvarba $\epsilon_1=2,3$ F/m, vakuumo dielektrinė skvarba $\epsilon_0=8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m.

Pagal 2.1 formulę apskaičiuojama sferinio defekto talpa:

$$C_{DI} = 4 \cdot 3,14 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 0,00025 = 0,028 \cdot 10^{-12} = 0,028 \text{ pF}$$

Pagal 2.2 formulę apskaičiuojama kietosios izoliacijos talpa srovės kelyje:

$$C_{id} = 3,14 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 2,3 \cdot 0,00025 \cdot (1 + 0,0578 + 0,0578^2 + 0,0578^3 + 0,0578^4) \\ = 0,017 \cdot 10^{-12} = 0,017 \text{ pF}$$

Čia, kietosios izoliacijos tankis $\rho=0,0578$ kg/m³.

Pagal 2.3 formulę apskaičiuojama defekto pramušimo įtampa:

$$U_k = 2 \cdot 0,00025 \cdot 3000000 = 1,5 \cdot 10^3 = 1,5 \text{ kV}$$

Čia, $r=D/2$.

Pagal 2.4 formulę apskaičiuojamas įtampos pasiskirstymas tarp defekto ir izoliacijos:

$$U_{DI} = \frac{0,017 \cdot 10^{-12}}{0,028 \cdot 10^{-12} + 0,017 \cdot 10^{-12}} \cdot U_p = 0,379 \cdot U_p$$

Čia, U_p įtampos amplitudė, veikianti dalinių išlydžių modelyje.

Toliau apskaičiuojama įtampa, kurios reikia defekto tarpeliui pramušti:

$$U_{DIpr} = \frac{U_k}{U_{DI}} = \frac{1500}{0,379} = 3,96 \cdot 10^3 = 3,96 \text{ kV} \quad (2.9)$$

Pagal 2.5 formulę apskaičiuojama srovės šuolio amplitudė persikrovimo metu:

$$I_d = \frac{0,017 \cdot 10^{-12} \cdot 1500}{0,01 \cdot 10^{-6}} = 2,55 \cdot 10^{-3} = 2,55 \text{ mA}$$

Pagal 2.6 formulę apskaičiuojamas dalinių išlydžių tariamasis krūvis:

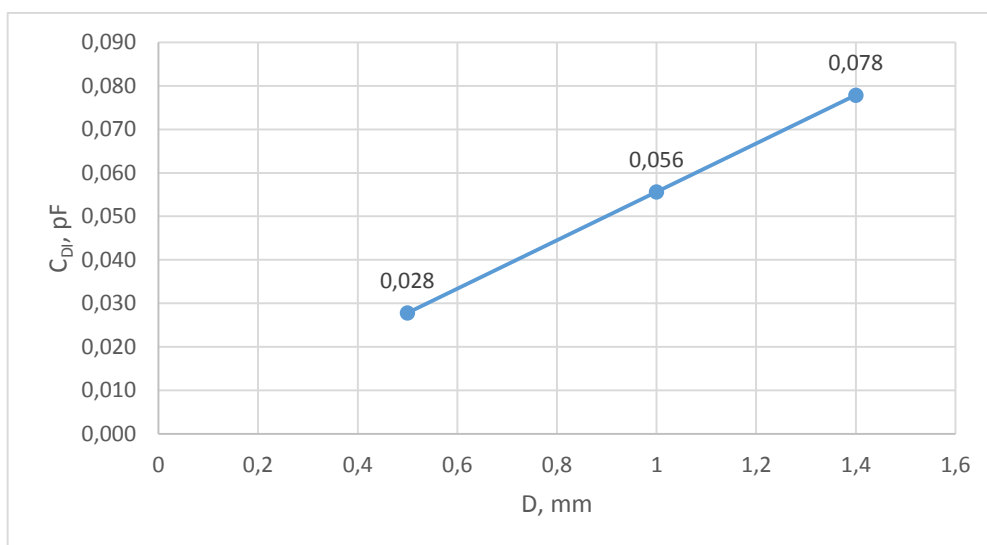
$$q = 1500 \cdot 0,017 \cdot 10^{-12} = 25,5 \cdot 10^{-12} = 25,5 \text{ pC}$$

Pagal 2.7 formulę apskaičiuojama dalinių išlydžių energija:

$$W_{DI} = \frac{25,5 \cdot 10^{-12} \cdot 3,96 \cdot 10^3}{2} = 50,39 \cdot 10^{-9} = 50,39 \text{ nJ}$$

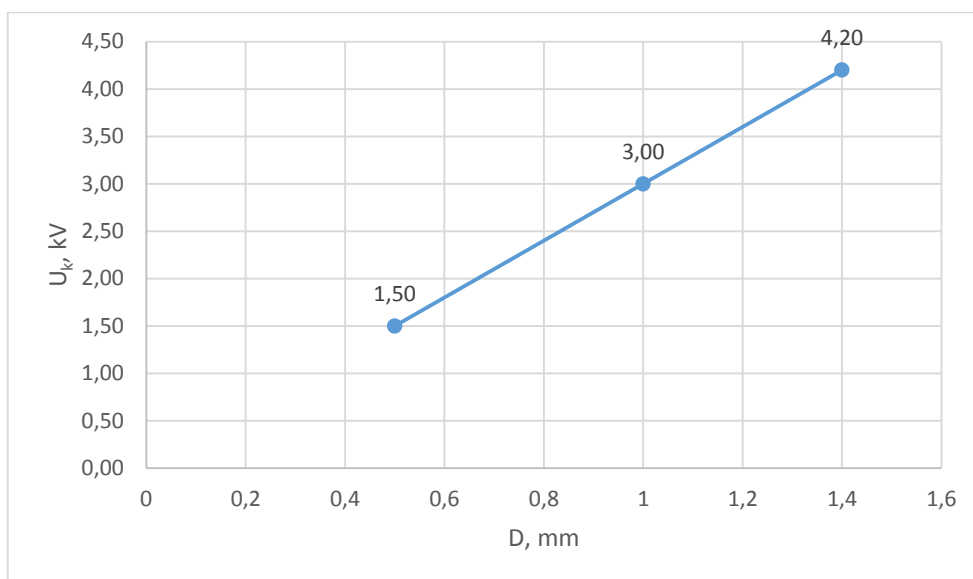
Analogiškai apskaičiuojami dydžiai lentelėje Nr. 2.2. Pagal gautus rezultatus braižomos charakteristikos.

Pagal apskaičiuotus duomenis lentelėje Nr. 2.2 sudaryta defekto savitosios talpos priklausomybė nuo defekto dydžio. Kadangi savitoji talpa nepriklauso nuo savitosios izoliacijos dielektrinės skvarbos (nepriklauso nuo medžiagos, kurioje yra defektas), todėl tiek XLPE izoliacijoje, tiek ir alyvos izoliacijoje defekto savitoji talpa vienoda ir priklauso tik nuo defekto dydžio. Paveikslėlyje 2.7 pav. pateikta savitosios defekto talpos nuo defekto dydžio priklausomybė. Iš šios priklausomybės nustatyta, kad kuo didesnis skersmens defektas, tuo didesnė ir defekto savitoji talpa.



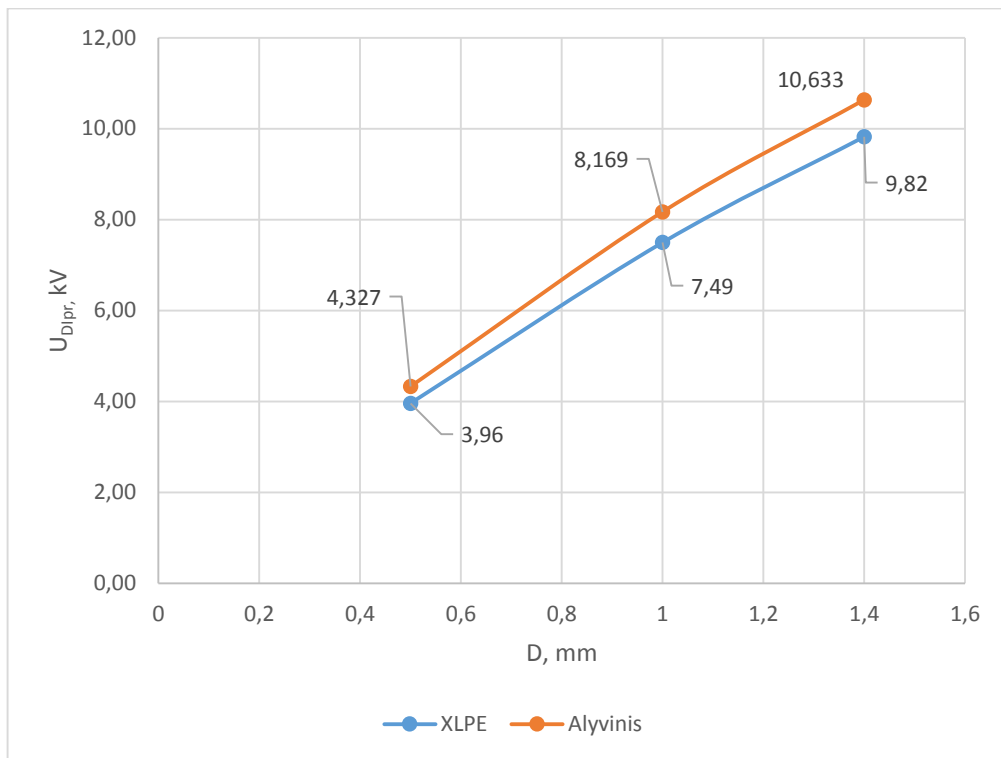
2.7 pav. Defekto savitosios talpos priklausomybė nuo defekto dydžio izoliacijoje

Nuo defekto dydžio izoliacijoje priklauso ne tik savitoji defekto talpa, bet ir defektą pramušančios įtampos dydis, dalinių išlydžių metu. Pramušimo įtampos ir defekto dydžio priklausomybė atvaizduota 2.8 pav. Iš formulės 2.3 matome, kad defekto pramušimo įtampa nepriklauso nuo izoliacijos tipo.



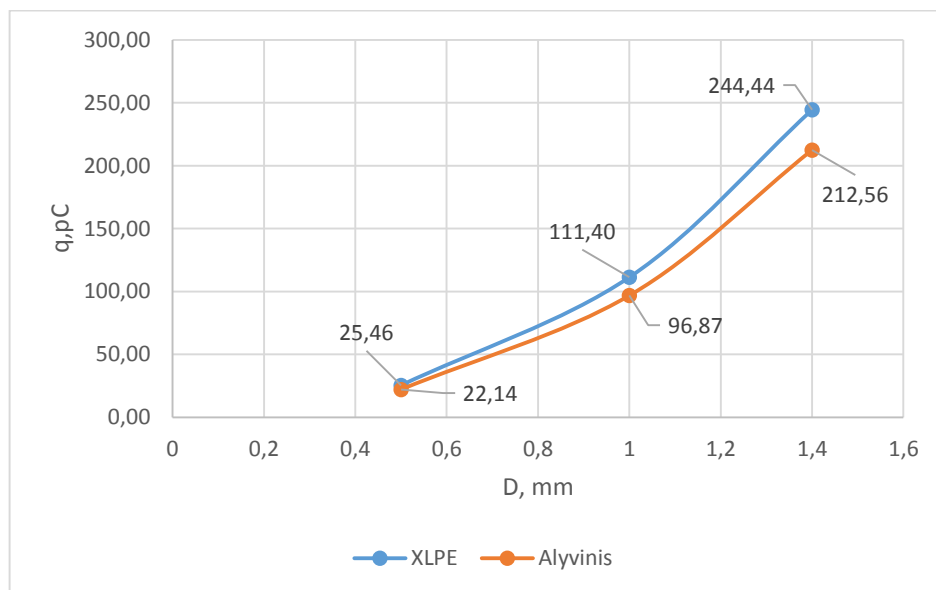
2.8 pav. Defekto pramušimo įtampos priklausomybė nuo defekto dydžio izoliacijoje

Pagal apskaičiuotus duomenis lentelėje Nr. 2.2 sudarytos dalinių išlydžių kietojoje XLPE ir alyvos izoliacijoje priklausomybės. Paveikslėlyje 2.9 atvaizduota įtampos, pirmojo izoliacijos pramušimo metu, priklausomybė nuo defekto dydžio. Iš 2.4 formulės matome, kad U_{DI} priklauso nuo C_{id} (kietosios izoliacijos talpa, srovės kelyje) ir C_{DI} (defekto savitoji talpa). Nors C_{DI} nuo izoliacijos tipo nepriklauso, tačiau iš formulės 2.2 matome, kad C_{DI} priklauso nuo izoliacijos savitosios dielektrinės skvarbos. Taigi įtakoja ir įtampos dydį pirmojo izoliacijos pramušimo metu. Izoliacinės alyvos savitoji dielektrinė skvarba $\epsilon=2$ F/m, o kietosios XLPE $\epsilon=2,3$ F/m. Minėtoje priklausomybėje matome, kad kuo didesnė izoliacijos dielektrinė skvarba, tuo mažesnės įtampos reikia pramušti izoliacijai.



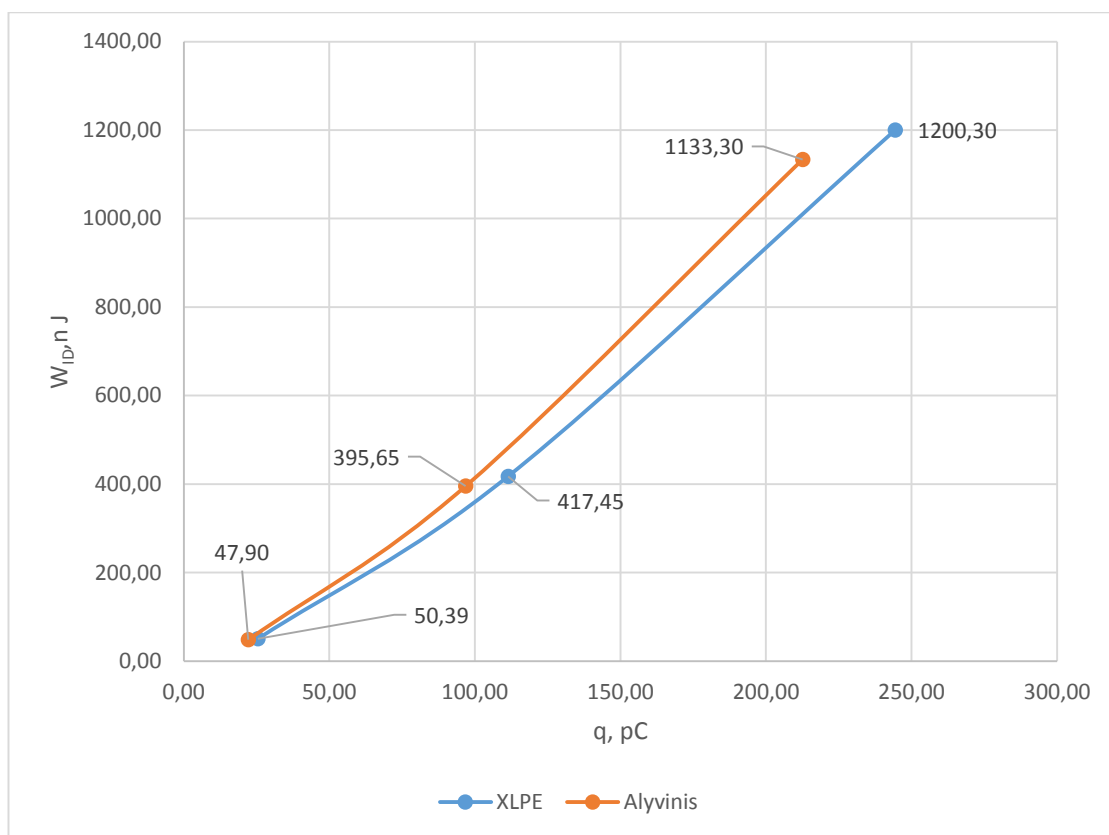
2.9 pav. Įtampos, pirmojo izoliacijos pramušimo metu, priklausomybė nuo defekto dydžio izoliacijoje

Dalinių išlydžių tariamasis krūvis apskaičiuojamas pagal 2.7 formulę ir priklauso nuo U_{DI} ir C_{id} . Abu dydžiai priklauso nuo defekto skersmens izoliacijoje ir izoliacijos savitosios dielektrinės skvarbos. Dalinių išlydžių tariamojo krūvio priklausomybė nuo defekto talpos pateikta 2.10 pav. Iš paveikslėlio matome, kad kuo didesnis defektas izoliacijoje, tuo didesnis tariamasis krūvis susidaro dalinių išlydžių metu.



2.10 pav. Dalinių išlydžių tariamojo krūvio priklausomybė nuo defekto dydžio izoliacijoje

Dalinių išlydžių stiprumą ir poveikį izoliacijai, apibūdina dalinių išlydžių tariamasis krūvis ir susidariusi energija dalinio išlydžio metu. Susidariusios energijos priklausomybė nuo tariamojo krūvio atvaizduota 2.11 pav. Iš paveikslo matome, kad kuo didesnė tariamojo krūvio vertė, tuo didesnės energijos daliniai išlydžiai susidaro izoliacijoje.



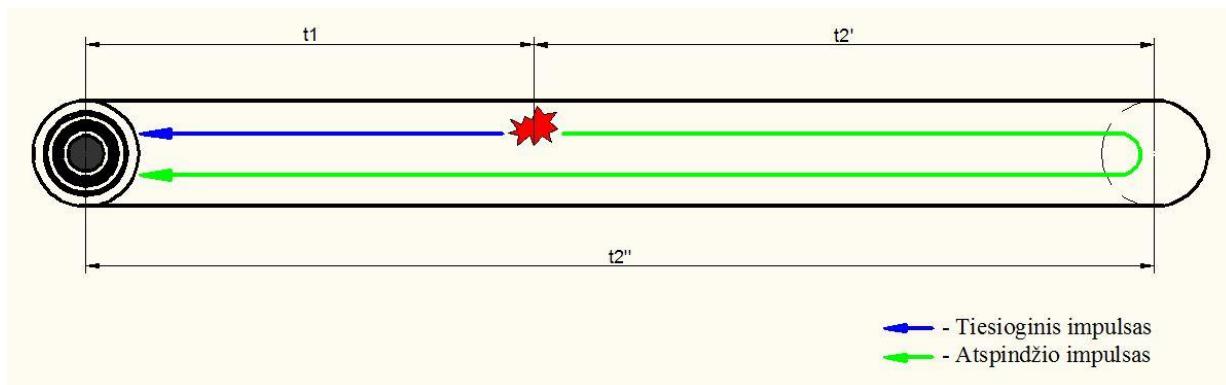
2.11 pav. Dalinių išlydžių energijos priklausomybė nuo tariamojo krūvio

Elektros įrenginių izoliacijoje esantis mikrodefektas, veikiamas dalinių išlydžių, didėja. Imitacinio modelio pagalba, keičiant defekto dydį, nustatytos dalinių išlydžių charakteristikų priklausomybės nuo defekto dydžio izoliacijoje. Atlikus skaičiavimus ir išanalizavus dalinių išlydžių parametrus ir priklausomybės nustatyta, kad pradiniai daliniai išlydžiai iki 26 pC vyksta, kai defekto skersmuo $D=0,5$ mm, tokio krūvio DI yra leistini ir nedaro arba mažai veikia izoliacijos senėjimo procesą. Defektui padidėjus iki $D=1$ mm pasiektas dalinių išlydžių krūvis iki 112 pC, toks dalinių išlydžių krūvis nors ir nėra pavojingas tačiau, neigiamai veikia izoliaciją, spartėja izoliacijos senėjimas. Kai defekto skersmuo $D=1,4$ mm DI krūvis padidėja iki 245 pC, izoliacijos senėjimas spartėja, toliau besivystant defektui galimas izoliacijos pramušimas.

Imitaciniame modelyje apskaičiuoti DI parametrai kietojoje XLPE ir alyvinėje izoliacijose, leidžia palyginti izoliacijų savybes ir patikimumą. Alyvinėje izoliacijoje, esant tokio paties dydžio defektui, kaip XLPE izoliacijoje, DI krūvis, energija mažesni negu XLPE izoliacijoje, o defekto pramušimo įtampa didesnė, todėl padaryta išvada, kad alyvos izoliacinės savybės geresnės už XLPE izoliaciją.

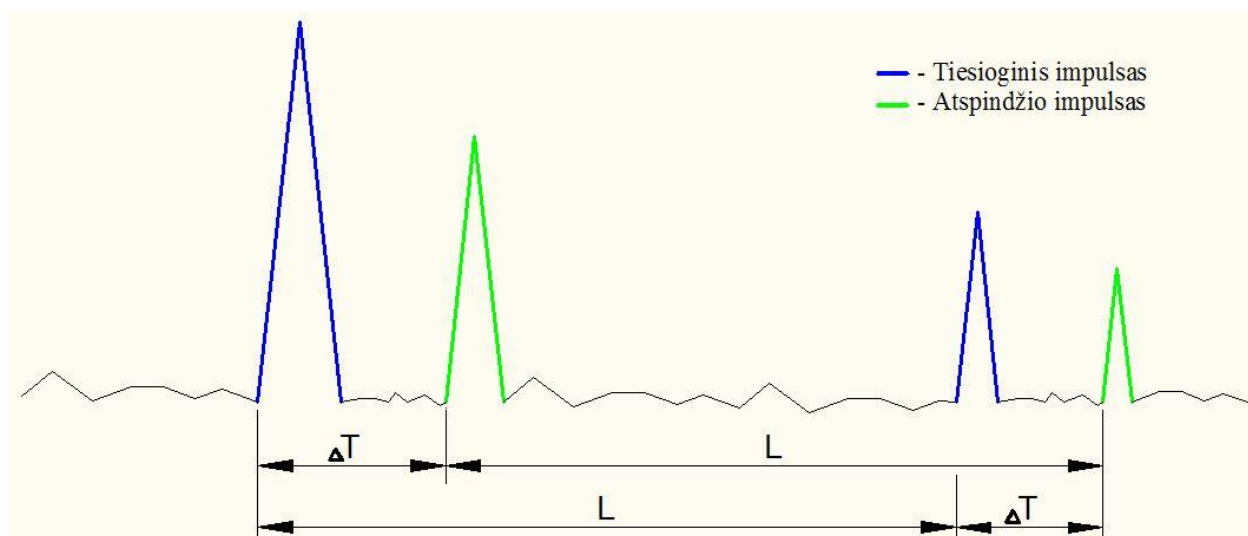
2.4 Defekto vietos apskaičiavimas

Defekto vietos nustatymo skaičiavimais papildytas dalinių išlydžių imitacinis modelis. Defektas nustatomas įvertinus elektromagnetinės bangos tiesioginio impulso sklidimo laiką iki gedimo (t_1) ir to impulso atspindžio laiką (t_2). Tiesioginio ir atspindžio impulso sklidimo eiga pavaizduota 2.12 pav.



2.12 pav. Tiesioginio ir atspindžio impulso sklidimo eiga

Įvykus daliniams išlydžiams, kabelio izoliacijoje, fiksuojamas elektromagnetinių bangų atsispindėjimas. Įvykus daliniams išlydžiams kabelyje, tiesioginis impulsas keliauja nuo gedimo vietos į matavimo įrenginį ir yra užfiksuojamas. Tuo metu atspindžio impulsas nuo gedimo vietos keliauja iki kabelio pabaigos ir grįžta į matavimo prietaisą per visą kabelio ilgį. Tarp tiesioginio (t_1) ir atsispindėjusio impulso (t_2) grįžimo laiko į matavimo įrenginį atsiranda laiko skirtumas ΔT (2.13 pav.). Taip pat įvertinamas laikas L , kurio reikia impulsui nukeliauti nuo kabelio pradžios iki kabelio pabaigos. Kabelio gedimo vietą galima nustatyti atlikus skaičiavimus:



2.13 pav. Impulso atsispindėjimas

Priimame, kad t_1 , t_2' ir t_2'' yra žinomi. Apskaičiuojamas t_2 :

$$t_2 = t_2' + t_2'' \quad (2.10)$$

Toliau skaičiuojamas ΔT :

$$\Delta T = t_2 - t_1 = \frac{l_2}{v} - \frac{l_1}{v} = \frac{l_2 - l_1}{v} \quad (2.11)$$

Čia v – elektromagnetinės bangos sklidimo greitis, izoliacijoje.

Skaičiuojamas impulso pilnas kelias L :

$$L = \frac{t_1 + t_2}{v} \quad (2.12)$$

Apskaičiavus ΔT ir L galima apskaičiuoti dalinio išlydžio vietą kabelyje pagal formulę:

$$PD_{\%} = \left(1 - \left(\frac{\Delta T}{L}\right)\right) \cdot 100 \quad (2.13)$$

Dalinio išlydžio vietą apskaičiuotą procentais perskaičiuojame ir gauname gedimo vietą kabelio ilgyje:

$$L_g = \frac{l \cdot PD_{\%}}{100} \quad (2.14)$$

Čia l – tiriamo kabelio ilgis, m.

Nustatyti kabelio gedimo vietai vieno skaičiavimo neužtenka. Todėl reikia nustatyti reikšmingiausias, didžiausios energijos, dalinius išlydžius ir stebėti nustatytos kabelio vietos gedimo „išsibarstymą“. Tokiu būdu galima matyti, kurioje vietoje daliniai išlydžiai labiausiai veikia kabelio izoliaciją.

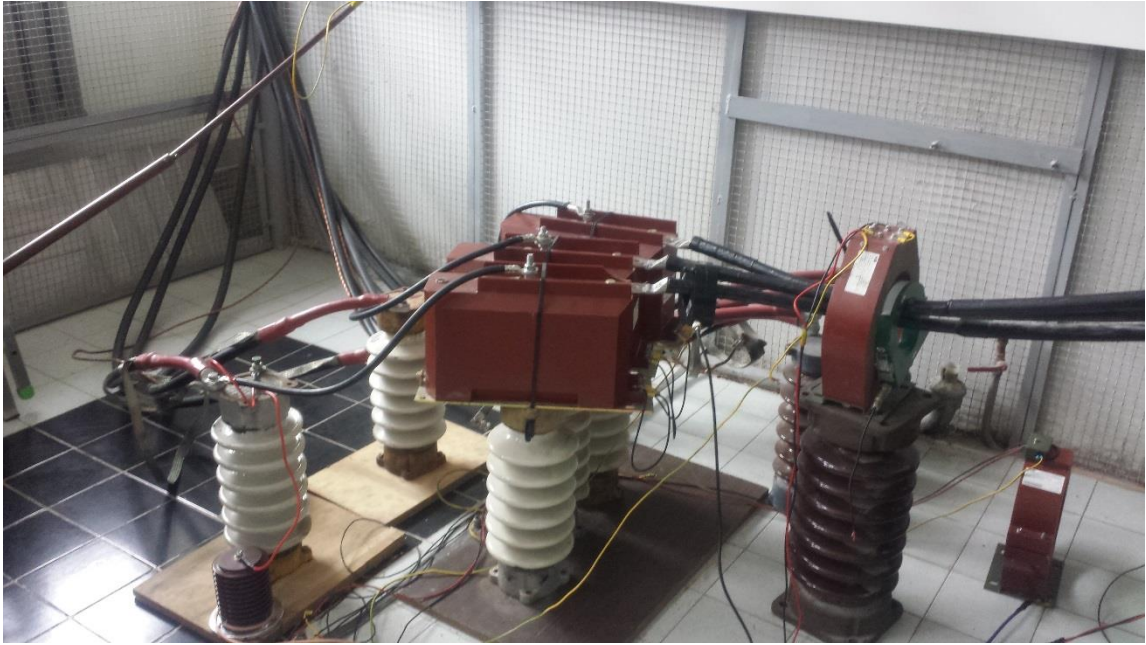
3. KABELIO KIETOSIOS IZOLIACIJOS PARAMETRŲ TYRIMAS, DEFEKTO VIETOS NUSTATYMAS, TIESIOGINIO MATAVIMO BŪDU

Tam, kad patikrinti kaip kinta kabelių charakteristikos pritaikius modelį matlab programoje ir matuojant tiesiogiai dalinių išlydžių metu atliktas tyrimas su „Doble“ PD – Smart dalinių išlydžių analizatoriumi. Palyginus su kitais kabelių bandymo ir stebėsenos metodais „Doble“ PD – Smart privalumai:

- naudojant įrenginį nereikalingas įrenginio atjungimas nuo sistemos;
- galimas įrenginių dalinių išlydžių charakteristikų tyrimas ir stebėseną realiu laiku;
- negadina įrenginio izoliacijos, todėl gali būti pritaikomas izoliacijos resurso tyrimams;
- įrenginys nedidelių gabaritų, lengvai transportuojamas, jungiamas tiesiogiai su kompiuteriu ir bandomu įrenginiu;
- duomenys gali būti registruojami, įrašomi ir lyginami su ankstesniais bandymais gautais rezultatais, galima duomenų analizė.

Bandymo stendas - „Doble“ PD-smart dalinių išlydžių analizatoriumi galima registruoti dalinių išlydžių įtampą, dažnį, tariamąjį krūvį, DI energiją, fazės kampa ir kt. Bandymo stendas 3.1 pav. susideda iš [9]:

- Kompiuteris – gauna informaciją iš Doble PD smart įrenginio, apdorotus duomenis atvaizduoja;
- Doble PD-smart - įrenginys, analizuojantis vykstančius dalinius išlydžius, tiesioginės stebėsenos metodu. ;
- Kalibratorius – skirtas kalibruoti dalinių išlydžių krūvį;
- Srovės transformatorius - aukšto dažnio srovės transformatorius;
- Įtampos transformatorius - įtampos matavimo kondensatorius;
- Media box - įrenginys skirtas Doble PD smart įrenginį sujungti su kompiuteriu į sistemą;
- Splitting box – įrenginys skirtas konvertuoti dalinių išlydžių arba įtampos impulsų signalus į suprantamus signalus Doble PD smart įrenginiui.



3.1 pav. Dalinių išlydžių bandymo stendas

Tyrimo vieta - Kauno Technologijos Universiteto Aukštų įtampų laboratorija, 10 kV kabelio bandymo stendas (3.2 pav.).

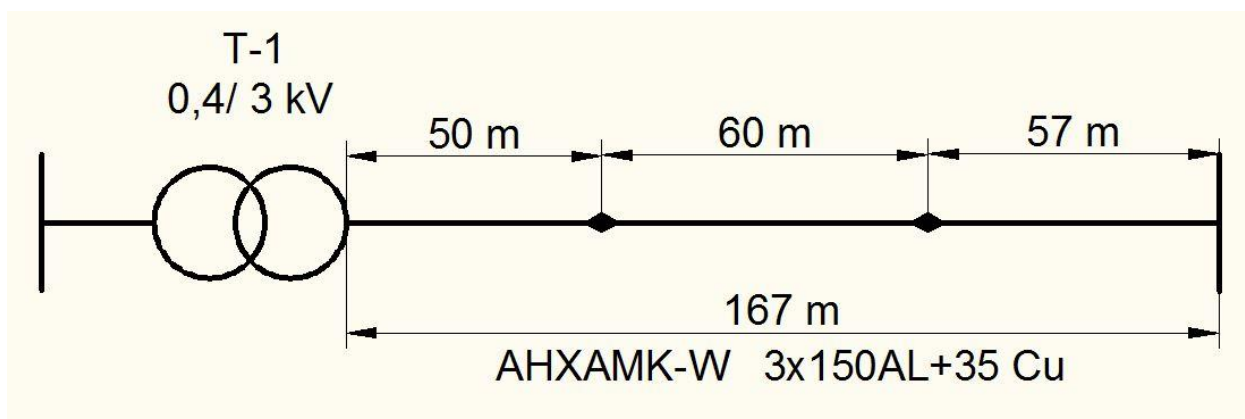
Tyrimo objektas - Laboratorijoje sumontuotas 10 kV kabelis 150 mm skerspjūvio, 35 mm aliuminio ekranu ir XLPE izoliacija. Tiriamas kabelis susideda iš trijų aliuminio gyslų suvytų aplink centrinį varinį laidininką. Kabelio ilgis 167 m, tačiau kabelis ne vienalytis, padaryti sujungimai ties 50 ir 110 kabelio metru. Kabelio principinė schema pavaizduota 3.3 pav.



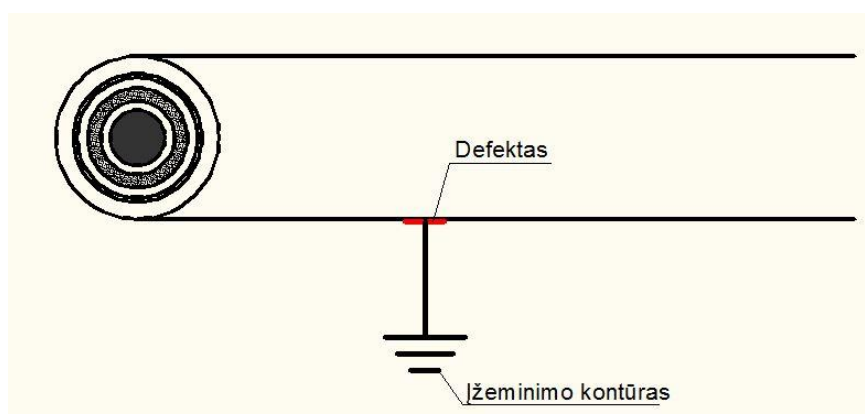
3.2 pav. Tiriamas kabelis su XLPE izoliacija

Laboratorijoje sumontuotas 0,4/3 kV transformatorius, prie kurio prijungtas tiriamas kabelis. Bandymo metu imituojamas vienos fazės įžemėjimas, kurio metu matuojamoje fazėje įtampa pakyla iki 6 kV, pasibaigus įžemėjimui įtampa grįžta iki 3 kV. Prasidėjus daliniams išlydžiams, atlikti matavimai. Kabelio matavimo vieta pasirinkta kabelio pradžioje, išėjime iš transformatoriaus. Realiomis sąlygomis tai atitiktų kabelio bandymą transformatorių pastotėje, skirstykloje, modulinėje transformatorinėje ar stulpinėje transformatorinėje. Taip pat tiriamos fazės gyslos izoliacijoje imituotas defektas (3.3 pav). Prie tiriamo kabelio paviršiaus 80 kabelio metre, pritvirtinta ir prijungta prie įžeminimo kontūro aliuminio vielutė, kuri skaidydama vienalytį elektrinį lauką imituoja kabelio defektą. Defekto imitavimo schema pavaizduota 3.4 pav. Tokiu būdu imituojamas defektas, atsiradęs kabelio paviršiuje. Realiomis sąlygomis defektas atitiktų:

- įbrėžimą – netinkamai montuojant kabelio galines, jungiamąsias movas;
- įtrūkimą – montavimo metu viršijus leistinas tempimo, lenkimo jėgas;
- oro, vandens tarpą izoliacijoje – gamybos metu atsiradus defektui.



3.3 pav. Tiriamo kabelio principinė sujungimų schema

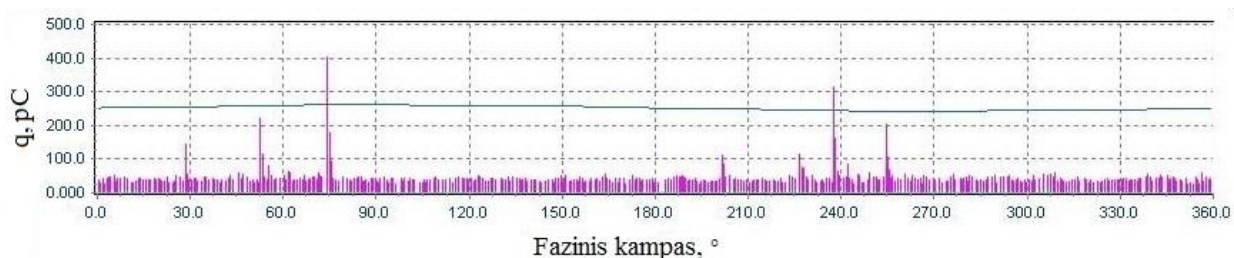


3.4 pav. Defekto imitavimo schema

3.1 Dalinių išlydžių charakteristikų tyrimas

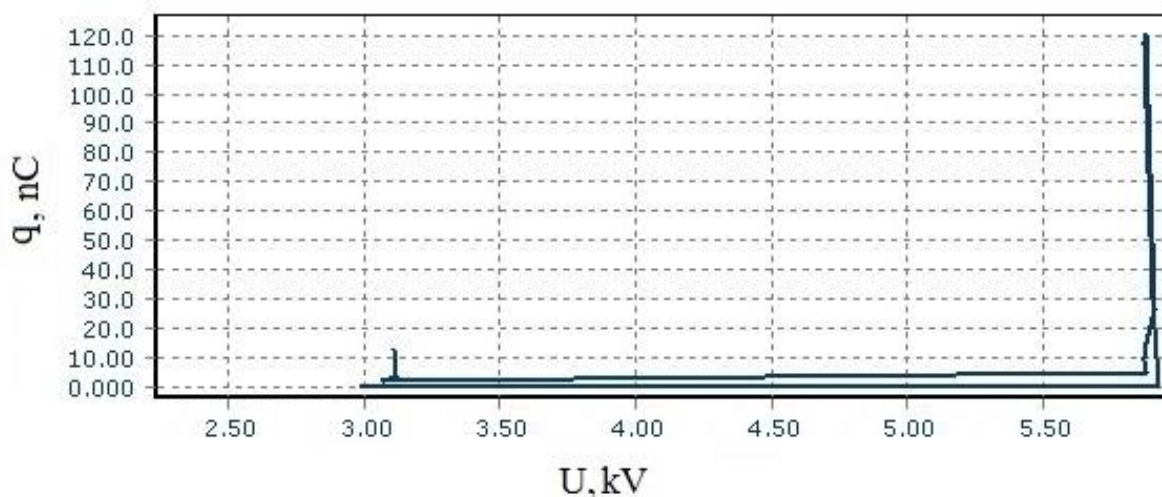
Daliniai išlydžiai kabelyje prasideda po C fazės įžemėjimo. DI buvo tiriami A fazėje. Bandymo metu naudojant Doble PD smart dalinių išlydžių analizatorių įvykęs dalinis išlydis užregistruotas ir pateiktas 4.5 pav. Diagramoje atvaizduota krūvio pagal fazės kampą išsidėstymas. Dalinių išlydžių tariamasis krūvis didžiausia verte, išsidėsto 30-80°, 190-250° fazės kampuose.

Analizuojant gautus dalinius išlydžius, jų tariamąjį krūvį, tarp 30° - 80° fazės kampų pastebėta, kad DI išsiskiria į reikšmes: iki 50 pC – triukšmai; 110 pC, 210 pC, 400 pC – vidutiniai DI. Tai reiškia, kad gauti daliniai išlydžiai nors ir nesukelia kabelio gedimo, tačiau kabelio izoliacijoje yra defektas. Toliau eksploatuojant kabelį, defektas progresuos, o daliniai išlydžių daugės ir stiprės.



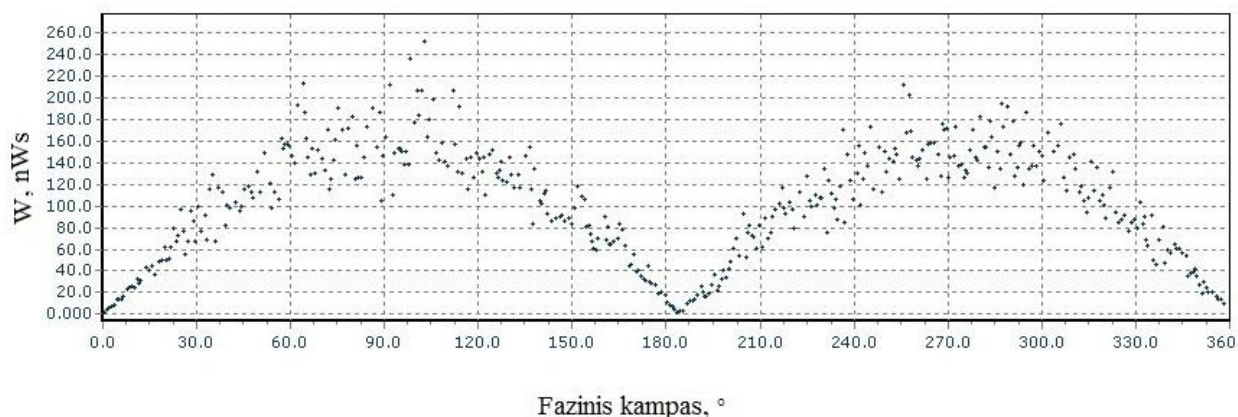
3.5 pav. Daliniai išlydžiai 10 kV kabelyje su XLPE izoliacija.

Po C fazės įžemėjimo ir A fazėje pasiekus 6 kV įtampą, kabelyje prasideda daliniai išlydžiai, kurie pasiekia didžiausia krūvį bandymo metu ties 120 nC. Įtampos ir dalinių išlydžių kitimas viso bandymo metu pateiktas 3.6 pav.



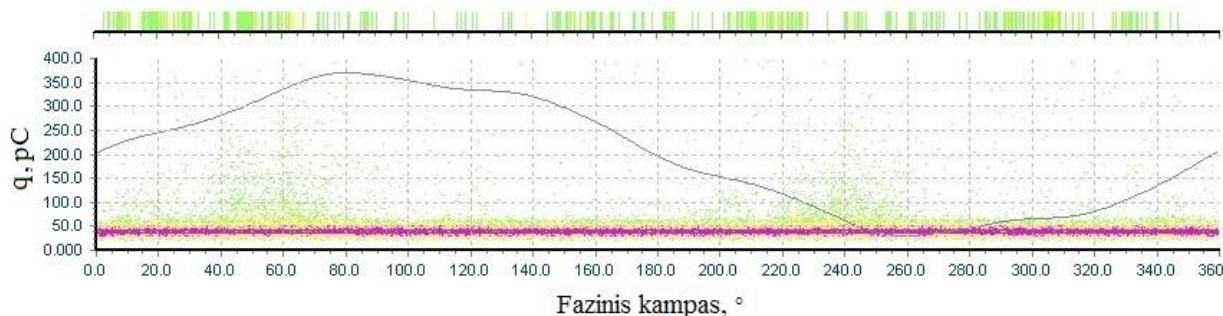
3.6 pav. Įtampos ir dalinių išlydžių kitimas bandymo metu

Bandymo metu didžiausios energijos daliniai išlydžiai pasiskirstė tarp 60° - 120° ir 240° – 300° fazinių kampų. Dalinių išlydžių energijos pasiskirstymas tarp fazinių kampų atvaizduotas 3.7 pav. Didžiausia dalinio išlydžio energija gauta $W=240\text{nWs}$.



3.7 pav. Dalinių išlydžių energijos pasiskirstymas tarp fazės kampų

Dalinių išlydžių tariamojo krūvio pasiskirstymas tarp fazių atvaizduotas 3.8 pav. Daugiausia buvo užfiksuota triukšmų iki 50 pC. Didžiausio krūvio daliniai išlydžiai buvo užfiksuoti fazinio kampo intervaluose 30° - 80° ir 220° - 260° .



3.8 pav. Dalinių išlydžių tariamojo krūvio pasiskirstymas tarp fazių

Kabelio bandymo metu nustatyta, kad daliniai išlydžiai, vykstantys kabelio izoliacijoje, prasideda veikiant 6 kV įtampai. Didžiausio galingumo ir poveikio kabelio izoliacijai daliniai išlydžiai vyksta, kai fazinis kampas yra intervaluose 90° – 120° ir 240° – 270° .

3.2 Defekto vietos nustatymas

10 kV kabelio bandymo metu, buvo tiriama galimybė nustatyti defekto (gedimo) vietą kabelyje. Naudojant Doble PD smart dalinių išlydžių analizatoriaus funkciją „gedimo vieta“ (angl.

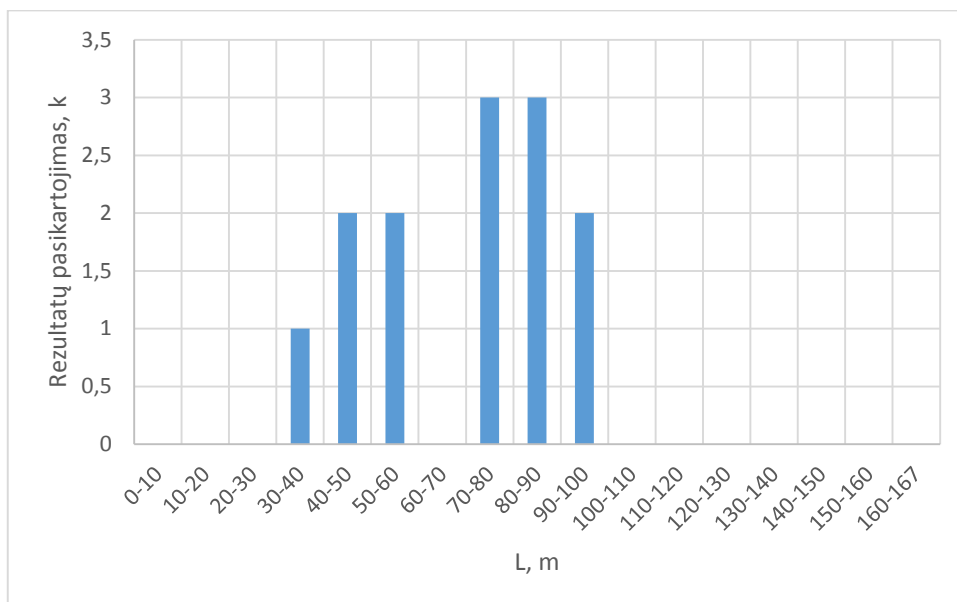
„fault location), kuri paremta 2.4 skyriuje aprašytu tiesioginio ir atspindėjusio impulso skaičiavimo metodu.

Laboratorijoje tiriant kabelį gauti duomenys pateikti priede Nr. 1. Iš kurių sudaryta lentelė Nr. 3.1. Iš šioje lentelėje esančių rezultatų matome, kad fiksuoti defektai įvairiuose kabelio ilgiuose. Tačiau defektas imituotas 80 kabelio metre. Kadangi kabelis nevienalytis, o sujungtas dviejose vietose kaip parodyta 3.3 pav., todėl turėjo įtakos atspindžio matavimui ir sujungimo vietos fiksuotos kaip defektai.

3.1 lentelė. Defekto vieta kabelio ilgyje

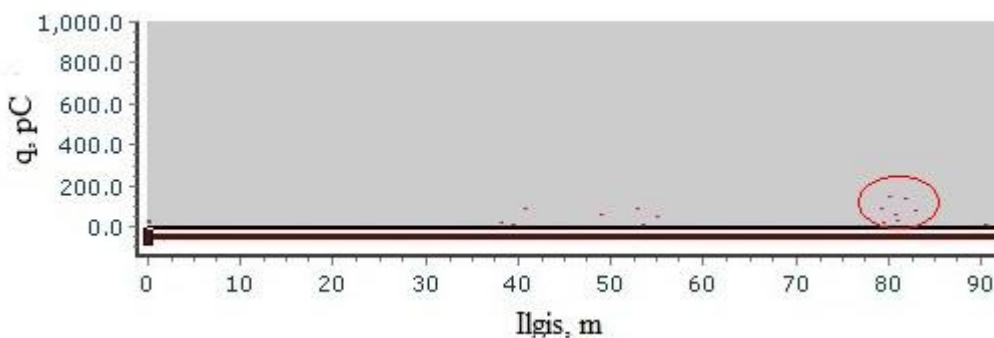
Pav. Nr. Priede Nr. 1	Defekto vieta, m
1	80,61
2	79,36
3	117,76
4	112,64
5	44,8
6	56,32
7	160
8	106,24
9	70,4
10	122,78
11	56,32
12	37,12
13	147,2
14	44,8
15	80,64
16	79,36
17	94,72
18	70,4
19	87,04
20	80,64
21	90,88

Defekto vietai patikslinti sudaryta diagrama pavaizduota 3.9 pav., Iš diagramos matyti, kad daugiausia defektų užfiksuota 70-90 kabelio metre. Taip pat mažesnis kiekis defektų buvo fiksuotas 30-60 kabelio metre (dėl kabelio nevienalytiškumo). Pagal didžiausią užfiksuotų defektų skaičių nustatoma apytikslė kabelio gedimo vieta tarp 70-90 m. Gaunamas rezultatas su didele paklaida, nes imituotas defektas yra gan nežymus.

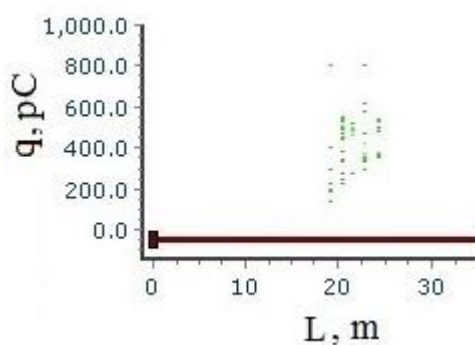


3.9 pav. Defekto vieta kabelio ilgyje

Doble PD smart įrenginys pagal užfiksuotus tiesioginio ir atspindžio impulsų sugrįžimo laikus, jų skirtumą (ΔT) į matavimo įrenginį, atvaizduoja defekto vietas 3.10 pav. Įrenginio užfiksuoti defektai visame kabelio ilgyje pateikti priede Nr. 2 Taip pat kaip ir 3.9. pav. išsidėstę tarp 30-60 m ir daugiausia defektų gaunama ties 78 - 85 kabelio metru.



3.10 pav. Defekto vieta nustatyta bandymo metu



3.11 pav. Realiomis sąlygomis nustatyta defekto vieta.

Kadangi bandymo metu gauta didelė defekto vietos paklaida, dėl to gedimo vieta nustatoma tik apytiksliai. Tačiau tikslinga gerinti kabelio defekto vietos tyrimo standą, kad defekto vieta būtų nustatoma tiksliau, nes prietaiso galimybės tą leidžia. Paveiksle 3.11 pateiktas pavyzdys, kaip Doble įranga atvaizduoja realiomis sąlygomis esančio defekto vietą . Defektas visame kabelio ilgyje pateiktas priede Nr. 3.

Periodiškai, stebint dalinius išlydžius, registruojant rezultatus, galima stebėti izoliacijos būklę, vertinti defekto kitimo spartą, nustatyti defekto vietą. Toks periodinis stebėjimas, leidžia efektyviau planuoti įrenginių remontus, mažinti gedimų tikimybę tinkle, didina elektros tinklo patikimumą.

IŠVADOS

1. Nustatytos kietojoje izoliacijoje vykstančių dalinių išlydžių charakteristikos, galinčios padėti nustatyti izoliacijos būklę: defekto pramušimo įtampa, tariamasis krūvis, dalinių išlydžių energija ir kt.

2. Imitacinis dalinių išlydžių modelis patikslintas, pritaikius kietajai XLPE izoliacijai būdingus parametrus (dielektrinę skvarbą, izoliacijos storį ir kt.), papildytas defekto vietos nustatymo skaičiavimais. Modelio pagalba, keičiant defekto dydį, nustatyta, kad dalinių išlydžių charakteristikos priklauso nuo defekto dydžio izoliacijoje. Atlikti skaičiavimai parodė, kad pradiniai daliniai išlydžiai iki 26 pC vyksta, kai defekto skersmuo $D=0,5$ mm, vidutiniai DI vyksta, kai $D=1$ mm ir siekia 112 pC, $D=1,4$ mm DI krūvis padidėja iki 245 pC. Keičiant defekto dydį (0,5, 1, 1,4 mm), kinta ir DI srovės impulsų reikšmės. Mažiausia gauta DI srovės impulso reikšmė 30 nA, kai $D=0,5$ mm, o didžiausia gauta reikšmė 320 nA, kai $D=1,4$ mm. Nustatyta, kad dalinių išlydžių srovės impulsų stiprumas ir priklauso nuo defekto dydžio XLPE izoliacijoje. Imitaciniame modelyje apskaičiuoti DI parametrai kietojoje XLPE ir alyvinėje izoliacijose, leidžia palyginti izoliacijų savybes ir patikimumą. Alyvinėje izoliacijoje, esant tokio paties dydžio defektui, kaip XLPE izoliacijoje, DI krūvis, energija mažesni negu XLPE izoliacijoje, o defekto pramušimo įtampa didesnė. Daroma išvada, kad alyvos izoliacinės savybės geresnės už XLPE izoliacijos.

3. Kabelio bandymo metu nustatyta, kad daliniai išlydžiai, vykstantys kabelio izoliacijoje, prasideda veikiant 6 kV įtampai. Didžiausio galingumo ir poveikio kabelio izoliacijai daliniai išlydžiai vyksta, kai fazinis kampas yra intervaluose $90^\circ - 120^\circ$ ir $240^\circ - 270^\circ$. Kabelio bandymo metu nustatyta, kad kabelio gedimo vietą galima nustatyti atlikus skaičiavimus, įvertinant tarp tiesioginio ir atsispindėjusio grįžimo laiko į matavimo įrenginį, atsiradusį laiko skirtumą (ΔT). Pagal ΔT imitaciniame modelyje apskaičiuota defekto vieta kabelyje 70-90 kabelio metre. Defekto vieta nustatyta kabelio bandymo 78-85 kabelio metre (imituotas 80 kabelio metre). Bandymo ir skaičiavimo metu nukrypimai gauti dėl kabelio nevienalytiškumo. Tikslinga gerinti kabelio defekto vietos tyrimo stendą, kad defekto vieta būtų nustatoma tiksliai. Periodiškai, stebint dalinius išlydžius, registruojant rezultatus, galima stebėti izoliacijos būklę, vertinti defekto kitimo spartą, nustatyti defekto vietą.

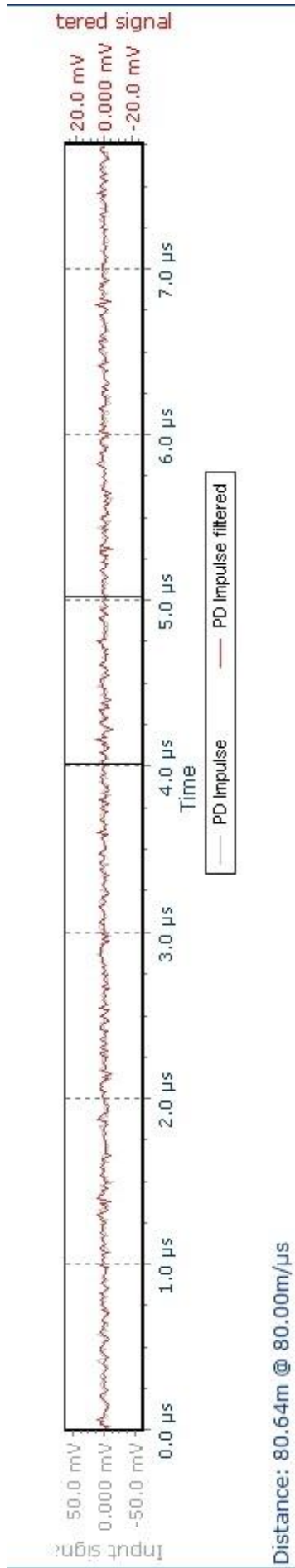
LITERATŪRA

1. 10 kV Suvyti kabeliai plastikine izoliacija ir neizoliuota varine gysla skirti kloti žemėje ir atvirame ore. Techniniai reikalavimai, 2014 m AB „Lesto“.
2. Svinkūnas G.; Navickas A.; Elektros energetikos pagrindai, 2013 m. p. 82 – 85 , Kaunas, Technologija, ISBN 978-60-02-1001-7.
3. Rinkevičius G. J; Mukulys R.J.; Degutis A.; Elektrotechninės medžiagos, 2010 m. p. 20, Kaunas, Technologija, ISBN 9955-25-070-4.
4. Baublys J.; Jankauskas P.; Markevičius L.A.; Morkvėnas A. Izoliacija ir viršįtampiai. 2008 m. p. 192-193. Technologija, Kaunas, ISBN 978-9955-25-472-0.
5. Degutis A.; Miliūnė R.; Morkvėnas A. Elektros įrenginių bandymų ir gedimų diagnostikos metodai, 2013 m. p. 57-59 Kaunas, KTU.
6. Alvarez F; Garnacho F; Ortego J; Sanchez – Uran M. A. Application of HFCT and UHF Sensors in On – Line Partial Discharge Measurements for Insulation Diagnosis of High Voltage Equipment. 2015. 05. 25, p. Department of Electrical Engineering, Polytechnic University of Madrid. ISSN 1424-8220.
7. Haddad A; Warne D.F. Advances in High Voltage Engineering, 2004, 2007 m. The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, ISBN 0852961588, ISBN 978-0-85296-158-2.
8. Valatka P. Aukštos įtampos elektros įrenginių izoliacijos būklės įvertinimo parametru nusatymas, disertacija. 2012 Kaunas.
9. PD smart – Doble Engeneerig company, [žiūrėta 2016.05.20], Prieiga internetu: <http://www.doble.com/product/pd-smart/>

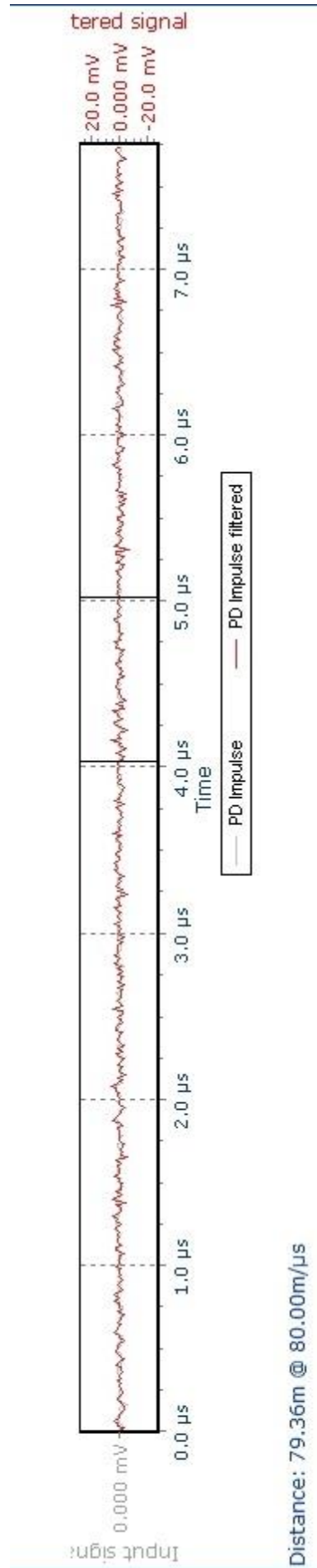
PRIEDAI

PRIEDAS Nr. 1 DEFEKTO VIETA KABELYJE

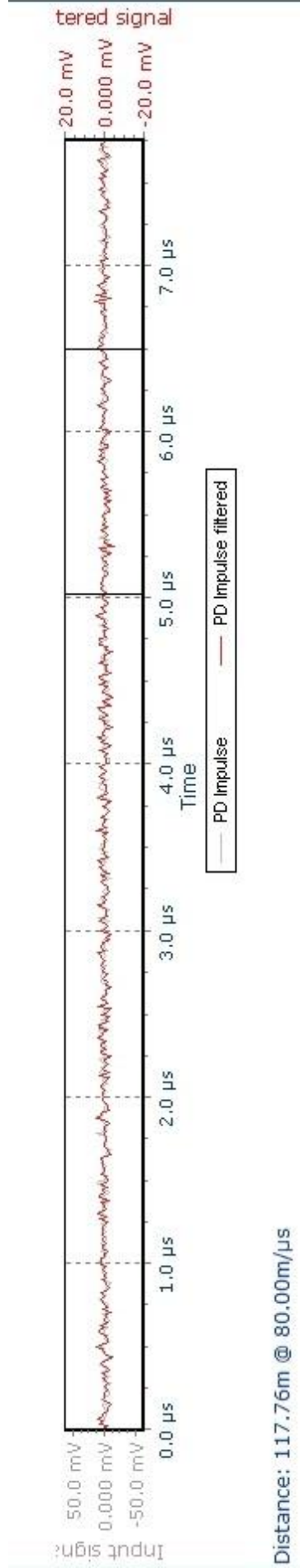
1 pav. $L_g=80,64\text{m}$



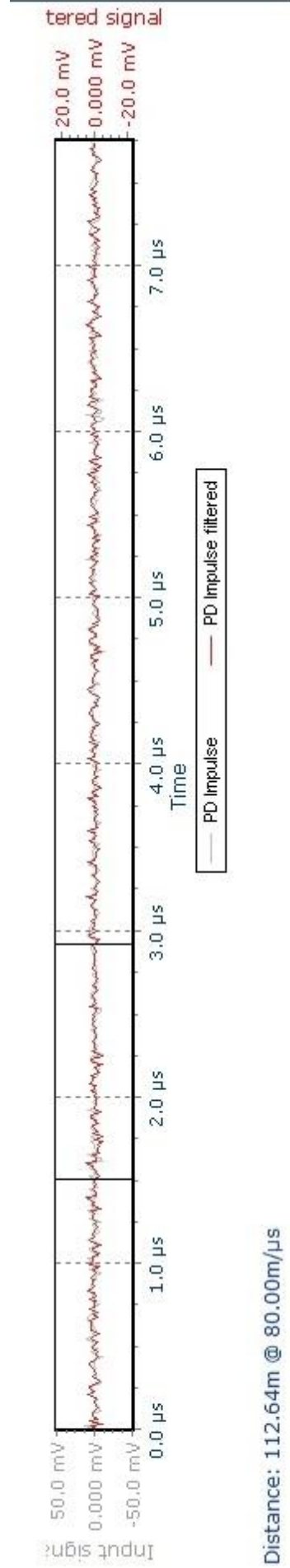
2 pav. $L_g=79,36\text{m}$



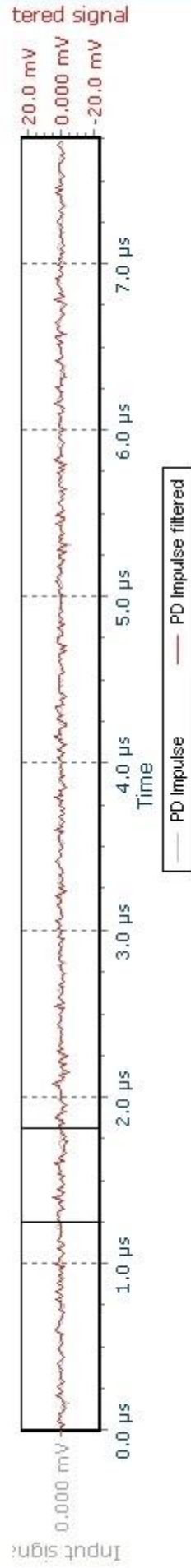
3 pav. $L_g=117,76m$



4 pav. $L_g=112,64m$

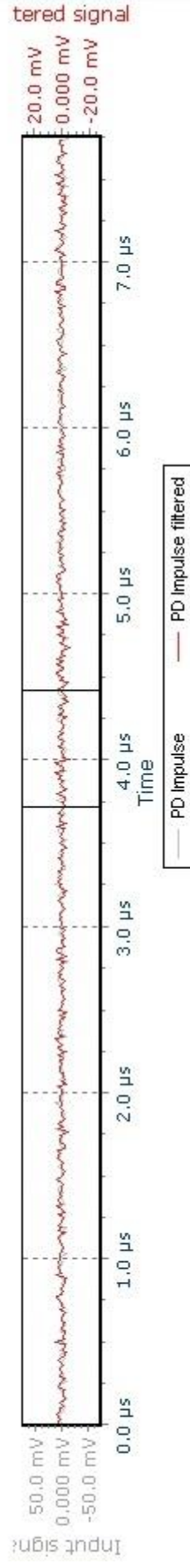


5 pav. $L_g=44,80m$



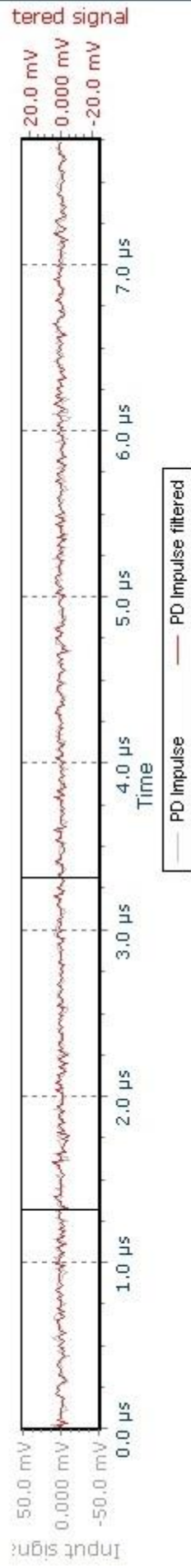
Distance: 44.80m @ 80.00m/ μs

6 pav. $L_g=56,32m$



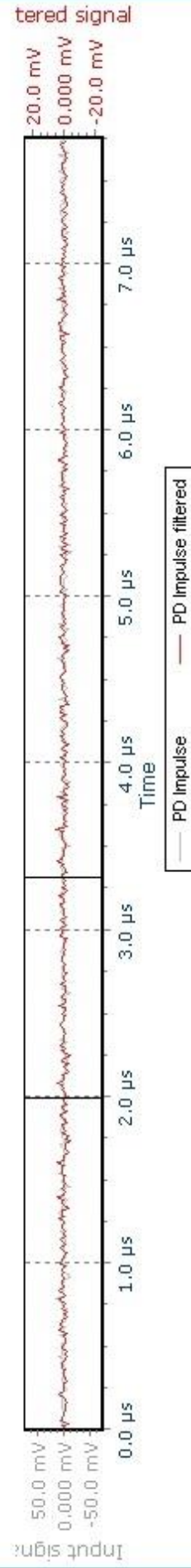
Distance: 56.32m @ 80.00m/ μs

7 pav. $L_g=160,0m$



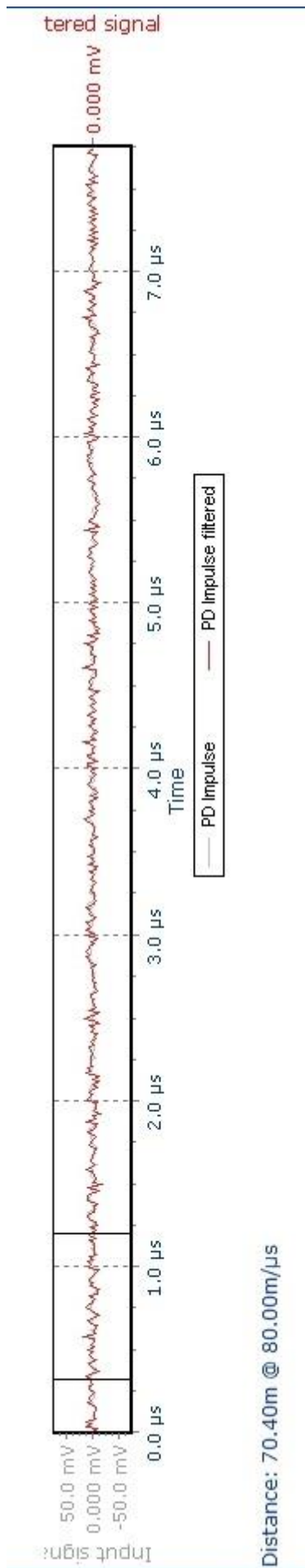
Distance: 160.00m @ 80.00m/ μ s

8 pav. $L_g=106,24m$

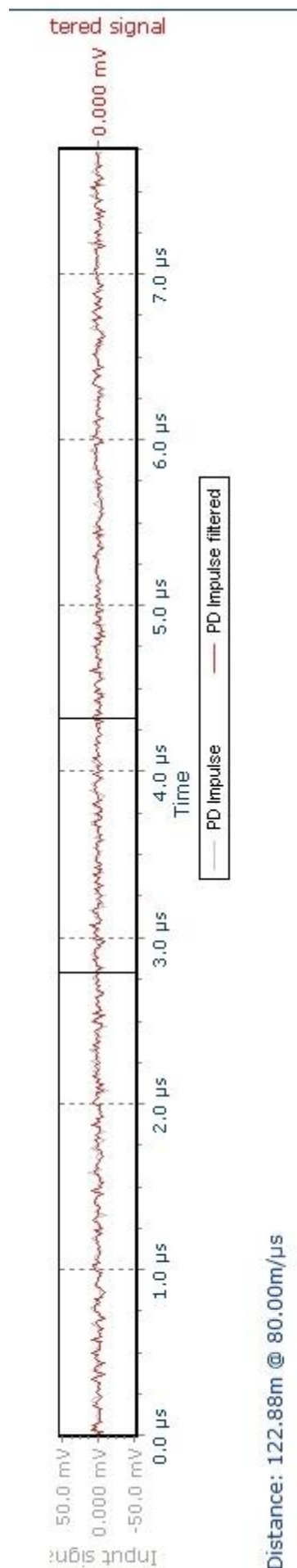


Distance: 106.24m @ 80.00m/ μ s

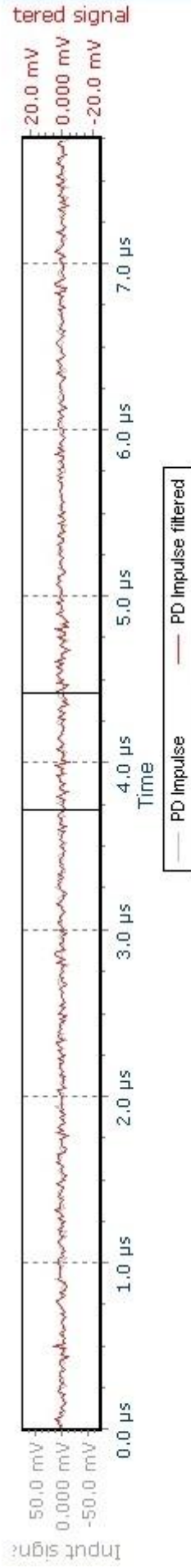
9 pav. $L_g=70,4m$



10 pav. $L_g=122,88m$

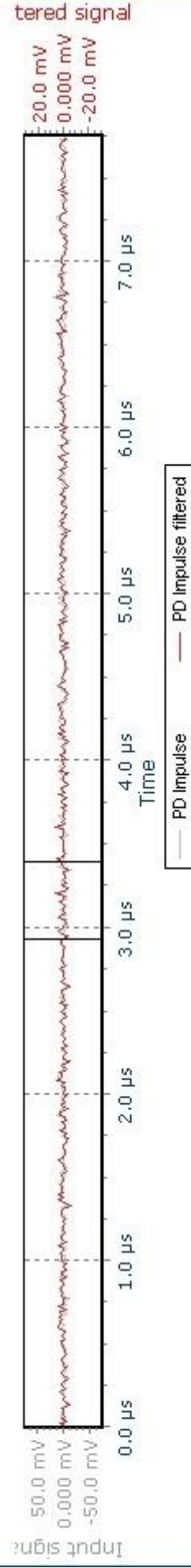


11 pav. $L_g=56,32m$



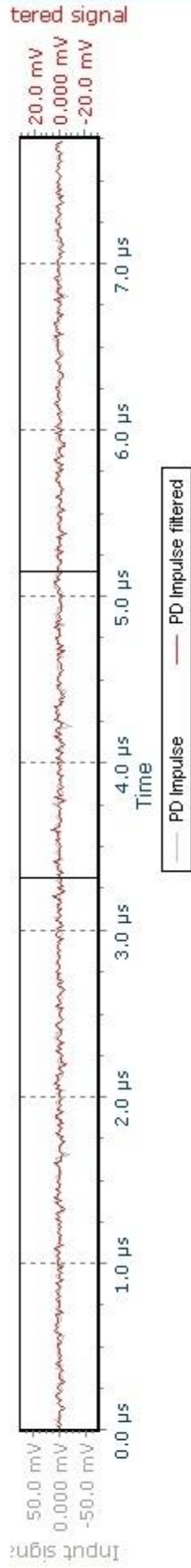
Distance: 56.32m @ 80.00m/ μs

12 pav. $L_g=37,12m$



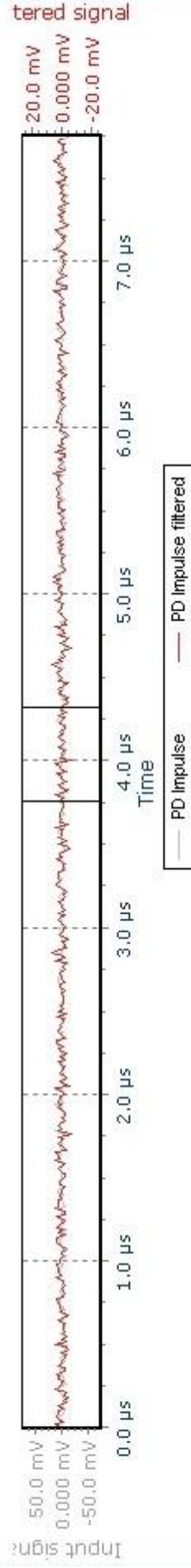
Distance: 37.12m @ 80.00m/ μs

13 pav. $L_g=147,2m$



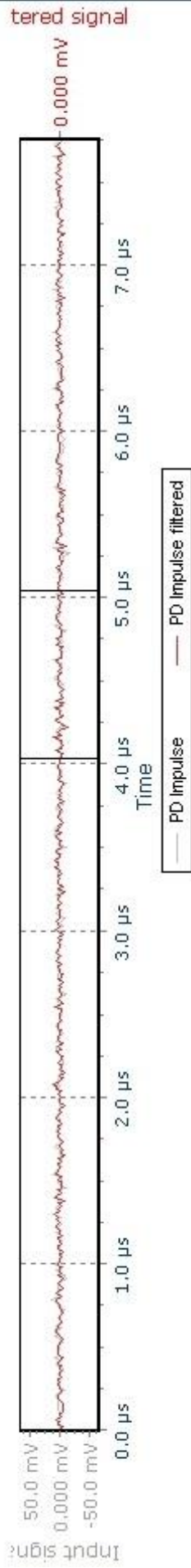
Distance: 147.20m @ 80.00m/ μ s

14 pav. $L_g=44,8m$



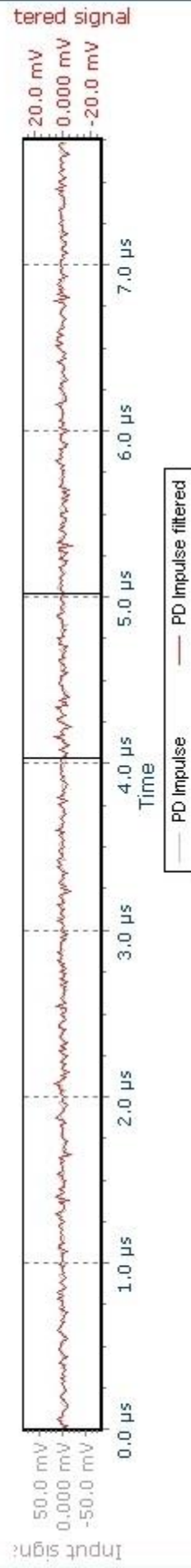
Distance: 44.80m @ 80.00m/ μ s

15 pav. $L_g=80,64m$



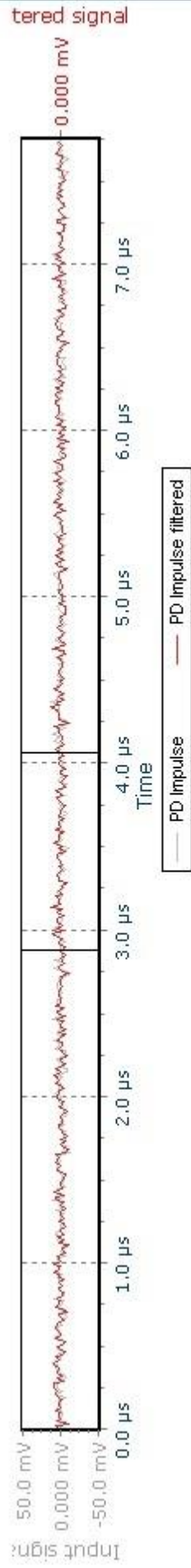
Distance: 80.64m @ 80.00m/ μs

16 pav. $L_g=79,36m$



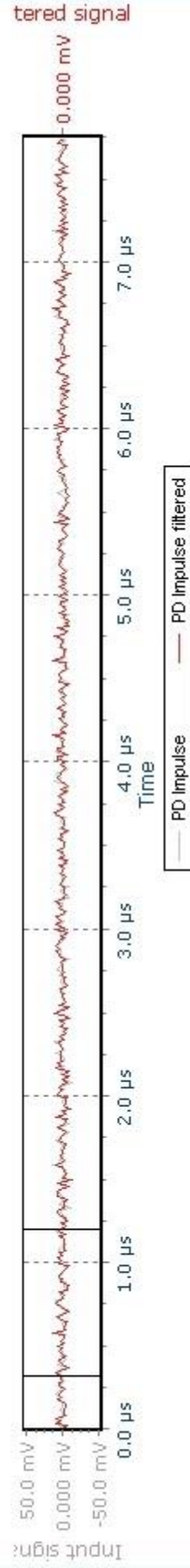
Distance: 79.36m @ 80.00m/ μs

17 pav. $L_g=94,72m$



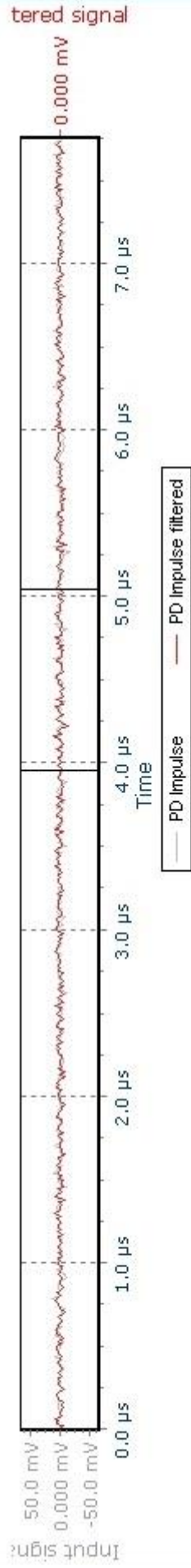
Distance: 94.72m @ 80.00m/ μs

18 pav. $L_g=70,40m$



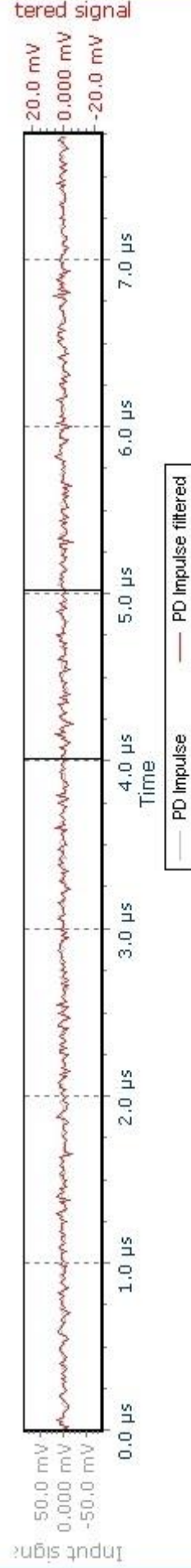
Distance: 70.40m @ 80.00m/ μs

19 pav. $L_g=87,04\text{m}$



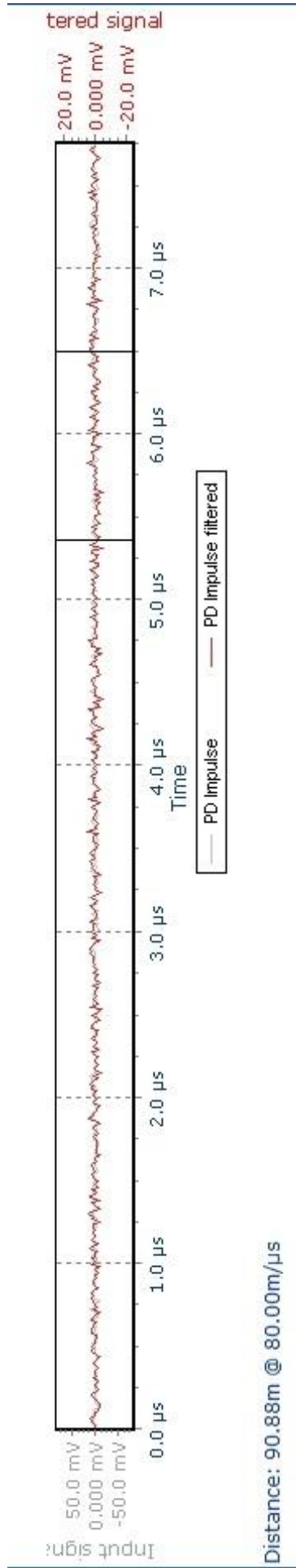
Distance: 87.04m @ 80.00m/ μs

20 pav. $L_g=80,64\text{m}$

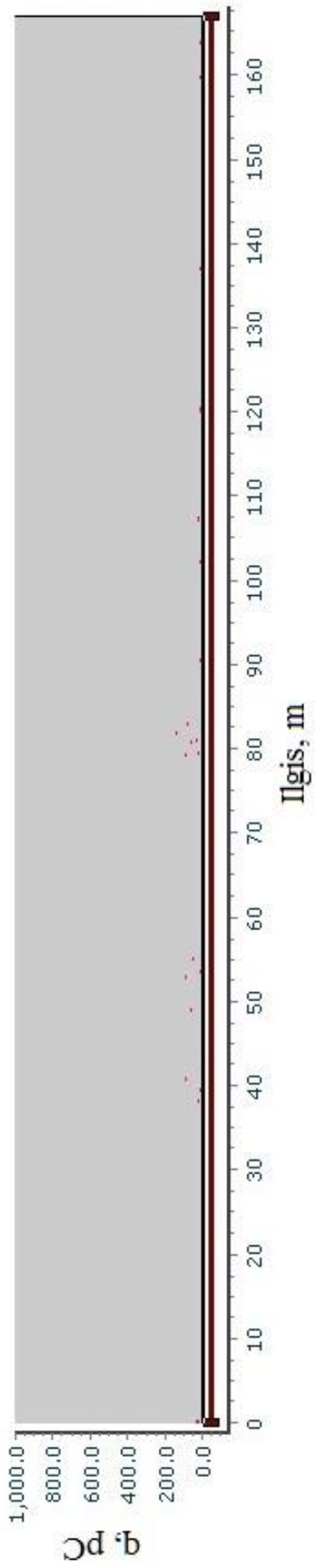


Distance: 80.64m @ 80.00m/ μs

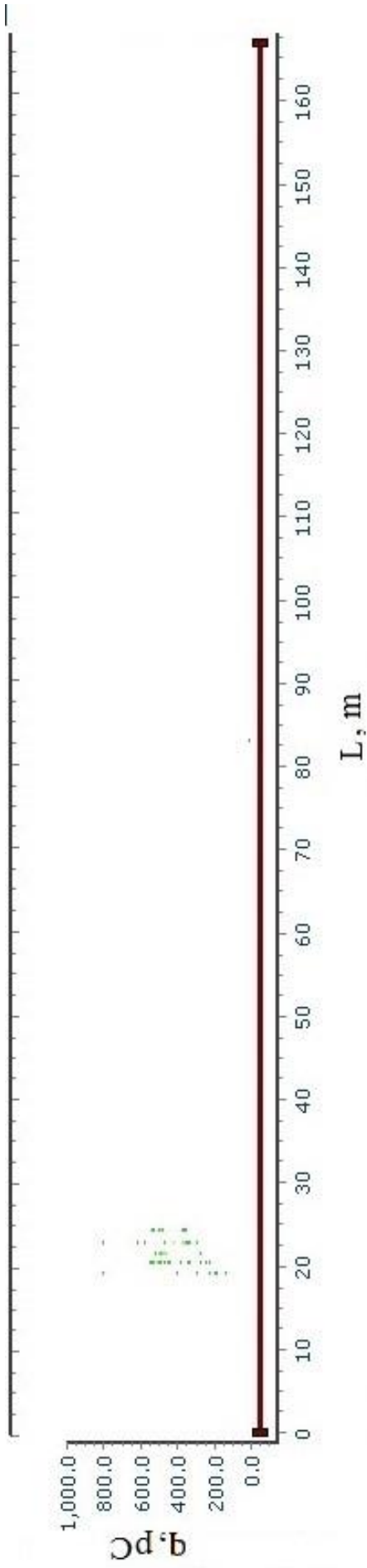
21 pav. $L_g=90,88\text{m}$



PRIEDAS NR. 2 DEFEKTO VIETOS NUSTATYMAS KABELYJE



PRIEDAS NR. 3 REALIOS GEDIMO VIETOS NUSTATYMAS



PRIEDAS NR. 4 MATLAB PROGRAMOS KODAS

```
%Virsitampiu procesai registruoti:
%1. Lazdijuose nuo 2009_08_11 iki 2009_08_26
%2. Kudirkos Naumiestyje nuo 2009_09_17 iki 2009_10_02
%3. Vilkaviskyje nuo 2009_10_02 iki 2009_10_09
clear all;
Transf_k=100;
Reg_Data=struct('Place', {}, 'Data_Path', {}, 'Data_Files', {});
%-----
%Lazdijai
Reg_Data(1).Place='Lazdijai';
Reg_Data(1).Data_Path='C:\2014 Magistras\Magistrinis\!naujas\modelis\10 kV
registrac Kreives\SCOPE_DATA';
Reg_Data(1).Data_Files='2009_08_13_10_49_51_890.csv';
%'2009_08_11_22_41_22_828.csv';
%'2009_08_12_03_59_47_921.csv';
%'2009_08_13_10_49_42_890.csv';
%'2009_08_13_10_49_51_890.csv';
%'2009_08_13_14_15_15_031.csv';
%'2009_08_13_14_18_12_578.csv';
%'2009_08_13_14_23_49_015.csv';
%'2009_08_13_14_26_25_531.csv';
%'2009_08_13_14_32_57_375.csv';
%'2009_08_13_14_35_21_593.csv';
%'2009_08_13_14_39_40_875.csv';
%'2009_08_15_20_07_19_109.csv';
%'2009_08_18_08_05_59_609.csv';
%'2009_08_18_08_24_03_437.csv';
%'2009_08_19_12_24_41_546.csv';
%'2009_08_20_19_40_26_125.csv';
%'2009_08_20_22_25_48_562.csv';
%'2009_08_21_00_38_47_109.csv';
%'2009_08_21_19_56_17_781.csv';
%'2009_08_21_21_35_10_781.csv';
%'2009_08_21_23_39_25_703.csv';
%'2009_08_22_03_05_23_218.csv';
%'2009_08_22_10_11_34_203.csv';
%'2009_08_22_21_38_36_609.csv';
%'2009_08_23_10_49_46_171.csv';
%'2009_08_25_16_09_30_062.csv';
%'2009_08_26_10_45_24_953.csv

%
%-----
%Kudirkos Naumiestis
Reg_Data(2).Place='Kudirkos Naumiestis';
Reg_Data(2).Data_Path='C:\2014 Magistras\Magistrinis\!naujas\modelis\10 kV
registrac Kreives\SCOPE_DATA';

%Reg_Data(2).Data_Files='2009_09_28_06_08_11_093.csv';
%Reg_Data(2).Data_Files='2009_09_17_06_28_04_281.csv';

Reg_Data(2).Data_Files='2009_09_18_21_50_41_562.csv';
%Reg_Data(2).Data_Files='2009_09_20_06_03_06_828.csv';
%Reg_Data(2).Data_Files='2009_09_23_11_11_05_375.csv';
%Reg_Data(2).Data_Files='2009_09_24_04_57_26_343.csv';
%Reg_Data(2).Data_Files='2009_09_24_09_10_27_875.csv';
%Reg_Data(2).Data_Files='2009_09_28_06_08_11_093.csv';
%Reg_Data(2).Data_Files='2009_09_17_06_01_53_843.csv';
%Reg_Data(2).Data_Files='2009_09_17_06_28_04_281.csv';
%Reg_Data(2).Data_Files='2009_09_18_21_50_41_562.csv';
```



```

%Reg_Data(2).Data_Files='2009_10_01_06_05_21_578.csv';
%Reg_Data(2).Data_Files='2009_10_01_09_12_27_609.csv';
%Reg_Data(2).Data_Files='2009_09_18_23_54_54_609.csv';
%Reg_Data(2).Data_Files='2009_09_17_06_03_39_312.csv';
%Reg_Data(2).Data_Files='2009_09_19_19_40_40_968.csv';
%Viliuko:
%Reg_Data(2).Data_Files='2009_10_02_01_03_25_953.csv';
%
%-----
%Vilkaviskis
Reg_Data(3).Place='Vilkaviskis';
Reg_Data(3).Data_Path='C:\Users\viliu_000\Desktop\10 kV registrac
Kreives\SCOPE_DATA';
Reg_Data(3).Data_Files='2009_10_08_00_44_30_453.csv';
%
%OBJEKTO PASIRINKIMAS
for i= 2: 2*size(Reg_Data,2)

    addpath(Reg_Data(i).Data_Path);

    for k = 1: size(Reg_Data(i).Data_Files,1)

        data_in = importdata(Reg_Data(i).Data_Files(k,:),',' );

        t=data_in.data(:,1);
        d2=data_in.data(:,2);
        d3=data_in.data(:,3);
        d4=data_in.data(:,4);
        d5=data_in.data(:,5);

        freg=1/(t(2)-t(1));
        N_sk=ceil(freg/10000);           % --- kiek reiksmiu suvidurkinti

        d_v2=b0_vidut(d2,N_sk);
        d_v3=b0_vidut(d3,N_sk);
        d_v4=b0_vidut(d4,N_sk);
        d_v5=b0_vidut(d5,N_sk);

        dt=t(N_sk)-t(1);
        tt=t+dt/2;

        figure('units','centimeters','position',[10 10 17 10],'NumberTitle','off')
%% --- 17,10 - KOPIJUOJAMO PIESINIO ISMATAVIMAI CENTIMETRAIS
        axes('fontsize',10);

        %plot(t,[d2 d3 d4 d5]*Transf_k/1000,'k','linewidth',2);hold on
%% --- piesia nefiltruotas kreives juoda spalva

        plot(tt(1:length(d_v2)),[d_v2 d_v3 d_v4 d_v5]*Transf_k/1000,'linewidth',2)
        grid on;
        set(get(gcf,'CurrentAxes'),'FontName','Arial','FontSize',10)
        %xlim([tt(1) tt(end)]);
        xlim([tt(1) tt(end)]);
        % ! Duomeni imties pasirinkimas
        % ylim([0 25]);
        xlabel('\it t ( s ) ');           % , 'fontweight','bold'
        ylabel('\it U ( kV ) ');
        %Date
        reg_time_y = Reg_Data(i).Data_Files(k,1:1:4);
        reg_time_m = Reg_Data(i).Data_Files(k,6:1:7);
        reg_time_d = Reg_Data(i).Data_Files(k,9:1:10);

```

```

%Time
reg_time_hh = Reg_Data(i).Data_Files(k,12:1:13);
reg_time_mm = Reg_Data(i).Data_Files(k,15:1:16);
reg_time_ss = Reg_Data(i).Data_Files(k,18:1:19);

title_text=strcat('Registracijos pastoteje:', ' ',Reg_Data(i).Place, ' ', '.
Data/Laikas:
',reg_time_y, '.',reg_time_m, '.',reg_time_d, '/',reg_time_hh, ':',reg_time_mm, ':
',reg_time_ss);
set(gcf,'Name',title_text);

title(title_text);
%legend(data_in.colheaders);
legend('Neutrale', 'Faze A', 'Faze B', 'Faze C');
pause
%close(gcf)
end

rmpath(Reg_Data(i).Data_Path);

end

%Spausdinamos fazes parinkimas 3-A 4-B 5-C
d_v10=d_v5/10; %CIA KEICIASI
plot(tt(1:length(d_v2)),d_v5*Transf_k/1000,'linewidth',2);
grid on;
set(get(gcf,'CurrentAxes'),'FontName','Arial','FontSize',15)
%xlim([tt(1) tt(end)]);
xlim([tt(1) tt(end)]);
%if expression
% statements
%end
%if expression1
% statements
%elseif expression2
% statements
%else
% statements
%end

%2010-03-24 P.V
%procesai vienoje fazeje
p1=abs(d_v10);
x1=p1(p1>9);
t1=1:length(x1);
q1=sum(x1);
q2=length(x1)*9/freg;
z1=q1/freg;
zd=z1-q2;
%rusiavimas
x11=sort(x1,'descend');
plot(t1/freg,x11);
grid on;

set(get(gcf,'CurrentAxes'),'FontName','Arial','FontSize',10)
%xlim([tt(1) tt(end)]);
xlim([0 0.2]);
%xlim([0 3]);
ylim([8 22]);

```

```

%
Duomenu imties pasirinkimas
% ylim([0 25]);
xlabel('\it t ( s ) '); % , 'fontweight','bold'
ylabel('\it U ( kV ) ');
%Date
reg_time_y = Reg_Data(i).Data_Files(k,1:1:4);
reg_time_m = Reg_Data(i).Data_Files(k,6:1:7);
reg_time_d = Reg_Data(i).Data_Files(k,9:1:10);
%Time
reg_time_hh = Reg_Data(i).Data_Files(k,12:1:13);
reg_time_mm = Reg_Data(i).Data_Files(k,15:1:16);
reg_time_ss = Reg_Data(i).Data_Files(k,18:1:19);

title_text=strcat('Virsitampio lygio ir poveikio trukmes charakteristika.
Registracijos pastoteje:', ' ',Reg_Data(i).Place, ' ', '. Data/Laikas:
',reg_time_y, '.',reg_time_m, '.',reg_time_d, '/',reg_time_hh, ':',reg_time_mm, ':
',reg_time_ss);
set(gcf,'Name',title_text);

title(title_text);
%legend(data_in.colheaders);
T=t1/freq;

%Registracijos duomenu apdorojimas
% nreg_p=100; %registracijos pradzia
% nreg_g=600; %registracijos galas
nreg_p=32090; %registracijos pradzia
nreg_g=35000; %registracijos galas
d_v10=d_v5(nreg_p:nreg_g, 1)*100;
plot(tt(nreg_p:nreg_g),[d_v10], 'linewidth',2);
title('Analizuojamoji imtis');
xlabel('\it t ( s ) ');
ylabel('\it U ( V ) ');
ylim([-20*10^3 20*10^3]);
xlim([tt(nreg_p) tt(nreg_g)]);
legend('Faze C'); %CIA OAVADINIMAS
grid on;
pause
treg=(nreg_g-nreg_p+1)/freq;

%clear all;

% II ETAPAS DALINIU ISLYDZIU MODELIAVIMAS
%2010-07-25 Sferinio defekto pilnas modelis
%1.1. Duomenu ivedimas
%clear all;
%Um=100000;% V
D=0.0005;% m
r=D/2;% m
s=0.0035-D;% m
T=treg;% s
h=1/freq;
%h=5/10^6;% zingsnis
tau=0.01/10^6;% s vidutine daliniu islydziu sroves impulso trukme (0.01-0.3)
Eu=3000000;% V/m prad el lauko stipris normaliomis atmosfersalyg

```

```

p=760;% mm Hg st atmosferinis slegis;
Temp=20;% oC Temperatura;
eo=8.854*10^(-12); %F/m dielektrine skvarba
e1=2.3; %XLPE izoliacijos dielektrine skvarba (keisti)
f=50;% Hz daznis
w=2*pi*f; %kampinis daznis

%defekto radimo duomenys:
l=167; %kabelio ilgis m
dT=3.65e-6; %Tiesioginio impulso trukme s
L=4.18e-6; %Atsispindejusio impulso trukme s
DI=(1-dT/L)*100; %DI procentais
Lg=l*DI/100; % defekto vieta

%Skaiciavimai
%1.2. Pradiniu parametru nustatymas
CDI=4*pi*eo*r; % Sferinio defekto savitoji talpa
%CDI=eo/6*D*pi % cilindrinio defekto savitoji talpa
ro=r/s*log(2);
Cid=pi*eo*e1*r*(1+ro+ro^2+ro^3+ro^4); %kietojo izoliacijos sluoksnio talpa

delta=p/760*293/(273+Temp); %Slegio ir temperaturos pataisos koeficientas
Uk=2*r*Eu; %Defekto kibirkstinio tarpelio pramusimo itampa
UDI=Cid/(CDI+Cid);%itampos pasiskirstymas tarp defekto ir likusios
izoliacijos dalies
UDIpr=Uk/UDI; %modeli veikianti itampa pirmo pramusimo metu
Idmx=Cid*Uk/tau; % Sroves suolio amplitude persikrovimo metu
Idmx0=Idmx*tau; % sroves dydis kai t=0;
q1x=Uk*Cid; % daliniu islydziu (defekto) tariamasis kruvis
Wkx=q1x*UDIpr/2; % Dalinio islydzio energija
%t1p=asin(UDIpr/Um)/pi*2*T; % Dalinio islydzio pirmas momentas
%nx=T/t1p; % daliniu islydziu kiekis
%Wkxdaz=nx/T %daliniu islydziu daznis

%1.3. Modeliavimas
mU=UDIpr; %modeli veikianti itampa pirmo pramusimo metu
n=T/h;
to=0;
%Uo=0;
Uo=d_v10(1);
Im=0;
W=0;
minus=1;
plus=1;
for N=1:1:n;
up(N)=d_v10(N); %Modeli veikianti itampa
u(N)=up(N);
S(N)=u(N);
U=mU;
OLD=U;
t=to+h;
to=t;
if u(N) <0
u(N)=abs(u(N));
if minus==1
minus=0;
plus=1;
W=0;
Uo=0;
end
else
if plus==1

```

```

minus=1;
plus=0;
W=0;
Uo=0;
end
end
SS=u(N)-Uo;
if abs(SS) >=U
Im=Idmx*tau;% Sroves amplitude
II(N)=Im;
Uo=Uo+SS;%OLD;
US=Uo;
%U=U+Uo;
KK(N)=Uo;
ts=t;
else
if Uo > 0
Uo=US;
KK(N)=Uo;
else
KK(N)=Uo;
end
if Im > 0
Is=Im*exp(-(t-ts)/tau);
II(N)=Is;
else
II(N)=Im;
end
end
LL(N)=t;
end

%1.4. Kreiviu braizymas
set(get(gcf,'CurrentAxes'),'FontName','Arial','FontSize',10)
subplot(3,1,1),plot(tt(nreg_p:nreg_g),up,'linewidth',2);
title('Veikianti itampa');
xlabel('\it t} ( s ) ');
ylabel('\it U} ( V ) ');
xlim([tt(nreg_p) tt(nreg_g)]);
grid on;
subplot(3,1,2),plot(tt(nreg_p:nreg_g),KK*UDI,'linewidth',2);
title('Defekta veikianti itampa daliniu islydziu modelije');
xlabel('\it t} ( ) ');
ylabel('\it U} ( V ) ');
xlim([tt(nreg_p) tt(nreg_g)]);
grid on;
subplot(3,1,3),plot(tt(nreg_p:nreg_g),II,'linewidth',1);
title('Daliniu islydziu srove');
xlabel('\it t} ( s ) ');

ylabel('\it Id} ( A ) ');
xlim([tt(nreg_p) tt(nreg_g)]);
grid on;

```