



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**

**Vilius Malažinskas**

**AUKŠTOSIOS ĮTAMPOS ĮRENGINIŲ KOMBINUOTOSIOS**  
**IZOLIACIJOS BŪKLĖS TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovas**

Lekt. dr. Povilas Valatka

**KAUNAS, 2016**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**ELEKTROS IR ELEKTRONIKOS FAKULTETAS**  
**ELEKTROS ENERGETIKOS SISTEMŲ KATEDRA**

**AUKŠTOSIOS ĮTAMPOS ĮRENGINIŲ KOMBINUOTOSIOS**  
**IZOLIACIJOS BŪKLĖS TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas  
**Elektros energetikos sistemos (621H63005)**

**Vadovas**

Lekt. dr. Povilas Valatka

**Recenzentas**

**Projektą atliko**

Vilius Malažinskas

**KAUNAS, 2016**



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Elektros ir elektronikos fakultetas

(Fakultetas)

Vilius Malažinskas

(Studento vardas, pavardė)

Elektros energetikos sistemos (621H63005)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

Baigiamojo projekto „Aukštosios įtampos įrenginių kombinuotosios izoliacijos būklės tyrimas“

### AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 \_\_\_\_ m. \_\_\_\_\_ d.  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, Viliaus Malažinsko, baigiamasis projektas tema „Aukštosios įtampos įrenginių kombinuotosios izoliacijos būklės tyrimas“ 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)

Malažinskas, Vilius. Aukštosios įtampos įrenginių kombinuotosios izoliacijos būklės tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas lekt. dr. Povilas Valatka; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas, Elektros energetikos sistemų katedra.

Kaunas, 2016. 48 psl.

## **SANTRAUKA**

*Šiame magistro baigiamajame darbe tiriama įrenginio kombinuotosios izoliacijos charakteristikų parametrai.*

*Baigiamojo projekto tikslas - nustatyti izoliaciniame kartone esančio defekto pramušimo parametru charakteristikas ir jų kitimo tendencijas, modelyje keičiant izoliacinės alyvos sluoksnio dydį.*

*Tyrime aprašomas eksperimentinis bandymas, kurio metu buvo nustatinėjami izoliacinio kartono ir izoliacinio kartono, įmerkto izoliacinėje alyvoje, dalinių išlydžių parametrai, bandomąjį modelį veikiant 11 kV bandomąja įtampa.*

*Naudojamas matematinis modelis buvo pritaikytas tirti dalinių išlydžių parametru charakteristikas kombinuotoje izoliacijoje, kai defektas yra kietojoje izoliacijos dalyje, priimant, kad izoliacinė alyva yra be defektu. Tiriama skirtingo dydžio defektu parametrai esant skirtingo izoliacinės alyvos sluoksnio storiui. Naudojantis matematinium modeliu, nustatytas charakteristikų kitimas ir kritiniai izoliacijos defekto dydžiai esant skirtingiems izoliacinės alyvos sluoksnio storiams. Pateiktas įrenginio izoliacijos būklės nustatymo metodas.*

*Reikšminiai žodžiai:*

**Daliniai išlydžiai, izoliacija, tyrimas, alyva, krūvis, įtampa.**

Malažinskas, Vilius. Investigation of Combined Insulation Condition of High-Voltage Electrical Equipment. Final project of master's degree supervisor prof./ lect. Povilas Valatka; Kaunas University of Technology, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, Department of Electric Power Systems.

Kaunas, 2016. 48 pp.

## **SUMMARY**

*This final project of master's degree investigates combined insulation parameters characteristics of electrical equipment. The purpose of this research is to evaluate defects parameters characteristics in the insulating pressboard, while changing oil level in insulation model.*

*The investigation describes the experimental test that analyses characteristics of parameters of insulating pressboard and insulating pressboard dipped in oil, while testing it with 11 kV voltage.*

*The mathematical model was adapted to investigate characteristics of partial discharge parameters using combined insulation when insulations defect is in the solid insulation, stating that the oil is free from defects. Mathematical model shows characteristics of parameters, when changing the size of defect and the level of oil insulation. Investigation revealed the dependence of characteristics and the critical size of defects in different level of oil in the insulation model. Method for determination of electrical equipment insulation condition was presented.*

*Keywords:*

**Partial discharge, insulation, investigation, oil, charge, voltage.**

## Turinys

ŽYMĖJIMAI .....	7
PAVEIKSLŲ SARAŠAS .....	8
LENTELIŲ SARAŠAS .....	9
ĮVADAS .....	10
1. IZOLIACIJOS BŪKLĖS TYRIMŲ APŽVALGA.....	12
1.1. Įrenginio būklės nustatymo tyrimų apžvalga.....	13
1.2. Praktiniai metodai įrenginio izoliacijos būklės nustatymui .....	15
1.2.1. Dalinių išlydžių įtakos izoliacijos būklei analizė .....	15
1.2.2. Dalinių išlydžių nustatymo metodai .....	16
1.3. Tyrimų įvertinimas.....	17
2. AUKŠTOSIOS ĮTAMPOS ELEKTROS ĮRENGINIŲ IZOLIACIJOS RESURSO MATEMATINIO MODELIO APRAŠYMAS .....	18
2.1. Veiksniai įtakojantys įrenginio izoliacijos resursą.....	18
2.2. Dalinių išlydžių parametrai .....	20
2.3. Matematinis modelis .....	20
3. TIRIAMOJI DALIS .....	25
3.1. Matematinio modelio rezultatai. Charakteristikų tyrimas.....	25
3.1.1. Pagrindinių parametrų skaičiavimas.....	25
3.1.2. Izoliacinės alyvos sluoksnio įvertinimas modelyje .....	29
3.1.3. Kritinio defekto dydžio nustatymas.....	32
3.2. Laboratorinis bandymas .....	34
3.2.1. Bandymo aprašymas.....	34
3.2.2. Bandymas Nr.1 .....	36
3.2.3. Bandymas Nr.2 .....	40
3.1.4. Bandymo rezultatų analizė.....	44
IŠVADOS .....	46
LITERATŪRA .....	47
PRIEDAS NR.1 .....	49
PRIEDAS NR.2 .....	56

## ŽYMĖJIMAI

$D$	Izoliacijos defekto skersmuo
$s_k$	Atstumas nuo defekto iki kietosios izoliacijos galo
$s_s$	Skystosios izoliacijos storis
$\tau$	Dalinių išlydžių vidutinė impulso trukmė
$E_0$	Pradinis elektrinis lauko stipris esant normaliomis atmosferinėmis sąlygomis
$\epsilon_0$	Dielektrinė skvarba vakuume
$\epsilon$	Medžiagos santykinė dielektrinė skvarba
$T$	Temperatūra
$f$	Dažnis
$\omega$	Kampinis dažnis
$C_{Dk}$	defekto savitoji talpa kietojoje izoliacijoje
$C_{ik}$	kietojo izoliacijos talpa išlydžio srovės kelyje
$C_{is}$	skystosios izoliacijos talpa išlydžio srovės kelyje
$C_{ek}$	ekvivalentinė izoliacijos modelio talpa, kai defekte vyksta pramušimas
$U_p(t)$	Izoliaciją veikianti įtampa
$U_k$	defekto kietajame izoliacijos sluoksnyje pramušimo įtampa
$U_{DI}(t)$	Įtampa, veikianti defektą tam tikru laiko momentu
$U_{DIpr}$	Įtampa, veikianti modelį defekto pirmo pramušimo metu
$\delta$	Temperatūros ir slėgio pataisos koeficientas
$k$	Koeficientas nurodantis įtampos pasiskirstymą tarp defekto ir likusios kombinuotosios izoliacijos dalies
$I_{dm}$	Srovės šuolio, dalinio išlydžio metu, amplitudė
$i_d(t)$	Išsikrovimo srovė
$q$	Tariamasis krūvis
$W_k$	Energijos kiekis, susidarantis dalinio išlydžio metu
$p$	Atmosferos slėgis

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

2.1 pav. Kietosios izoliacijos struktūrinių defektų tipai .....	19
2.2 pav. Kombinuotosios izoliacijos fragmentas su defektu kietosios izoliacijos dalyje.....	21
2.3 pav. Kombinuotosios izoliacijos, su defektu kietosios izoliacijos dalyje, matematinio modelio principinė schema .....	21
3.1 pav. Kudirkos Naumiesčio 10 kV pastotėje 2009-10-02 užregistruoti viršįtampiai .....	25
3.2 pav. Kudirkos Naumiesčio 10 kV pastotėje 2009-10-02 užregistruota „C“ fazės kreivė padidinta 1,19 karto .....	26
3.3 pav. Įtampos kreivė ir modelyje užregistruotų dalinių išlydžių tariamasis krūvis, kai defekto dydis 1 mm .....	28
3.4 pav. Modelio fiksuojamas energijos kiekis $W_k$ , susidarantis dalinio išlydžio metu, ir dalinių išlydžių tariamieji krūviai $q$ , kai modelyje yra keli skirtingo dydžio defektai .....	29
3.5 pav. Įtampos dydis $U_{Dlpr}$ , veikiantis modelį defekto tarpelio pramušimo metu, esant skirtingo izoliacinės alyvos sluoksnio dydžiui $s_s$ ir defekto dydžiui $D$ .....	30
3.6 pav. Išsikrovimo srovės amplitudės dydis $I_{dm}$ , susidarantis po defekto tarpelio pramušimo, esant skirtingo izoliacinės alyvos sluoksnio storiumi $s_s$ ir defekto dydžiui $D$ .....	31
3.7 pav. Tariamo krūvio dydis, susidarantis dalinio išlydžio metu, esant skirtingo izoliacinės alyvos sluoksnio storiumi $s_s$ ir defekto dydžiui $D$ .....	31
3.8 pav. Tariamojo krūvio $q$ priklausomybė nuo defekto dydžio $D$ esant skirtingoms izoliacinės alyvos sluoksnio storio $s_s$ reikšmėms .....	33
3.9 pav. Įtampos, veikiančios modelį pirmojo dalinio išlydžio metu, $U_{Dlpr}$ priklausomybė nuo defekto dydžio esant skirtingoms $s_s$ reikšmėms .....	33
3.10 pav. „PD-Smart electrical“ sistemos sujungimas eksperimentiniam bandymui.....	35
3.11 pav. Bandymo stendas .....	36
3.12 pav. Bandymo objektas - izoliacinis kartonas įmerktas į izoliacinę alyvą .....	36
3.13 pav. Momentinis dalinių išlydžių krūvis pagal fazės kampą, naudojant izoliacinį kartoną ..	37
3.14 pav. Išsikrovimo srovės dydis bandymo metu, naudojant izoliacinį kartoną.....	37
3.15 pav. Momentinis dalinio išlydžio energijos dydis pagal fazės kampą .....	38
3.16 pav. Dalinių išlydžių pikinės reikšmės pagal fazės kampą, kai laiko momentas $t = 20$ s .....	38
3.17 pav. Dalinių išlydžių pasiskirstymas laiko momentu $t = 20$ s .....	39
3.18 pav. Dalinių išlydžių dažnumas laiko momentu $t = 20$ s.....	39
3.19 pav. Pagrindiniai bandymo Nr.1 parametrai.....	40
3.20 pav. Bandymo Nr.1 metu užfiksuotos mažiausia ir didžiausia dalinių išlydžių reikšmės.....	40



3.21 pav. Momentinis dalinių išlydžių krūvis pagal fazės kampą, naudojant kombinuotąją izoliaciją.....	41
3.22 pav. Išsikrovimo srovės dydis bandymo metu, naudojant kombinuotąją izoliaciją .....	41
3.23 pav. Momentinis dalinio išlydžio energijos dydis pagal fazės kampą .....	42
3.24 pav. Dalinių išlydžių pikinės reikšmės pagal fazės kampą, kai laiko momentas $t = 19$ s .....	42
3.25 pav. Dalinių išlydžių pasiskirstymas laiko momentu $t = 19$ s .....	43
3.26 pav. Dalinių išlydžių dažnumas laiko momentu $t = 19$ s.....	43
3.27 pav. Pagrindiniai bandymo Nr.2 parametrai.....	44
3.28 pav. Bandymo Nr.2 metu užfiksuotos mažiausia ir didžiausia dalinių išlydžių reikšmės.....	44

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

3.1 lentelė. Matematinio modelio tyrimo rezultatų suvestinė .....	28
3.2 lentelė. $s_s$ reikšmės, kurias pasiekus parametrai $U_{DIpr}$ , $I_{dm}$ , $q$ kinta nežymiai.....	32

## ĮVADAS

Elektros energetikos sistemos stabilumui užtikrinti reikalingas patikimas sistemos elementų darbas. Kiekvienas sistemos elementas yra veikiamas įvairių aplinkos veiksnių, kurie gali sumažinti jo eksploatacijos resursą. Todėl įrenginių būklės įvertinimas yra svarbiausias patikimo sistemos darbo palaikymo veiksnys, kuris užtikrina patikimą ir ekonomišką elektros energetikos sistemos darbą.

Aukštosios įtampos įrenginių izoliacijos būklė bei kokybiškas jų darbas priklauso nuo įvairių veiksnių: viršįtampių, dalinių išlydžių, perkaitimų, vibracijų ir t.t., kuriuos sukelia stiprus elektrinis laukas, šiluminis poveikis, drėgmė, esamos izoliacijoje priemaišos, defektai, ištirpusio vandens, dujų kiekis alyvinėje izoliacijoje ir kita [1, 2, 3, 4]. Dėl šių ir kitų veiksnių, vykdytą elektros įrenginių eksploataciją, atsiranda įvairūs defektai, kurie laiku nepašalinti gali negrįžtamai sugadinti įrenginį, taip pakenkdamai elektros energetikos sistemos stabilumui.

Elektros energetikos sistemos stabilumui užtikrinti vykdomi planiniai elektros įrenginių patikrinimai, kurių metu įrenginys yra išjungiamas iš sistemos. Išjungus įrenginį, sistemos veikimui palaikyti, reikalingi laikini pakeitimai, kurie užtikrintų sistemos darbą, tačiau tai sumažina sistemos patikimumą. Siekiant atlikti elektros įrenginio kombinuotosios izoliacijos būklės analizę, reikalingi metodai, kurie leistų tai padaryti efektyviau, ekonomiškiau ir nepakenkiant sistemos stabilumui.

Kadangi planiniai įrenginių patikrinimai yra vykdomi konkrečiais laiko intervalais, būtent dėl šios priežasties jie yra netikslingi. Kadangi izoliacijos būklė, dėl sustiprėjusio aplinkos poveikio, gali pradėti kisti itin sparčiai arba, esant palankioms sąlygoms, kisti visiškai nežymiai, nustatyti patikros laiko intervalai gali būti per dideli siekiant išvengti įrenginio gedimo arba per maži ir netikslingi. Siekiant optimizuoti įrenginių patikrą, reikalinga įvertinti izoliacijos būklę ir jos kitimą pagal ją veikiančius veiksnus, kas leistų planuoti įrenginio remontą ir patikrą vykdyti pagal kombinuotosios izoliacijos būklę.

### **Darbo tikslas**

Nustatyti izoliaciniame kartone esančio defekto pramušimo parametrų charakteristikas ir jų kitimo tendencijas.

### **Darbo uždaviniai**

1. Nustatyti parametrus, kurie charakterizuoja esamą izoliacijos būklę.
2. Nustatyti izoliacinės alyvos kiekio įtaką kombinuotosios izoliacijos būklei.

3. Naudojantis matematiniu modeliu, atlikti defekto dydžio įtakos izoliacijai analizę, nustatyti kritinį defekto dydį.
4. Eksperimentiniais metodais ištirti pagrindinių charakteristikų skirtumus tarp kietosios ir kombinuotosios izoliacijų.

### **Problema**

Esami izoliacijos būklės tyrimo metodai yra sudėtingi, reikalaujantys didelių investicijų, daugeliu atveju nepilnai įvertinantys visų parametru charakteristikas, kurios įtakoja dalinių išlydžių intensyvumą, izoliacijos būklę ir įrenginio eksploatacijos resursą. Todėl yra tikslinga išanalizuoti parametrus, pagal kuriuos būtų galima nustatyti įrenginio izoliacijos būklę, ir pateikti izoliacijos būklės nustatymo metodą.

# 1. IZOLIACIJOS BŪKLĖS TYRIMŲ APŽVALGA

Elektros energetikos sistemos patikimas darbo režimas yra svarbiausias uždavinys, siekiant saugaus įrenginių eksploatavimo bei mažiausių elektros rinkos kainų ir remonto kaštų. Norint užtikrinti sistemos patikimumą, reikalingas tinkamas elektros įrenginių būklės nustatymas, kuris leistų planuoti įrenginio remonto darbus ir nustatyti likusį eksploatacijos resursą. Šiam tikslui naudojami įvairūs elektros įrenginio būklės nustatymo metodai, kuriuos pagal įrenginio stebėjimo pobūdį galima skirstyti į nuolatinės stebėsenos metodus ir į periodinius stebėsenos metodus.

Periodinius stebėsenos metodus reglamentuoja elektros įrenginių bandymų normos ir apimtys bei gamintojo pateikiami reikalavimai [1, 5]. Šiuo metodu ekonomiškai naudinga tikrinti didelį kiekį elektros įrenginių, kurie elektros energetikos sistemoje nėra esminiai. Taip su nedideliu kiekiu stebėsenos įrenginių galima įvertinti visų sistemos dalyje esančių įrenginių būklę. Tačiau šis metodas negali įvertinti galimo aplinkos poveikio pakitimo. Dėl šios priežasties, atlikus įrenginio būklės įvertinimą ir nustatčius, kad įrenginys tinkamas eksploatacijai, o vėliau suaktyvėjus įrenginio izoliacijos irimui, pvz: įrenginio aplinkoje atsiradus viršįtampiams, įrenginys gali sugesti iki sekančio patikrinimo datos. Tokiu atveju elektros energetikos sistemoje įjungiamas rezervinis įrenginys, keičiama sistemos veikimo schema arba papildomai apkraunami veikiantys įrenginiai, dėl ko gali padaugėti gedimų.

Siekiant išvengti kritinių elektros energetikos sistemos elementų gedimų, būtinas nuolatinis įrenginio stebėjimas. Nors šio metodo investiciniai kaštai yra itin dideli, įrenginio eksploatacijos parametrai yra stebimi nuolat: registruojami parametrų nukrypimai nuo normos, vertinama įrenginio būklė, nustatomas įrenginio eksploatacijos resursas. Tai leidžia atlikti planinius remonto darbus, užtikrinant patikimą sistemos darbą.

Vertinant įrenginio būklę analizuojami skirtingi parametrai: izoliacijoje vykstančių dalinių išlydžių poveikiui įrenginio eksploatacijos resursui nustatyti, registruojamas tariamasis krūvis; įrenginio apsaugai nuo perkaitimo, registruojama jo temperatūra; įrenginio stabilaus darbo užtikrinimo nustatymui, registruojamos vibracijos tam tikruose jo taškuose; įrenginio alyvos būklės nustatymui naudojama chromatografinė analizė – tiriamas alyvos cheminės sudėties kitimas, taip nustatant esančius defektus [1].

Siekiant sudaryti matematinį modelį, kuriuo būtų galima įvertinti įrenginio būklę, reikalinga nustatyti svarbiausias charakteristikas, kurios turi didžiausią įtaką tinkamai įrenginio eksploatacijai. Galima stebėti nuostolių kampą ar dalinius išlydžius, kuriuos įtakoja įvairūs veiksniai, ir pagal tai nustatyti įrenginio resursą ir esamą būklę. Taip pat galimas įvairių parametrų, tokių kaip drėgnumas, dujų kiekis, viršįtampiai, priemaišų kiekis izoliacijoje ir kita, stebėjimas [1, 2, 4, 5, 6, 7]. Tinkamai įvertinus pasirinktų parametrų įtaką įrenginio resursui, galimas

matematinio modelio sudarymas, kurį galima realizuoti įrenginio būklės kitimo tendencijų nustatymui.

Izoliacijos būklę lemiantys veiksniai pagal savo pobūdį gali būti laikomi lėtai kintančiais arba dinamiškais. Tie patys parametrai, toki kaip izoliacinė varža, daliniai išlydžiai, dujų kiekis izoliacijoje, esant skirtingiems veiksniams gali kisti skirtingu greičiu. Jeigu įrenginys dirba statiškoje aplinkoje, jo resursas bus didesnis nei įrenginio, kurį galima veikia viršįtampiai, srovės pokyčiai, stiprus elektromagnetinis laukas ir kita [4]. Dėl šios priežasties (kintančių aplinkos veiksnių) yra itin sudėtinga nustatyti tikslų įrenginio resursą. Tačiau esamos būklės nustatymas šiuo atveju yra paprastesnis.

### **1.1. Įrenginio būklės nustatymo tyrimų apžvalga**

Šioje darbo dalyje apžvelgiami mokslininkų, tyrusių elektros įrenginių izoliacijos būklės nustatymą, publikacijos, analizuojami jų pasiūlyti modeliai ir būklę lemiančių veiksnių charakteristikos.

Vienas iš šia tema vykdytų tyrimų yra dalinių išlydžių proceso kombinuotojoje alyvos ir popieriaus izoliacijoje tyrimas [8]. Tyrime naudojamame modelyje keliami  $U_p(t)$  – izoliaciją veikianti įtampa, kol pasiekiami kritinė pramušimo įtampa  $U_k$  ar  $U_s$  kietojoje arba skystojoje izoliacijoje. Vienoje iš izoliacijos dalių įtampai viršinus kritinę įtampą, pramušamas tarpelis  $D_s$  ar  $D_k$  ir defekto talpa šuntuojama. Taip gaunamas srovės šuolis ir kontūru teka ekvivalentinės talpos išsikrovimo srovė  $i_d(t)$  [8].

Tyrime aprašoma išlydžių priklausomybė nuo izoliacijos išilimo, slėgio poveikis dalinių išlydžių procesui, defekto parametrų įtaka dalinių išlydžių procesui ir dujų susidarymo poveikis daliniams išlydžiams. Tam priimta, kad temperatūros kitimas siekia  $+10^{\circ}\text{C}$  -  $+90^{\circ}\text{C}$ , slėgio kitimas skystoje izoliacijos dalyje priimamas 760, 900, 1060 mm Hg st. defekto skersmuo  $D_s$ ,  $D_k$  kinta nuo 0,1 mm iki 2 mm [8].

Pateiktas modelis imituoja kombinuotosios izoliacijos dalinių išlydžių procesus bei nustato išsiskyrusių dujų kiekį. Šiuo metodu siūloma prognozuoti įrenginio resursą, taip optimizuojant įrenginių remontą.

Kitame tyrime buvo analizuojami daliniai išlydžiai kombinuotoje kartono – alyvos izoliacijoje [8]. Autoriai savo darbu akcentuoja, kad skirtingoje izoliacijos dalyje dalinių išlydžių poveikis, bendram įrenginio izoliacijos modeliui, yra skirtingas. Pabrėžiama, kad daliniai išlydžiai alyvoje nepaveikia izoliacijos taip kaip vykstantys kartone. Dėl šios priežasties, registruojant tam tikro dydžio dalinius išlydžius, sunku nustatyti jų daromą žalą, kol nenustatyta, kurioje izoliacijos dalyje jie vyksta.

Įvairaus tipo bandymo objektai buvo veikiami skirtingos bandomosios įtampos ir dažnių. Publikacijoje pateikiama dalinių išlydžių koreliacijos analizė. Pagal skirtingą dalinių išlydžių išsidėstymą, autoriai sprendžia apie jų įvykimo vietą [8].

Kitame analizuojamame tyrime pateikiamas modelis, kuris įvertina transformatorių kombinuotosios izoliacijos senėjimą pagal dalinių išlydžių parametrus [10]. Naudojamas bandomasis objektas buvo su žinomo dydžio defektu. Veikiant įvairiems aplinkos veiksniams (temperatūros padidėjimas, didesnis elektrinis laukas, padidinta bandomoji įtampa ir kita) buvo imituojamas izoliacijos senėjimo pagreitinimas.

Sukurto modelio tikslumas siekia 93 % ir daugiau [10]. Modelis nustato esamą izoliacijos būseną. Tačiau jame nėra atsižvelgiama į atskirą magnetinio lauko poveikį izoliacijoje. Autoriai akcentuoja, kad terminis poveikis yra pagrindinis izoliacijos senėjimo proceso veiksnys.

Kitame tyrime analizuojami dalinių išlydžių parametrai, vykstantys alyva impregnuoto izoliaciniame kartone [11]. Šiame darbe taip pat akcentuojamas temperatūros poveikis įrenginio izoliacijos resursui.

Tyrimas buvo vykdomas bandomąjį objektą testuojant 6 ir 16 kV bandomąja įtampa. Rezultatai pateikiami esant skirtingoms aplinkos temperatūroms: 25 ir 50 °C [11]. Autoriai analizuoja dalinių išlydžių pasiskirstymą fazėje ir pikines jų vertes esant skirtingoms temperatūros vertėms. Šiame tyrime nustatyta, kad kylant aplinkos temperatūrai, izoliacijos resursas mažėja.

Kitas analizuojamas tyrimas yra transformatoriaus impregnuoto kartono izoliacijos senėjimo tyrimas [12]. Šiame darbe pateikiamos dalinių išlydžių kreivės, po tam tikro eksploataavimo valandų skaičiaus.

Bandymai atliekami su 0,75; 3,4; 4,1; 5,8 ir 10,8 kV bandomąja įtampa. Ilgiausias bandymas buvo atliekamas 5258 valandas, kai bandomasis objektas buvo veikiamas 3,4 kV įtampa [12]. Tam tikrais laiko intervalais buvo registruojami daliniai išlydžiai. Tyrimu buvo siekiama nustatyti senėjimo proceso intensyvėjimo kitimą. Tinkamai išanalizavus senėjimo procesą būtų galima įrenginio eksploatacijos resursą esant kintamai ir pastoviai darbo aplinkai.

Toliau pateikiama tyrimo analizė, kuriuo siekiama nustatyti įrenginyje esančių dalinių išlydžių šaltinio vietą [13]. Siekiant tinkamo elektros įrenginio veikimo, būtinas defektų šalinimas. Metodika, kuri padeda nustatyti įrenginio defektų vietas, būtų naudinga finansiškai.

Bandymo metu buvo bandomas specialiai pritaikytas galios transformatorius. Apvijose buvo imituojami dalinių išlydžių impulsai, kurie registruojami įvaduose [13]. Bandymai parodė, kad modelis yra pakankamai tikslus centrinėje apvijų dalyje. Pastebima, kad defektui atsiradus kitose įrenginio dalyse, jo vietą nustatyti tinkamai gali būti sudėtinga. Dėl šios priežasties, reikalingas modelio tobulinimas.

## **1.2. Praktiniai metodai įrenginio izoliacijos būklės nustatymui**

Izoliacijos būklei nustatyti naudojama metodai skirstomi į:

- Dalinių išlydžių įtakos izoliacijos būklei analizę;
- Izoliacinės alyvos struktūros analizę;
- Vibracijų charakteristikų analizę;
- Temperatūros analizę.

### **1.2.1. Dalinių išlydžių įtakos izoliacijos būklei analizė**

Dalinis išlydis, tai elektrinis išlydis, kuris pilnai neperdengia izoliacijos esančios tarp laidininkų. Daliniai išlydžiai vyksta kietosiose ir skystosiose izoliacinėse medžiagose esančiuose defektuose. Šis procesas yra vienpolis, todėl laisvieji krūvininkai nesusidaro. Dalinis išlydis vyksta silpniausiose izoliacijos vietose [1]. Tai gadina izoliaciją ir tuo pačiu gali negrįžtamai sugadinti įrenginį.

Rinkoje atsiranda vis daugiau tiekėjų, siūlančių dalinių išlydžių nuolatinio ar periodinio stebėjimo įrangą. Ši įranga susideda iš matavimams skirto ryšio kondensatoriaus, montuojamo prie kiekvienos iš tiriamojo įrenginio fazių (galimas ir vienos fazės tyrimas). Dalinių išlydžių metu duomenys yra išsaugojami ir apdorojami bei vėliau panaudojami tolimesnei įrenginio analizei. Naudojant šiuos įrenginius juos galima pritaikyti šių elektros energetikos sistemos įrenginių stebėjimui:

- Generatoriams;
- Varikliams;
- Transformatoriams;
- Elektros linijų ir skirstyklų įrenginiams.

### **Izoliacinės alyvos struktūrinė analizė**

Izoliacinės alyvos analizė skirstoma į naudojamos izoliacinės alyvos analizę ir izoliacinėje alyvoje nustatytų senėjimo dalelių analizę (priemaišos ir kt.) [1].

Pirmuoju atveju nustatomi alyvos kokybiniai parametrai ir pagal juos tikrinama alyvos sudėties analizė. Pagal šiuos parametrus ir nustatoma ar alyva yra tinkama tolimesniam darbui.

Taikant senėjimo dalelių struktūrinę analizę nustatoma kietosios izoliacijos (dažniausiai izoliacinis kartonas) dalies būklė, kuri parodo alyvoje esančių kietosios izoliacijos priemaišų alyvoje sudėtį, kiekį ir pasiskirstymą.

Šis analizės metodas yra naudojamas itin seniai ir palyginus su kitais metodais ir yra žymiai tikslesnis.

## **Vibracijų charakteristikų analizę**

Šių charakteristikų analizė gali būti taikoma elektros įrenginiams su sukamosiomis dalimis. Tinkamai įvedus šią sistemą į eksploataciją, aptarnaujantis personalas gali nustatyti esamą įrangos būklės situaciją ir į tai atsižvelgdami nustatyti įrenginio resursą. Analizuojamos guolių, velenų ir kitų elementų būklės [15]. Tačiau pats prietaisas nurodo tik esamą įrenginio vibraciją, todėl medžiagą reikalinga papildomai išanalizuoti.

## **Temperatūros analizė**

Šis metodas tinkamas naudoti įrenginiuose, kuriuose dėl menkų sistemos sutrikimų galimas temperatūros pakilimas išoriniame įrenginio sluoksnyje. Tai leidžia nustatyti gedimo vietą naudojant termovizinę kamerą. Šis metodas nenustato įrenginio resurso, tačiau momentinei įrenginio patikrai yra pakankamai tikslus.

Kadangi elektros įrenginį veikiantis terminis poveikis yra vienas pagrindinių izoliacijos senėjimo veiksnių [10], tinkamai įrenginio eksploatacijai reikalingas temperatūros stebėjimas. Termovizine kamera nustatomi smulkūs defektai, kaip blogas gnybtų suveržimas, kontakto defektas ar kita, tačiau temperatūros įtakos izoliacijai ja nustatyti neįmanoma. Tam, kad būtų tinkamai įvertintas aplinkos poveikis įrenginio izoliacijai, reikalingas temperatūros stebėjimas ir pačiame įrenginyje.

### **1.2.2. Dalinių išlydžių nustatymo metodai**

Daliniai išlydžiai yra registruojami šiais metodais:

- Elektriniu jutikliu;
- Elektromagnetiniu jutikliu (antena);
- Akustiniu jutikliu.

#### **Elektrinis jutiklis**

Šis dalinių išlydžių registravimo būdas yra itin jautrus, gali būti kalibruojamas pritaikant jį prie skirtingų parametrų įrenginių, atranda apytikslę dalinių išlydžių vietą. Tačiau reikalauja atjungimo montuojant jutiklį prie įrenginio, taip sumažinant sistemos patikimumą [14, 16].

Šiuo metu rinkoje atsiranda vis tobulesni jutikliai, toki kaip aukšto dažnio srovės transformatoriai ir ultra aukšto dažnio jutikliai [17, 18]. Naudojant šiuos jutiklius, galimas įrenginio dalinių išlydžių lygio registravimas jo neatjungus.

#### **Elektromagnetinis jutiklis (antena)**

Šis dalinių išlydžių registravimo būdas yra lengvai naudojamas, galimas dalinių išlydžių izoliacinėse medžiagose įvertinimas iš išorės, veikia kaip garso kanalas. Tačiau šis jutiklis yra itin



jautrus trikdžiams, aptikti gali būti tikrai itin aukšto lygio daliniai išlydžiai, o dėl galimai didelių trikdžių iš kito įrenginio, sunku nustatyti tiriamojo būklę [14, 16].

### **Akustinis jutiklis**

Tai yra pjezo akcelerometras, dedamas ant transformatoriaus rezervuaro. Jis yra lengvai montuojamas, atranda dalinio išlydžio vietas pagal susidariusį aidą defekte. Tačiau šios sistemos jautrumo klasė yra itin žema ( $>10\ 000$  pC). Esant tokiam jautrumui, nustatomi tik kritiškoje būsenoje esančios izoliacinės medžiagos [18].

### **1.3. Tyrimų įvertinimas**

Įvertinus elektros įrenginių izoliacijos būklės nustatymo metodus pastebėta, kad, naudojant 1.2.2. skyriuje išvardintą dalinių išlydžių registravimo įrangą ir gautus duomenis analizuojant elektros įrenginiui pritaikytame matematiname modelyje, galimas tikslus įrenginio izoliacijos būklės ir eksploatacijos resurso nustatymas. Tačiau dauguma analizuotų modelių pateikia tikslias dalinių išlydžių charakteristikas tik esant tam tikroms aplinkos sąlygoms. Dėl šios priežasties reikalingas matematinio modelio pritaikymas kiekvienam elektros įrenginiui individualiai.

Darbe pateikiamas matematinis modelis, kuris yra pritaikytas kombinuotosios kartono ir alyvos izoliacijos parametrų skaičiavimams. Tiriama izoliacinės alyvos sluoksnio dydžio kombinuotoje izoliacijoje įtaka dalinių išlydžių parametrams, pateikiamos jų charakteristikos. Naudojantis matematiniais modeliais, galimas temperatūros ir elektromagnetinio lauko įtakos elektros įrenginio izoliacijos būklei įvertinimas. Modeliu atliekama kombinuotosios izoliacijos sluoksnių storio įtakos dalinių išlydžių parametrams analizė.

## 2. AUKŠTOSIOS ĮTAMPOS ELEKTROS ĮRENGINIŲ IZOLIACIJOS RESURSO MATEMATINIO MODELIO APRAŠYMAS

### 2.1. Veiksniai įtakoiantys įrenginio izoliacijos resursą

Vykdamas aukštos įtampos įrenginių eksploataciją, jų izoliacija yra veikiamas įvairių veiksnių: elektros (elektromagnetinio lauko, viršįtampių ir kita), šilumos (temperatūros svyravimų, perkaitimų), mechaninės jėgos (vibracijų) [4]. Šie darbo aplinkos veiksniai įrenginio izoliacijoje sukuria negrįžtamus procesus, kurie sukelia izoliacijos senėjimą, taip mažindami įrenginio izoliacijos resursą.

Idealios darbo aplinkos atveju, izoliacijos senėjimas yra veikiamas tik darbinės įtampos. Jei įrenginys nėra veikiamas viršįtampių, vibracijų ir kitų aplinkos veiksnių ir jo izoliacija yra be priemaišų ir defektų, tuomet įrenginio eksploatacijos laikas gali būti apskaičiuojamas taip [4]:

$$t_m = \frac{A}{U^n}; \quad (2.1)$$

čia  $A$  – koeficientas, priklausantis nuo izoliacijos savybių;  $n$  – laipsnio rodiklis, kuris priklauso nuo įrenginį veikiančios įtampos tipo ir izoliacijos konstrukcinių savybių.

Realiomis eksploatacijos sąlygomis įrenginys yra veikiamas daugybės aplinkos veiksnių, todėl jo eksploatacijos laiko priklausomybės matematinė išraiška yra itin sudėtinga ir kiekvienam įrenginiui skirtinga.

Įrenginio izoliacijos resurso mažėjimą lemia šie veiksniai:

- Elektromagnetinis laukas;
- Viršįtampiai;
- Antsroviai;
- Daliniai išlydžiai;
- Vibracijos;
- Temperatūros pokyčiai;
- Izoliacijos defektai (priemaišos, oro tarpai, įtrūkimai);
- Kita.

Didžiausią įtaką įrenginių izoliacijos resurso mažėjimui turi [1] viršįtampiai ir daliniai išlydžiai.

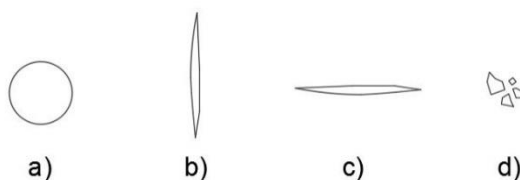
Viršįtampiai, tai įtampos padidėjimas, kuris viršija leistinas tinklo normas [2]. Šio proceso metu padidėja įrenginio temperatūra, izoliacijoje suaktyvėja daliniai išlydžiai, vyksta dujų susidarymas, o esant mažam izoliacijos resursui, galimas jos pramušimas. Šių procesų metu gadinama įrenginio izoliacija.

Viršįtampiai elektros energetikos sistemoje skirstomi į:

- Komutacinius;
- Atmosferinius.

Pastarieji atsiranda žaibui trenkus į elektros energijos tinklo elementą arba šalia jo. Taip sistemoje susidaro įtampos padidėjimas, kurio charakteristikos priklauso nuo žaibo tipo ir stiprumo. Komutaciniai (arba vidiniai) viršįtampiai atsiranda sistemoje įjungus arba išjungus sąlyginai didelės galios elektros vartotoją. Priklausomai nuo įrenginio, viršįtampiai gali trukti nuo kelių milisekundžių iki kelių valandų [2].

Daliniai išlydžiai vyksta kietosios ir skystosios izoliacijos silpniausiose vietose. To priežastis yra izoliacijoje esantys defektai, kurie yra veikiami prijungtos įtampos. Savo savybėmis daliniai išlydžiai yra kitokio pobūdžio nei elektros išlydžiai – procesas, vykstantis dalinio išlydžio metu, yra vienpolis ir jo metu nesudaro laisvieji krūviai [1].



**2.1 pav.** Kietosios izoliacijos struktūrinių defektų tipai [1]: a) – oro burbulas; b), c) – vertikalaus ir horizontalaus tipo izoliacijos įtrūkimai; d) – priemaišos

Paveiksle Nr.2.1 pateikiami kietosios izoliacijos defektų tipai, kurie gali susidaryti izoliacijos gamybos, montavimo ar eksploatacijos metu. Kiekvienas izoliacijos defekto tipas turi savo charakteristikas ir esant toms pačioms eksploatacijos sąlygoms izoliacijos resursą gali paveikti skirtingai. Įrenginį veikiant paaukštinta įtampa, sistemoje atsiradus viršįtampiams, kintant temperatūrai ir elektromagnetiniam laukui, defektas gali didėti. Dėl to įrenginio izoliacijos resursas mažėja ir nebeatitinka gamintojo nurodyto eksploatacijos laiko. Defektui pasiekus kritinį dydį, įrenginio izoliacija yra pramušama.

Daliniai išlydžiai skirstomi į [1]:

- Pradinių;
- Kritinių.

Pradiniais yra laikomi tokie daliniai išlydžiai, kurių krūvis izoliacinėje alyvoje neviršija 10 pC, o izoliaciniame kartone – 50 pC. Šio lygio daliniai išlydžiai nėra pavojingi elektros energijos vartotojų darbui, tačiau turi įtakos izoliacijos senėjimo intensyvumui, todėl turi būti stebimi.

Kritiniais laikomi tokie daliniai išlydžiai, kurių krūvis izoliacijoje viršija 1000 pC. Šiame etape esanti izoliacija yra veikiamą intensyvių irimo procesų, kurie esant tam tikroms sąlygoms izoliacijos resursą gali sunaikinti per dešimtį valandų. Įrenginio izoliacijai sunykus iki kritinės ribos, izoliacija yra pramušama – įvyksta įrenginio gedimas [1].

Aukštos įtampos įrenginių izoliacijos tarnavimo laikas tiesiogiai priklauso nuo dalinių išlydžių izoliacijoje lygio. Profilaktiškai registruojant dalinių išlydžių lygį izoliacijoje galima nustatyti jos esamą resursą. Analizuojant dalinių išlydžių parametrus bei aplinkos veiksnius veikiančius įrenginį, galima nustatyti izoliacijos senėjimo tendencijas. Tai leistų planuoti įrenginių remontą, užtikrinant jam tinkamą rezervą. Tačiau aplinkos parametrai, veikiantys įrenginį, kiekvieno įrenginio atveju gali būti skirtingi. Dėl šios priežasties aukštos įtampos įrenginių resurso mažėjimo tendencijų nustatymas yra itin sudėtingas.

## **2.2. Dalinių išlydžių parametrai**

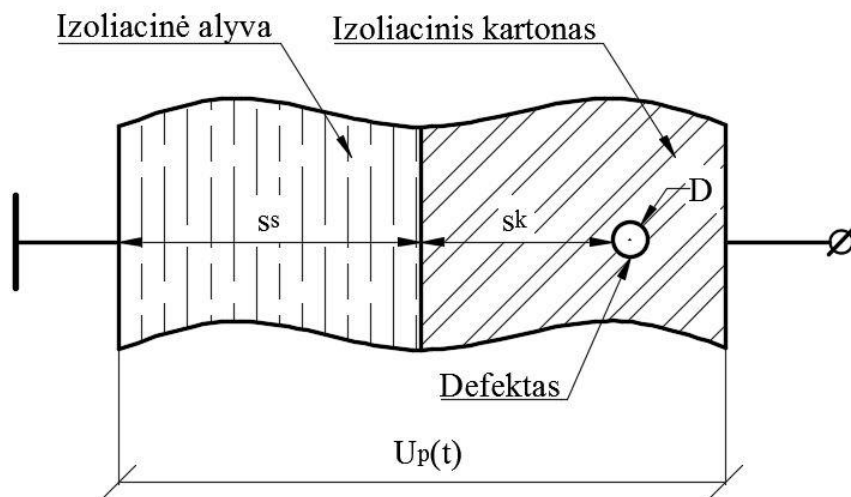
Pagrindinės dalinių išlydžių charakteristikos yra [1]:

- Tariamasis krūvis – tai tokio dydžio krūvis, kuris nykstamai trumpą laiko tarpą generuoja tokių pačių charakteristikų įtampą, kaip ir dalinių išlydžių metu;
- Dalinių išlydžių dažnis – tai dalinių išlydžių impulsų skaičius per tam tikrą laiko tarpą;
- Izoliacijoje esančio defekto pramušimo įtampa – tai mažiausia įtampa, kurios veikiamas defektas yra pramušamas;
- Dalinių išlydžių išsikrovimo srovė – tai dalinių išlydžių metu atsiradęs srovės šuolis;
- Dalinių išlydžių energijos kiekis – tai energijos kiekis, išsiskiriantis izoliacijoje, vykstant daliniams išlydžiams;
- Įrenginio izoliacijos darbo trukmė – tai santykis tarp likusios izoliacijos resurso ir dalinio išlydžio galios. Naudojantis šiuo parametru galima numatyti įrenginio likusį eksploatacijos laikotarpį.

## **2.3. Matematinis modelis**

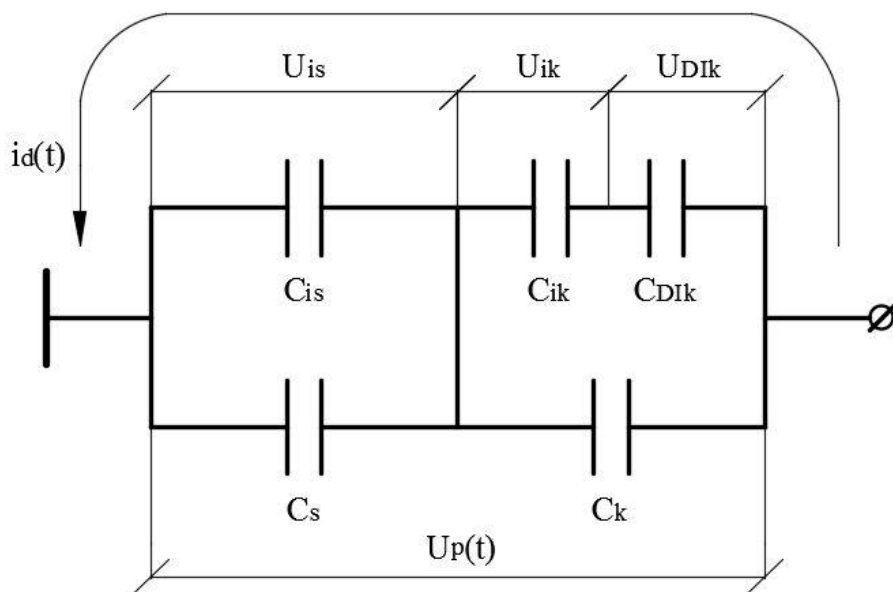
Matematinis modelis yra atliekamas MATLAB programinės įrangos aplinkoje. Naudojamas matematinis modelis, kuris aprašomas literatūroje [19], buvo pakoreguotas ir pritaikytas skaičiuoti dalinių išlydžių parametrus kombinuotosios izoliacijos modelyje. Programos kodas yra pateikiamas priede Nr.1.

Tiriamą įrenginio izoliacija susideda iš kietosios (izoliacinis kartonas) ir skystosios (izoliacinė alyva) dalių. Matematiniam modelyje priimama, kad izoliaciniame kartone yra tam tikro dydžio defektas, kuris yra veikiamas paaukštintos įtampos ir esant tam tikroms aplinkos sąlygoms jame vyksta daliniai išlydžiai. Izoliacinė alyva – be defektų (laikomasi nuostatos, kad įrenginyje naudojama nauja alyva).



**2.2 pav.** Kombinuotosios izoliacijos fragmentas su defektu kietosios izoliacijos dalyje.  $D$  – defekto skersmuo;  $s_s$ ,  $s_k$  – defekto atstumas iki elektrodo

Paveiksle Nr.2.2 pateikiamas kombinuotosios izoliacijos fragmentas, pagal kurį sudarytas matematinis modelis. Izoliacija yra veikiamą įtampos  $U_p(t)$ . Elektros sistemoje atsiradus tam tikro dydžio viršįtampiams, izoliacijoje esantis defektas yra pramušamas. Taip išsiskiria energija, kuri ardo izoliaciją ir mažina jos resursą.



**2.3 pav.** Kombinuotosios izoliacijos, su defektu kietosios izoliacijos dalyje, matematinio modelio principinė schema [1].  $U_p(t)$  – izoliaciją veikianti įtampa;  $C_{DIk}$  – defekto savitoji talpa;  $C_{ik}$ ,  $C_{is}$  – kietojo ir skystojo izoliacijos sluoksnių talpa išlydžio srovės kelyje;  $C_s$ ,  $C_k$  – kietojo ir skystojo izoliacijos sluoksnių geometrinė talpa;  $U_k$  – defekto kietajame izoliacijos sluoksnyje pramušimo įtampa;  $U_{is}$ ,  $U_{ik}$  – skystosios ir kietosios izoliacijų pramušimo įtampa;  $i_d$  – išlydžio srovė

Šiame darbe naudojamas matematinis modelis, kuriame izoliacija ir defektas yra traktuojami kaip tam tikro dydžio talpa sujungta nuosekliai. Principinė schema pateikiama paveiksle Nr.2.3.

Kietojoje izoliacijos dalyje esantis defektas – oro burbulas, todėl jo talpai apskaičiuoti naudojama sferinio kondensatoriaus formulė:

$$C_{DIk} = 2\pi\varepsilon\varepsilon_0 D; \quad (2.2)$$

čia  $\varepsilon_0$  – dielektrinė skvarba esant normaliomis atmosferinėmis sąlygomis;  $\varepsilon$  – santykinė dielektrinė skvarba;  $D$  - defekto skersmuo.

Kadangi tariamas kietosios izoliacijos defektas yra oro burbulas, o oro santykinė dielektrinė skvarba yra artima vienetui, todėl atliekant skaičiavimus naudojama formulė:

$$C_{DIk} = 2\pi\varepsilon_0 D; \quad (2.3)$$

Kietojo ir skystojo izoliacijos sluoksnių talpa išlydzio srovės kelyje apskaičiuojama pagal šią formulę:

$$C_{ik}, C_{is} = \pi\varepsilon\varepsilon_0 \frac{D}{2} \left[ 1 + \sum_{n=1}^4 \rho^n \right]; \quad (2.4)$$

čia  $\rho$  – kietosios arba skystosios izoliacinės medžiagos tankis;  $\varepsilon$  – izoliacinės medžiagos santykinė dielektrinė skvarba.

Medžiagos tankis  $\rho$  apskaičiuojamas taip [1]:

$$\rho = \frac{D}{2s} \ln 2; \quad (2.5)$$

čia  $s$  – defekto atstumas iki elektrodo.

Izoliaciniame kartone esančio defekto pramušimo įtampa apskaičiuojama naudojantis formule [1]:

$$U_k = DE_0 \delta; \quad (2.6)$$

čia  $\delta$  – temperatūros ir slėgio pataisos koeficientas;  $E_0$  – elektrinis lauko stipris esant normaliomis atmosferinėmis sąlygomis.

Temperatūros ir slėgio pataisos koeficientas randamas naudojantis formule [1]:

$$\delta = \frac{p}{760} \cdot \frac{293}{273 + T}; \quad (2.7)$$

čia  $p$  – aplinkos slėgis;  $T$  – aplinkos temperatūra.

Įtampa, veikianti defektą tam tikru laiko momentu, apskaičiuojama naudojantis formule:

$$U_{DI}(t) = kU_p(t); \quad (2.8)$$

čia  $U_p(t)$  – izoliaciją veikianti įtampa,  $k$  - koeficientas, kuris nurodo kaip pasiskirsto įtampa tarp defekto, esančio kietojoje izoliacijoje, ir likusios izoliacinio popieriaus bei alyvos izoliacijos.

Šis įtampos pasiskirstymo koeficientas apskaičiuojamas taip:

$$k = \frac{C_{ik} \cdot C_{is}}{C_{DIk} \cdot C_{ik} + C_{DIk} \cdot C_{is} + C_{ik} \cdot C_{is}}; \quad (2.9)$$

Izoliaciją veikiančios įtampos dydis, kuriam veikiant modelį, izoliacinio kartono defekte susidaro pramušimo įtampa  $U_k$ , apskaičiuojamas taip:

$$U_{DIpr} = \frac{U_k}{k}. \quad (2.10)$$

Užkilus įtampai  $U_p(t)$ , kuri veikia izoliaciją (atsiradus viršįtampiams), skirtingose izoliacijos komponentėse modeliuojamų defektų įtampos pasiekia kritinę komponentės pramušimo įtampos vertę. Vienoje iš izoliacijos dalių įtampai viršinus kritinę įtampos vertę, įvyksta tarpelio (defekto) pramušimas – defekto talpa šuntuojama ir modelyje fiksuojamas srovės šuolis, kurio didžiausia amplitudė žymima  $I_{dm}$ . Tuomet kontūru pradeda tekėti ekvivalentinės talpos  $C_{ek}$  išsikrovimo srovė  $i_d(t)$ . Šie parametrai apskaičiuojami taip [1]:

$$i_d(t) = I_{dm} \tau e^{-\frac{t}{\tau}}; \quad (2.11)$$

čia  $\tau$  – dalinių išlydžių vidutinė impulso trukmė (ji yra tarp 0,01-0,3  $\mu$ s);  $I_{dm}$  – srovės šuolio amplitudė, kuri apskaičiuojama taip [1]:

$$I_{dm} = \frac{C_{ek} U_{DI}}{\tau}; \quad (2.12)$$

čia  $C_{ek}$  – ekvivalentinė izoliacijos modelio talpa, kai defekte vyksta pramušimas. Šiam modeliui ji apskaičiuojama naudojantis šia formule:

$$C_{ek} = \frac{C_{ik} \cdot C_{is}}{C_{ik} + C_{is}}. \quad (2.13)$$

Dalinių išlydžių metu, defekte atsirandantis tariamasis krūvis apskaičiuojamas taip [1]:

$$q = C_{id} U_{DI}; \quad (2.14)$$

Energijos kiekis, kuris susidaro defekte dalinio išlydžio metu, apskaičiuojamas taip [1]:

$$W_k = \frac{q U_{DI}}{2}. \quad (2.15)$$

Toliau pateikiamos standartizuotų integralinių charakteristikų matematinės formulės, kurios apibūdina dalinius išlydžius.

Vidutinė dalinių išlydžių srovė apskaičiuojama taip [1]:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^m |q_i|}{T}; \quad (2.16)$$

čia:  $T$  - laiko intervalas, per kurį skaičiuojami dalinių išlydžių impulsai;  $q_i$  – tariamojo dalinio išlydžio impulso amplitudė.

Galia, susidariusi dalinių išlydžių metu, apskaičiuojama pagal formulę [1]:

$$P_{DI} = \frac{\sum_{i=1}^m |q_i \cdot U_i|}{T}; \quad (2.17)$$

čia:  $U_i$  – momentinė  $i$  – tosios įtampos reikšmė, esant  $i$  – tajam išlydžiui  $q$ .

Izoliacijos su skystosios izoliacijos komponentu darbo trukmė nustatoma pagal tokią formulę:

$$\tau_d = \frac{R}{B_0 \cdot P_{DI}}; \quad (2.18)$$

$\tau_d$  – darbo trukmė,  $R$  – pradinis (projektinis) izoliacijos resursas;  $B_0$  – koeficientas įvertinantis išnaudotąjį resursą, tai toks išsiskyrusių dujų kiekis, kai izoliacinė medžiaga yra veikiamą 1 J energijos dalinių išlydžių.

Pagal 2.18 formulę priimama, kad daliniai išlydžiai eksploatacijos metu nekinta. Įvertinus dalinių išlydžių progresavimą eksploatacijos metu, išnaudotas izoliacijos resursas gali būti apskaičiuojamas naudojant formulę [1]:

$$R_i = B_0 \int_0^{\tau_d} P_{DI} dt; \quad (2.19)$$

Bazinis resurso koeficientas  $R_b$  gali būti nustatomas pagal formulę [1]:

$$R_b = B_D \cdot P_{DI} \cdot \tau_d; \quad (2.20)$$

Bazinis resurso išnaudojimo koeficientas esant standartinėms charakteristikoms gali būti apskaičiuojamas taip [1]:

$$R_b = B_D \cdot n \cdot q_0 \cdot U_{DI} \cdot \tau_d; \quad (2.21)$$

čia:  $n$  – dalinių išlydžių impulsų skaičius per pusę periodo (izoliacijai be defektų praktiškai gali būti užregistruoti 3 – 5 impulsai),  $q_0$  – standartizuotas dalinių išlydžių lygis.



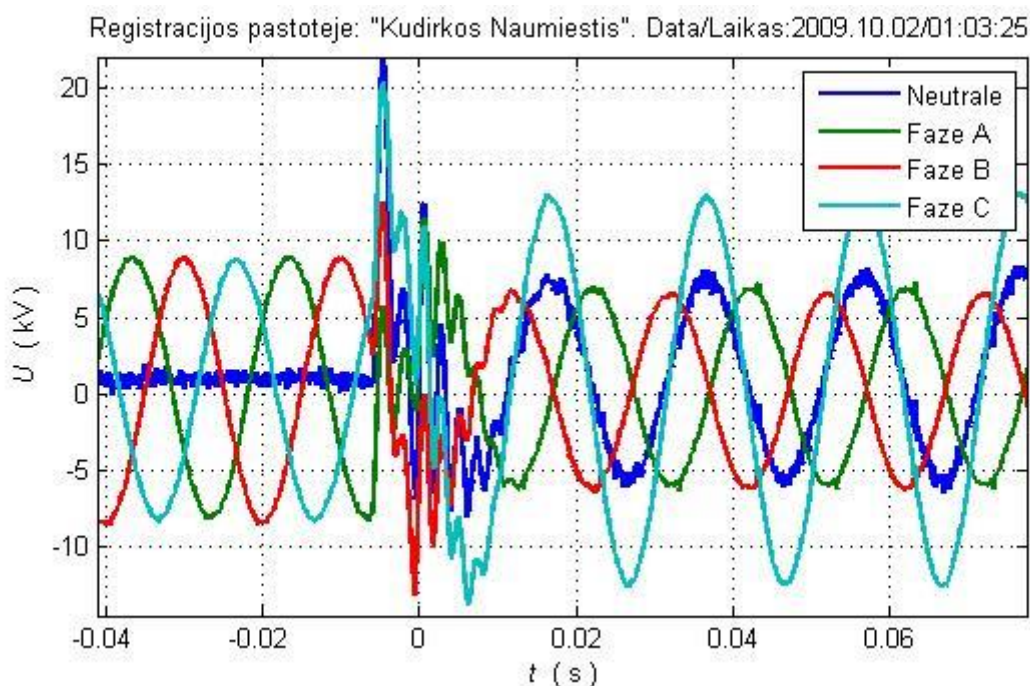
### 3. TIRIAMOJI DALIS

#### 3.1. Matematinio modelio rezultatai. Charakteristikų tyrimas

##### 3.1.1. Pagrindinių parametru skaičiavimas

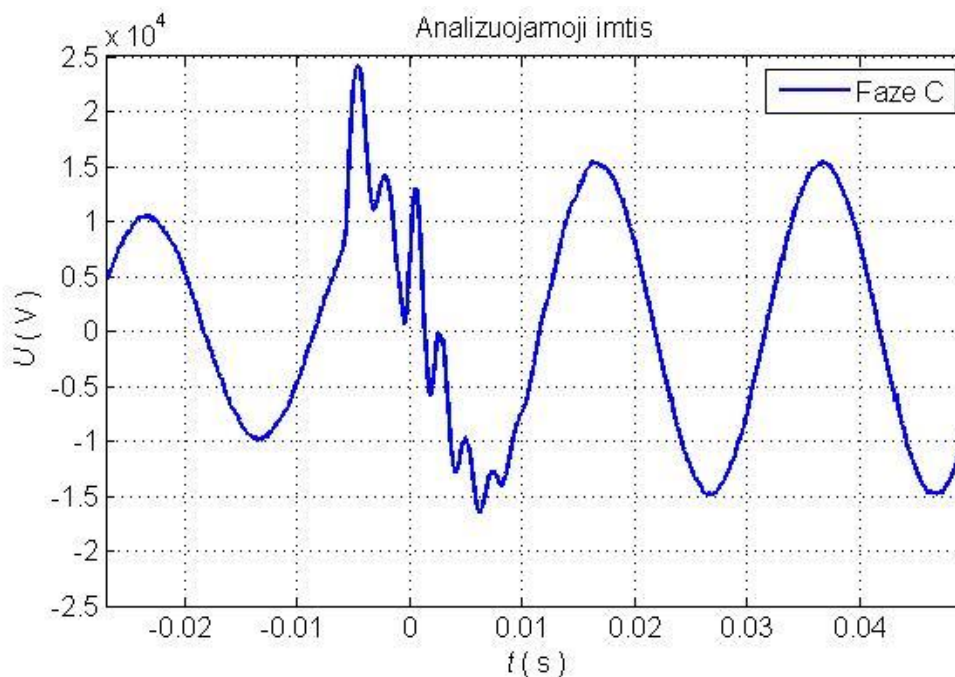
Naudojantis skyriuje Nr.2 aprašytu matematiniu modeliu, toliau atliekami izoliacijos būklės parametru skaičiavimai ir jų analizė.

Modelį veikiančios įtampos duomenys yra iš Kudirkos Naumiesčio 10 kV pastotės. Duomenų registravimo metu užfiksuoti viršįtampiai, kurių metu „C“ fazės amplitudė padidėja virš normos ir tampa iškreipta. Užregistruoti duomenys pateikiami paveiksle Nr.3.1.



**3.1 pav.** Kudirkos Naumiesčio 10 kV pastotėje 2009-10-02 užregistruoti viršįtampiai

Po viršįtamčio užregistruotas „C“ fazės amplitudės padidėjimo reikšmė padidinama 1,19 karto, kad atitiktų bandymo metu pasiektą 15 kV amplitudę. Gauta kreivė pateikiama paveiksle Nr.3.2.



**3.2 pav.** Kudirkos Naumiesčio 10 kV pastotėje 2009-10-02 užregistruota „C“ fazės kreivė padidinta 1,19 karto

Matematiniam modelyje pasirenkama naudoti „C“ fazės įtampą  $U_p(t)$ . Naudojantis šios fazės įtampos duomenimis modelyje registruojami daliniai išlydžiai. Tyrimo eigoje lyginami laboratorijoje atlikto bandymo ir matematinio modelio rezultatai:

- Tariamąjo krūvio reikšmės  $q$ ;
- Išsikrovimo srovė  $I_{dm}$ ;
- Energijos kiekis  $W_k$ , kuris susidaro defekte dalinio išlydžio metu.

Matematinio modelio skaičiavimų duomenys:

- Sferinio defekto skersmuo  $D = 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5$  mm;
- Izoliacinio kartono sluoksnio storis  $s_k = 4$  mm;
- Izoliacinės alyvos sluoksnio storis  $s_s = 2$  mm;
- Pasirenkama vidutinė dalinių išlydžių srovės impulse reikšmė  $\tau = 0,3$   $\mu$ s;
- Pradinis elektrinio lauko stipris normaliomis atmosferinėmis sąlygomis  $E_0 = 3000000$  V/m;
- Atmosferos slėgis  $p = 760$  mm Hg st.;
- Aplinkos temperatūra  $t = 20$  °C;
- Dažnis  $f = 50$  Hz;
- Dielektrinė skvarba vakuume  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  F/m;
- Santykinė dielektrinė skvarba izoliaciniame kartone  $\epsilon_{rk} = 2,0$ ;
- Santykinė dielektrinė skvarba izoliacinėje alyvoje  $\epsilon_{rs} = 2,5$ .

Sferinio defekto savitoji talpa apskaičiuojama naudojantis 2.3 formule:

$$C_{DIk} = 2 \cdot 3,14 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 0,001 = 5,56 \cdot 10^{-14} F = 0,0556 pF;$$

Izoliacinio kartono ir izoliacinės alyvos sluoksnių talpa išlydžio srovės kelyje apskaičiuojama naudojantis 2.4 formule:

$$C_{ik} = 3,14 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 2 \cdot \frac{0,001}{2} \left[ 1 + \sum_{n=1}^4 0,116^n \right] = 3,14 \cdot 10^{-14} F = 0,0314 pF;$$

$$C_{is} = 3,14 \cdot 8,854 \cdot 10^{-12} \cdot 2,5 \cdot \frac{0,001}{2} \left[ 1 + \sum_{n=1}^4 0,07^n \right] = 3,74 \cdot 10^{-14} F = 0,0374 pF;$$

Kietosios izoliacijos sluoksnyje esančio defekto tarpelio pramušimo įtampa apskaičiuojama naudojantis 2.6 formule:

$$U_k = 0,001 \cdot 3000000 \cdot 1 = 3000 V = 3 kV;$$

Koeficientas, nurodantis įtampos pasiskirstymą tarp defekto ir likusios izoliacijos dalies, apskaičiuojamas naudojantis 2.9 formule:

$$k = \frac{0,0314 \cdot 0,0374}{0,0556 \cdot 0,0314 + 0,0556 \cdot 0,0374 + 0,0314 \cdot 0,0374} = 0,235;$$

Pramušimo metu modelį veikianti įtampa  $U_{DIpr}$  apskaičiuojama naudojantis 2.10 formule:

$$U_{DIpr} = \frac{3000}{0,235} = 12770 V = 12,77 kV;$$

Naudojamo matematinio modelio talpa, kai vyksta defekto tarpelio pramušimas ir jo talpa yra šuntuojama, apskaičiuojama naudojantis 2.13 formule:

$$C_{ek} = \frac{0,0314 \cdot 0,0374}{0,0314 + 0,0374} = 1,7075 \cdot 10^{-14} F = 0,017 pF;$$

Srovės, kuri susidaro įvykus daliniui išlydžiui, šuolio amplitudė  $I_{dm}$  apskaičiuojama naudojantis 2.12 formule:

$$I_{dm} = \frac{1,7075 \cdot 10^{-14} \cdot 3000}{0,3 \cdot 10^{-12}} = 1,71 \cdot 10^{-4} A = 0,171 mA;$$

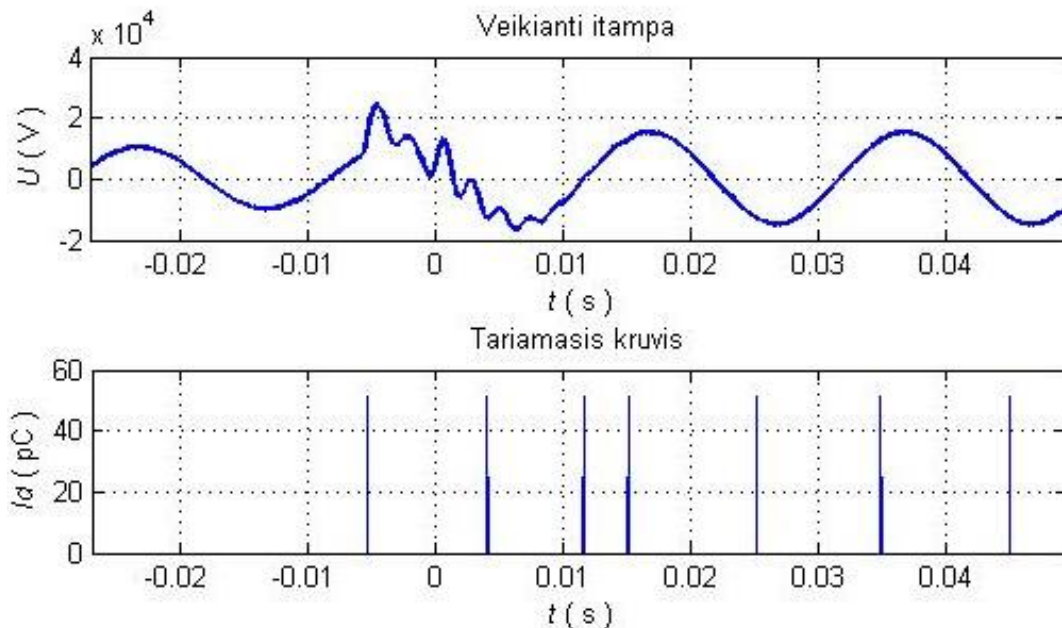
Tariamasis krūvis apskaičiuojamas naudojantis 2.14 formule:

$$q = 1,7075 \cdot 10^{-14} \cdot 3000 = 51 pC;$$

Energijos kiekis, kuris susidaro defekte dalinio išlydžio metu, apskaičiuojamas naudojantis 2.15 formule:

$$W_k = \frac{5,1 \cdot 10^{-11} \cdot 1277}{2} = 3,27 \cdot 10^{-7} J = 0,327 \mu J.$$

Paveiksle Nr.3.3 pateikiama įtampos kreivė ir modelio užregistruoti daliniai išlydžiai.



**3.3 pav.** Įtampos kreivė ir modelyje užregistruotų dalinių išlydžių tariamasis krūvis, kai defekto dydis 1 mm

Pagal paveiksle Nr.3.3 pateiktus duomenis nustatyta, kad normaliu darbo režimu (kai  $t = -0,025 \div -0,005$  s) 1 mm dydžio defektas nėra pramušamas ir daliniai išlydžiai nesusidaro. Tačiau įvykus viršįtampiui ir modelį veikiančios įtampos dydžiui pasiekus  $U_{DIpr}$  reikšmę, defekto tarpelis yra pramušamas ir laiko momentu  $t = -0,006$  s yra registruojamas dalinis išlydis. Laiko momentu  $t = 0,012$  s įtampos kreivė nusistovi ir daliniai išlydžiai pradėta vykti esant tam pačiam faziniam kampui.

Skirtingų dydžių defektų parametų skaičiavimo rezultatai pateikiami lentelėje Nr.3.1. Kiti dalinių išlydžių tariamojo krūvio  $q$  paveikslai pateikiami priede Nr.2.

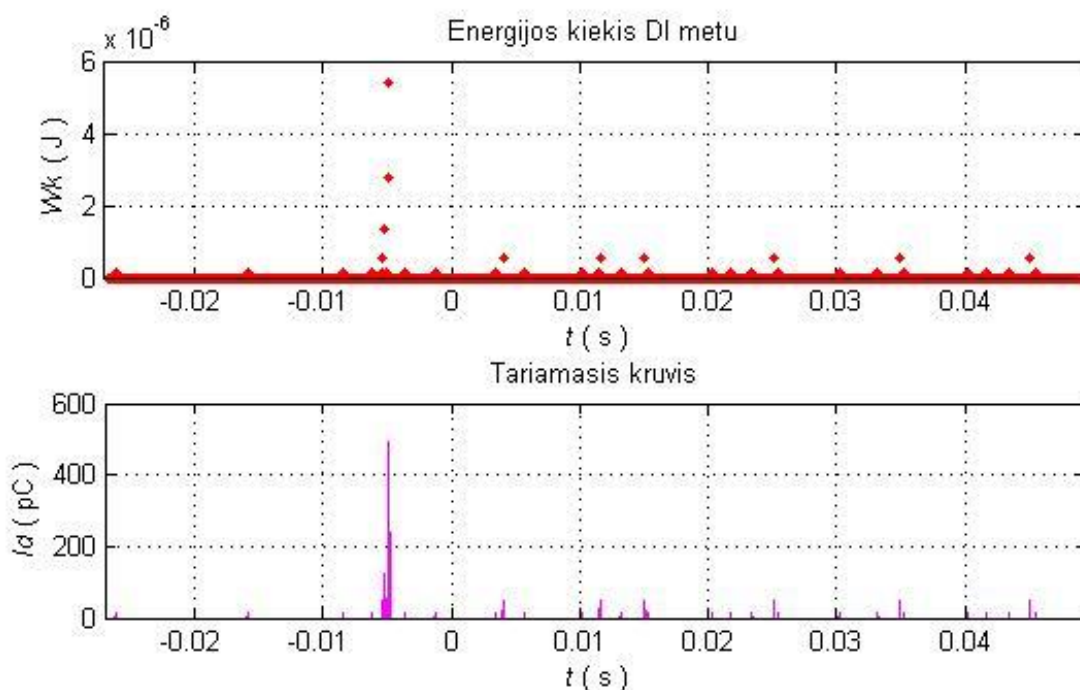
**3.1 lentelė.** Matematinio modelio tyrimo rezultatų suvestinė

Eil. Nr.	Defekto dydis $D$ , mm	Modelį veikianti įtampa pirmo pramušimo metu $U_{DIpr}$ , kV	Išsikrovimo srovė $I_{dm}$ , mA	Tariamasis krūvis $q$ , pC	Energijos kiekis $W_k$ , $\mu J$
1	0,5	6,68	0,04	12,09	0,04
2	1	12,28	0,17	51,22	0,33
3	1,5	18,00	0,42	125,17	1,13
4	2	21,81	0,84	253,22	2,76
5	2,5	25,79	1,4	427,79	5,51

Pagal gautus duomenis, defekto dydžio ribose nuo 0,5 mm iki 2,5 mm, nustatyta, kad modelį veikianti įtampa, reikalinga defekto tarpelio pramušimui, didėja didėjant to defekto dydžiui. Analogiškai kinta ir kiti tiriami parametrai.

Parametrų kitimo tendencija paaiškinamas defekto didėjimu. Padidėjus defektui, reikalinga didesnė tarpelio pramušimo įtampa  $U_k$ , nes tarpelis tampa didesnis. Šiose defekto dydžio ribose, padidėjus  $U_k$ , modelį veikianti įtampa  $U_{Dipr}$  taip pat padidėja. Dėl šios priežasties, tariamojo krūvio  $q$  reikšmė taip padidėja. Perduodant didesnio dydžio krūvį, padidėja išsikrovimo srovė  $I_{dm}$  ir energijos kiekis  $W_k$ , susidarantis dalinio išlydžio metu.

Kadangi realiomis sąlygomis izoliacijoje vienu metu yra daugiau nei vienas defektas, toliau modeliuojami daliniai išlydžiai, kai modelyje yra daugiau nei vienas skirtingo dydžio defektas. Tyrimo parametrai išlieka toki patys.



**3.4 pav.** Modelio fiksuojamas energijos kiekis  $W_k$ , susidarantis dalinio išlydžio metu, ir dalinių išlydžių tariamieji krūviai  $q$ , kai modelyje yra keli skirtingo dydžio defektai

Pagal paveiksle Nr.3.4 pateiktus duomenis nustatyta, kad daliniai išlydžiai yra intensyviausi, kai modelį veikiančios įtampos  $U_p(t)$  dydis artėja prie savo didžiausios reikšmės. Tuo metu defektai yra pramušami. Analogiškai laike išsidėsto ir energijos kiekis  $W_k$ .

### 3.1.2. Izoliacinės alyvos sluoksnio įvertinimas modelyje

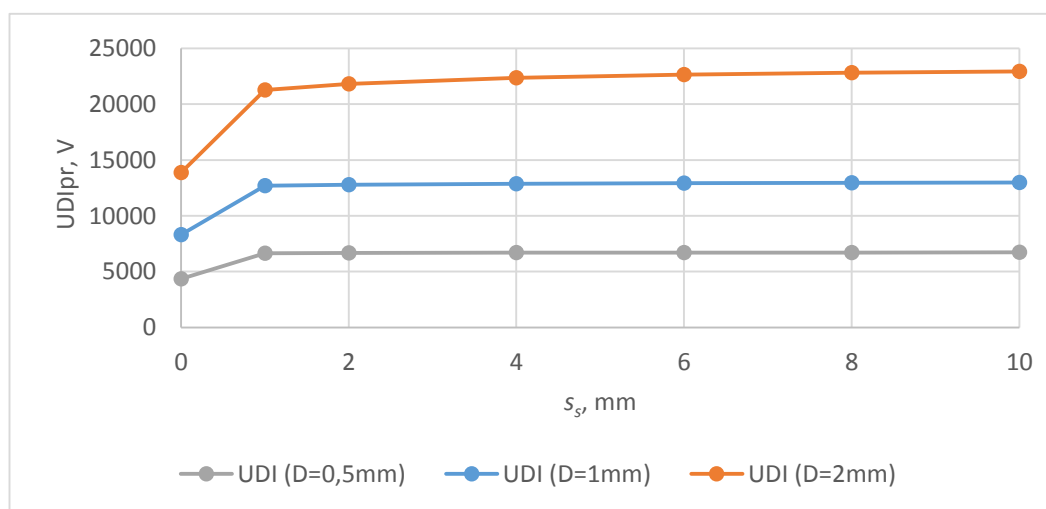
Toliau darbe tirama izoliacinės alyvos sluoksnio storio įtaka matematinio modelio parametrams. Izoliacinės alyvos naudojimas pagerina įrenginio izoliacines savybes – sumažėja tariamojo krūvio, išsikrovimo srovės reikšmės, registruojamas mažesnis vidutinis energijos kiekis dalinių išlydžių metu. Dėl šios priežasties, siekiama išsiaiškinti kaip kinta modelio parametrai

didinant alyvos sluoksnio dydį kombinuotoje izoliacijoje. Šioje tyrimo dalyje siekiama nustatyti izoliacinės alyvos sluoksnio dydį, kuriam esant, tolimesnis izoliacinės alyvos sluoksnio didinimas tampa ekonomiškai nebenaudingas. Tinkamu skystosios izoliacijos storiu laikomas toks storis, kurio reikšmę viršijus parametrai nebekinta arba kinta nereikšmingai, o reikšmei esant mažesnei nei tinkamai – prasideda staigus parametru kitimas.

Šioje tyrimo dalyje bus tiriami defektai, kurių dydis  $D = 0,5; 1; 2$  mm. Naudojant matematinį modelį, didinamas izoliacinės alyvos storis modelyje  $s_s$  nuo 0 mm iki 10 mm. Izoliacinio kartono sluoksnio storis nekinta,  $s_k = 4$  mm. Kiti parametrai išlieka nepakitę.

Analizuojami parametrai:

- $U_{DIpr}$  – modelį veikianti įtampa, pirmojo pramušimo metu;
- $I_{dm}$  – išsikrovimo srovė;
- $q$  – tariamasis krūvis.

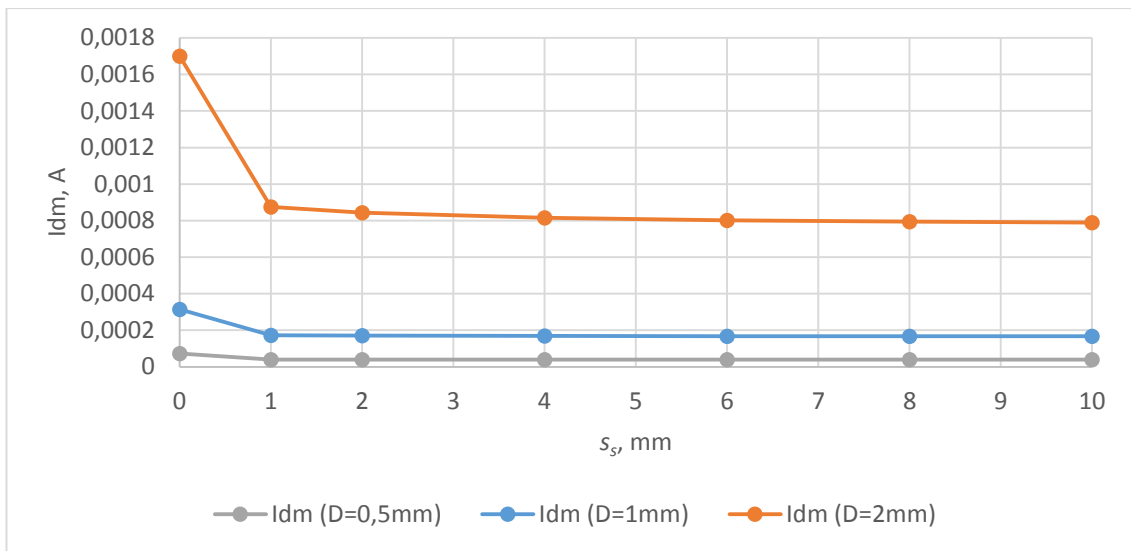


**3.5 pav.** Įtampos dydis  $U_{DIpr}$ , veikiantis modelį defekto tarpelio pramušimo metu, esant skirtingo izoliacinės alyvos sluoksnio dydžiui  $s_s$  ir defekto dydžiui  $D$

Paveiksle Nr.3.5 pateiktas grafikas, kuriame, esant skirtingų dydžių defektams, tiriama modelį veikiančios įtampos  $U_{DIpr}$  vertės priklausomybė nuo izoliacinės alyvos sluoksnio storio  $s_s$  modelyje. Gauti rezultatai grupuojami pagal defekto dydžio  $D$  reikšmes.

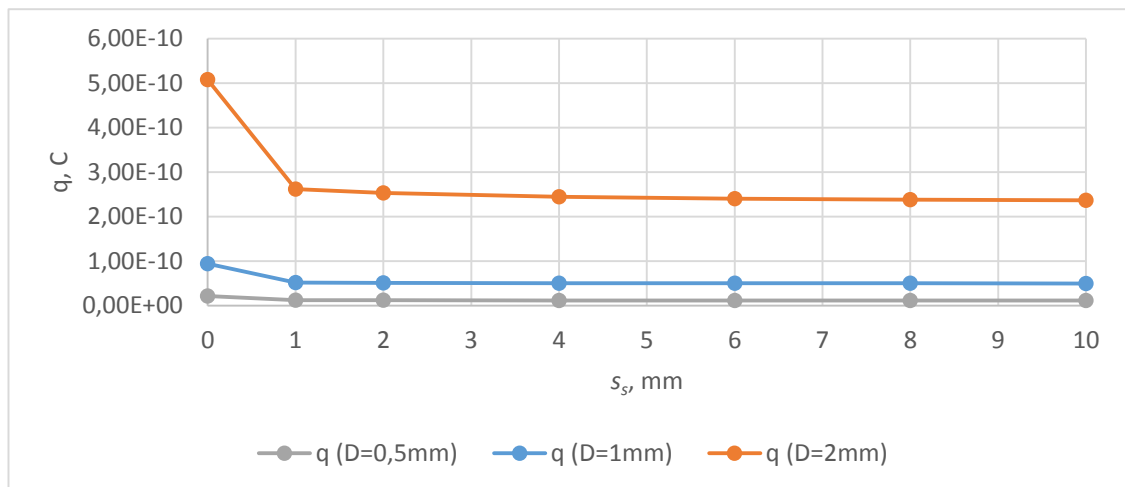
Tyrimo metu nustatyta, kad, esant 2 mm dydžio defektui, modelį veikiančios įtampos  $U_{DIpr}$  reikšmė nebekinta arba kinta nežymiai, izoliacinės alyvos sluoksniui pasiekus 6 mm ir daugiau. Kitos nustatytos  $s_s$  reikšmės pateikiamos lentelėje Nr.3.2.

Analogiškas tyrimas buvo vykdomas dalinio išlydžio metu susidariusios išsikrovimo srovės  $I_{dm}$  priklausomybei nuo izoliacinės alyvos sluoksnio storio  $s_s$  nustatymui. Rezultatai pateikiami paveiksle Nr.3.6.



**3.6 pav.** Išsikrovimo srovės amplitudės dydis  $I_{dm}$ , susidarantis po defekto tarpelio pramušimo, esant skirtingo izoliacinės alyvos sluoksnio storiui  $s_s$  ir defekto dydžiui  $D$

Nustatyta, kad dalinių išlydžių išsikrovimo srovės amplitudės dydžio kitimas tampa neberekšmingu (alyvinės izoliacijos didinimas tampa ekonomiškai nebenaudingas), pasiekus tam tikras izoliacinės alyvos sluoksnio  $s_s$  vertes. Rezultatai pateikiami lentelėje Nr.3.2.



**3.7 pav.** Tiriama krūvio dydis, susidarantis dalinio išlydžio metu, esant skirtingo izoliacinės alyvos sluoksnio storiui  $s_s$  ir defekto dydžiui  $D$

Toliau vykdomas tariamojo krūvio  $q$  priklausomybės nuo izoliacinės alyvos sluoksnio storio  $s_s$  tyrimas. Grafikas pateikiamas paveiksle Nr.3.7.

Kaip ir anksčiau aprašytuose bandymuose, nustatyta, kad tiriama parametro  $q$ , kai  $D = 2$  mm, didinant izoliacinės alyvos kiekį, kitimas tampa neberekšmingas, kai pasiekiamas 6 mm izoliacinės alyvos sluoksnio dydis. Rezultatai pateikiami lentelėje Nr.3.2.

**3.2 lentelė.**  $s_s$  reikšmės, kurias pasiekus parametrai  $U_{DIpr}$ ,  $I_{dm}$ ,  $q$  kinta nežymiai

Eil. Nr.	Defekto dydis $D$ , mm	Izoliacinės alyvos sluoksnio dydis $s_s$ , mm	Modelį veikianti įtampa pirmo pramušimo metu $U_{DIpr}$ , kV	Išsikrovimo srovė $I_{dm}$ , mA	Tariamasis krūvis $q$ , pC
1	0,5	1	6,66	0,04	12,10
2	1	2	12,77	0,17	51,20
3	2	6	22,65	0,80	240,59

Pagal lentelėje Nr.3.2 ir paveiksluose Nr.3.5, 3.6 ir 3.7 pateiktus duomenis nustatyta, kad, didinant kombinuotoje izoliacijoje esantį izoliacinės alyvos sluoksnį  $s_s$ , gerinamos įrenginio izoliacinės savybės. Dėl šios priežasties, lyginant izoliacinio kartono ir kombinuotąją izoliacinio kartono ir izoliacinės alyvos modelius, pastarasis turės didesnę eksploatacijos resursą.

Nustatyta, kad, defekto dydžiui  $D$  esant iki 2 mm, izoliacinės alyvos sluoksniui  $s_s$  esant 6 mm ir daugiau tiriamų parametrų kitimas tampa nereikšmingu. Dėl šios priežasties tolimesnis skystosios izoliacijos sluoksnio didinimas yra ekonomiškai nebenaudingas.

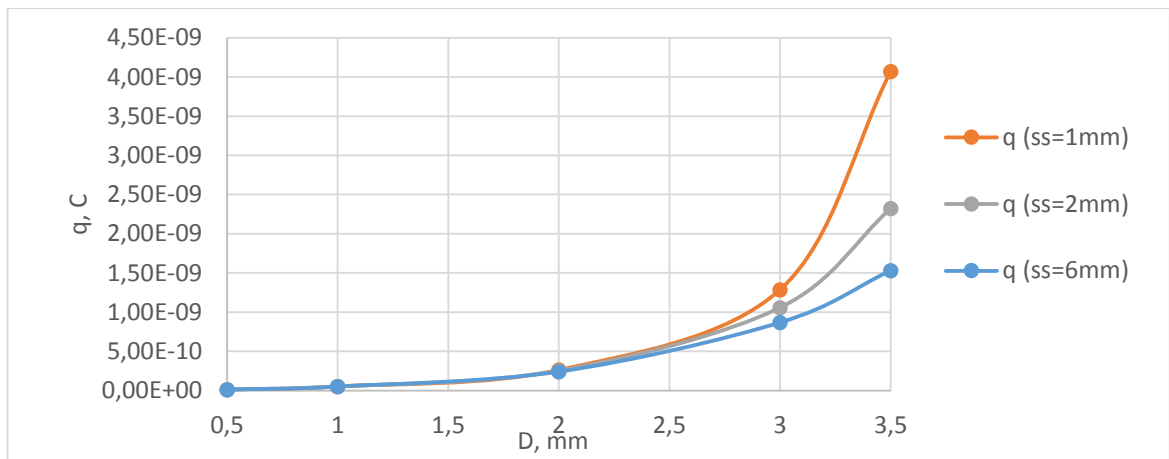
### 3.1.3. Kritinio defekto dydžio nustatymas

Izoliacijos resursas tiesiogiai priklauso nuo tariamojo krūvio dydžio. Pagal jo dydį sprendžiama apie izoliacijos būklę:

- Įrenginio izoliacijoje pradiniais daliniais išlydžiais laikomi toki, kurių tariamojo krūvio dydis siekia 10 - 50 pC;
- Kritiniais laikomi toki daliniai išlydžiai, kurių tariamasis krūvis viršija 1000 pC.

Kadangi tariamojo krūvio dydis priklauso nuo izoliacijos storio, todėl, siekiant nustatyti modelio kritinį defekto dydį, tiriami skirtingi defektų dydžiai su skirtingais alyvinės izoliacijos sluoksnio storiais. Tyrimo metu, keičiant izoliacinės alyvos sluoksnio dydį, analizuojamas tariamojo krūvio kitimas. Analizuojami trijų izoliacinės alyvos sluoksnių storių  $s_s$  priklausomybė nuo defektų dydžio  $D$  izoliaciniame kartone.  $s_s = 1$  mm, 2 mm, 6 mm – šie dydžiai pasirenkami iš lentelės Nr.2. Defekto dydis  $D = 0,5; 1; 2; 3; 3,5$  mm.

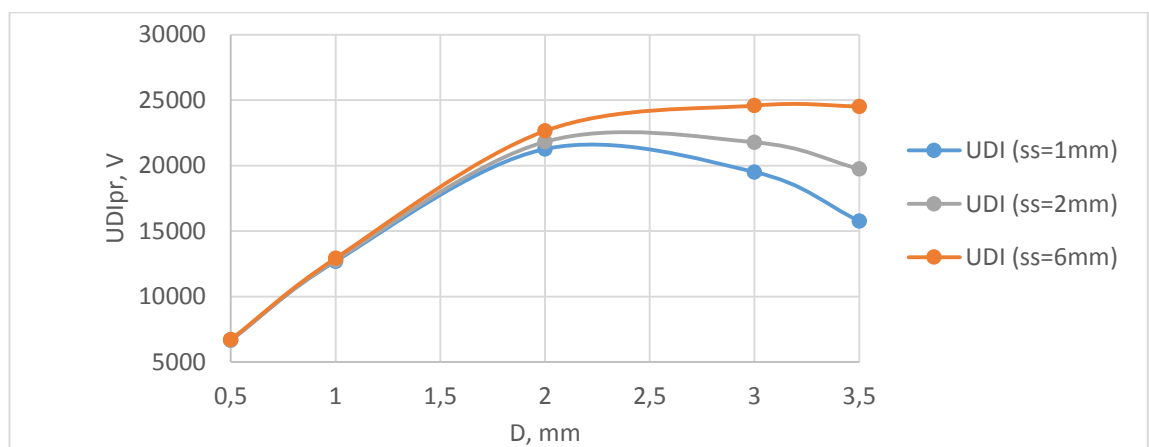




**3.8 pav.** Tariamojo krūvio  $q$  priklausomybė nuo defekto dydžio  $D$  esant skirtingoms izoliacinės alyvos sluoksnio storio  $s_s$  reikšmėms

Pagal paveikslo Nr.3.8 duomenis nustatyta, kad atspariausias veikiamai įtampai  $U_p(t)$  yra didžiausio alyvinės izoliacijos sluoksnio  $s_s$  modelis (6 mm). Teorinę kritinę 1000 pC tariamojo krūvio  $q$  reikšmę jis pasiekia, kai defekto dydis  $D = 3,15$  mm. Kai  $s_s = 2$  mm, kritinė riba pasiekama defekto dydžiui  $D$  esant 2,9 mm. Modelio, kurio  $s_s$  sluoksnis yra 1 mm, eksploatacijos resursas yra pats mažiausias iš tiriamų. Eksploatuojant įrenginius tomis pačios sąlygomis, pastarojo izoliacijos pramušimas įvyktų greičiausiai. Jo kritinis defekto dydis  $D$  yra 2,7 mm.

Modelį veikianti įtampa  $U_{DIpr}$ , pirmojo defekto pramušimo metu, charakterizuoja modelio jautrumą viršįtampiams. Jeigu  $U_{DIpr}$  bus pakankamai didelis, įrenginio aplinkoje susidarantys viršįtampiai bus tiesiog per mažos amplitudės, kad įvyktų defekto tarpelio pramušimas. Ir atvirkščiai - jeigu  $U_{DIpr}$  bus itin mažas – daliniai išlydžiai defekte gali pradėti vykti net nuo menkiausių viršįtampių. Keičiant alyvinės izoliacijos sluoksnio dydį ir registruojant modelį veikiančią įtampą, reikalingą defekto pramušimui, siekiama nustatyti kritinį defekto dydį. Tyrimo parametrai nesikeičia.



**3.9 pav.** Įtamos, veikiančios modelį pirmojo dalinio išlydžio metu,  $U_{DIpr}$  priklausomybė nuo defekto dydžio esant skirtingoms  $s_s$  reikšmėms

Pagal paveiksle Nr.3.9 pateiktus duomenis nustatyta, kad modelis su didžiausiu izoliacinės alyvos sluoksniu (6 mm) yra tinkamiausias eksploatacijai, esant 11 kV darbinei įtampai. Šiame paveiksle pateikiami matematinio modeliu nustatyti kritiniai defekto dydžiai. Kai  $s_s = 1; 2$  mm, o defekto dydis  $D$  atitinkamai pasiekia 2,3 mm ir 2,5 mm reikšmes,  $U_{Dlpr}$  pradeda mažėti. Didėjant defektui, pasiekiami jo kritinė riba. Pasiekus šį dydį, kai defektui didėjant toliau, modelį veikianti pramušimo įtampa pradeda mažėti – defekto pramušimui reikalinga mažesnė įtampa. Tuomet reikalingi vis mažesnės amplitudės viršampiai, kad izoliacijoje vyktų daliniai išlydžiai. Defektui didėjant toliau,  $U_{Dlpr}$  toliau mažėja, kol galimai pasiekia darbinės įtampos reikšmės. Taip suardoma izoliacija ir įvyksta jos pramušimas.

Tyrimo metu buvo nustatyta, kad ne tariamojo krūvio dydis, o modelį veikianti įtampa yra tinkamesnė izoliacijos būklės nustatymui. Kadangi literatūroje [1] nurodytas kritinis tariamojo krūvio dydis (1000 pC) tik apytiksliai nurodo tikrąjį kritinį izoliacijos tašką, tinkamai įrenginio eksploatacijai yra tikslinga sudaryti  $U_{Dlpr}$  grafikus, pagal kuriuos, žinant įrenginio izoliacijos storį ir defekto pramušimui reikalingą įtampą, būtų galima nustatyti defekto dydį ir įrenginio eksploatacijos resursą.

Pagal bandymo rezultatus, pateiktus paveiksluose Nr.3.8 ir 98, nustatyti kritiniai defektų dydžiai, kurios pasiekus izoliacijos irimas suintensyvėja:

- Kai  $s_s = 1$  mm,  $D = 2,3$  mm,  $q = 400$  pC;
- Kai  $s_s = 2$  mm,  $D = 2,5$  mm,  $q = 600$  pC;
- Kai  $s_s = 6$  mm, tiriamų defektų dydžių ribose, kritinis  $D$  nebuvo nustatytas.

## **3.2. Laboratorinis bandymas**

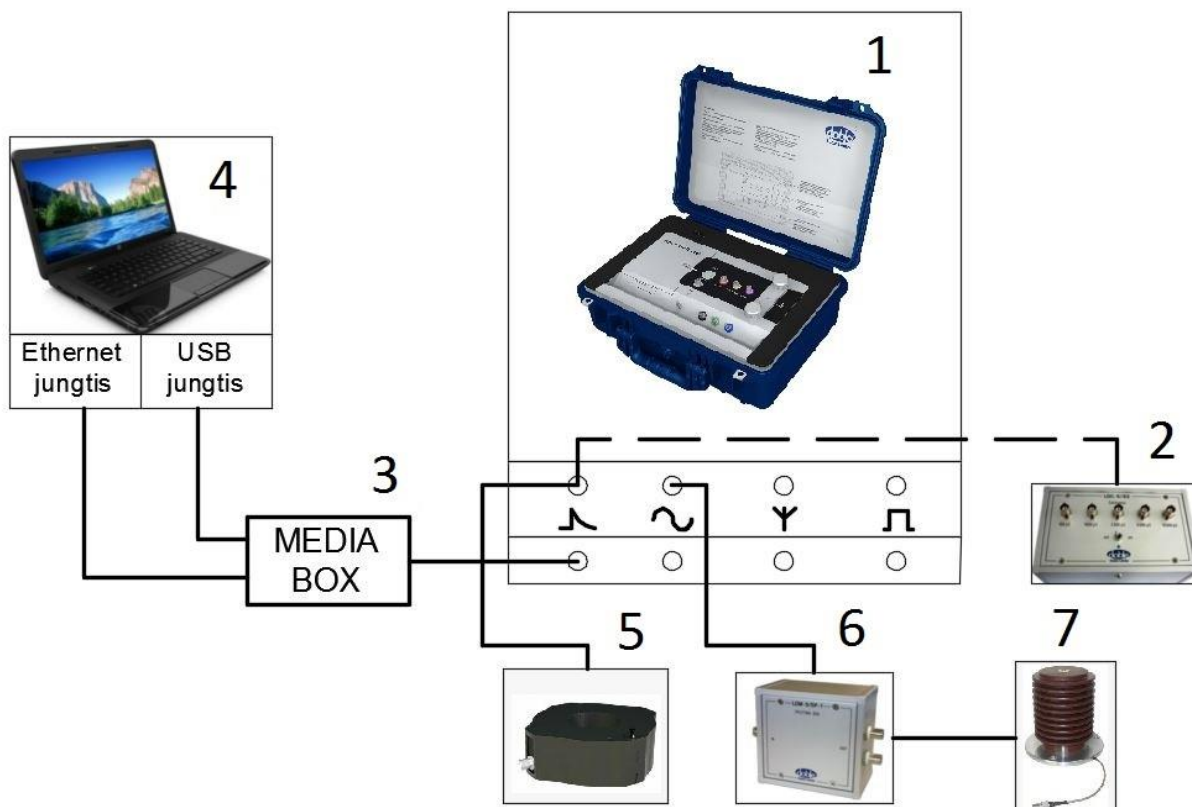
### **3.2.1. Bandymo aprašymas**

Eksperimentinio bandymo metu buvo tikrinama kietosios izoliacijos ir kombinuotosios izoliacijos būklė, bandymo objektą prijungus prie 11kV bandomosios įtampos.

Dalinių išlydžių ir kitų parametrų registravimui buvo naudojama Doble Lemke „PD-Smart electrical“ dalinių išlydžių registravimo ir diagnostikos atlikimo sistema. Ši sistema gali atlikti įvairių parametrų tyrimus realiu laiku, gali būti naudojama kaip stacionari arba kaip portatyvi sistema. „PD-Smart electrical“ atitinka DIN EN 60270, VDE 0434, ANSI ir kitus IEEE standartus [20].

„PD-Smart electrical“ sistema gali būti naudojama besisukančių elektros mašinų, transformatorių, kabelių, kabelių movų ir kitų elementų izoliacijos būklės tyrimams ir įvairių parametrų registravimui, elementui esant eksploatacijos režime arba jį atjungus nuo elektros tinklo ir naudojant papildomą energijos šaltinį [20].

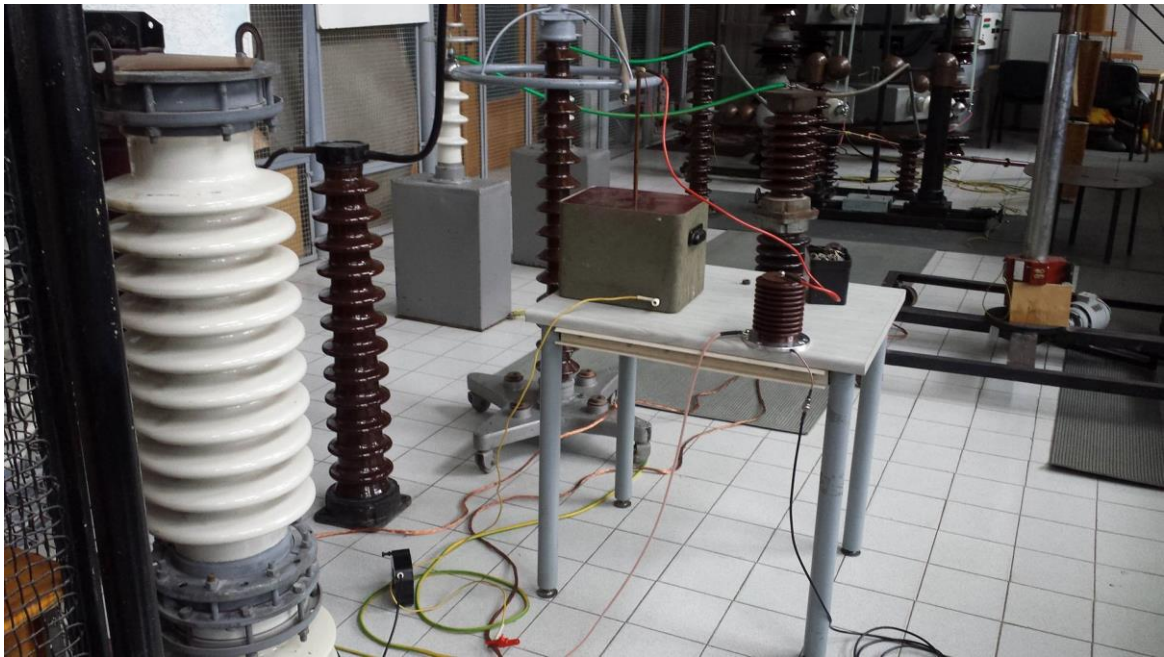
„PD-Smart electrical“ įrenginio principinė sujungimo schema pateikiama paveiksle Nr.3.10.



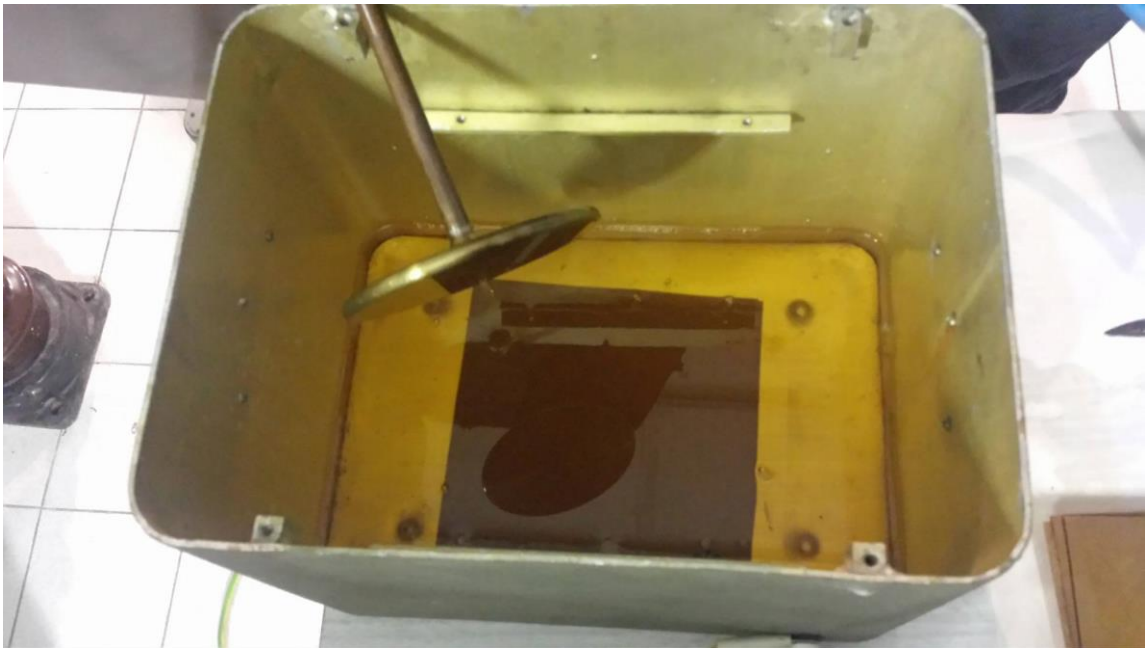
**3.10 pav.** „PD-Smart electrical“ sistemos sujungimas eksperimentiniam bandymui. 1 – PD-Smart įrenginys apdorojantis duomenis ir pateikiantis juos kompiuteriui; 2 – „LDC-5/S2“ dalinių išlydžių krūvio kalibratorius; 3 – „Media box“ įrenginys naudojamas sujungti PD-Smart ir kompiuterio sistemas; 4 – kompiuteris su Doble lemke programine įranga; 5 – „HFCT-300 Sensor“ aukšto dažnio srovės transformatorius; 6 – „LDM-5/SP1 splitting box“ įrenginys konvertuojantis dalinio išlydžio arba įtampos impulsą į signalą suprantamą PD-Smart įrenginiui; 7 – „PDDC-17“ įtampos matavimo kondensatorius

Bandymo eiga:

1. Sujungiama naudojama „PD-Smart electrical“ įranga.
2. Kalibruojamas dalinių išlydžių krūvis bei įtampa.
3. Sujungiama bandymo schema.
4. Įjungiamas „PD-Smart electrical“ įranga.
5. Pradedamas dalinių išlydžių registravimo įrašymas bei įjungiamas elektros energijos šaltinis.
6. Transformatoriumi keliamas įtampa iki 11kV.
7. Įtampa laikoma apie 10 sekundžių.
8. Elektros energijos šaltinis išjungiamas.



**3.11 pav.** Bandymo stendas



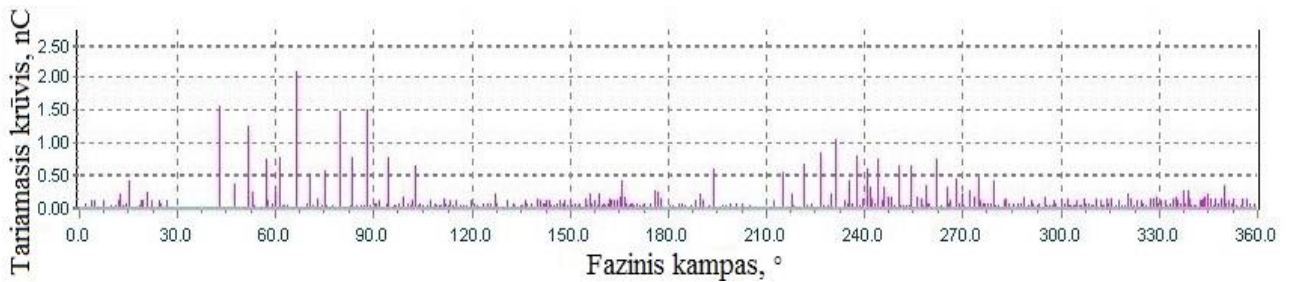
**3.12 pav.** Bandymo objektas - izoliacinis kartonas įmerktas į izoliacinę alyvą

Paveiksluose Nr.3.11 ir 3.12 pateikiamos bandymo aplinkos nuotraukos. Bandyme Nr.1 naudojamas sausas izoliacinis kartonas. Sujungiama bandymo schema ir įjungiamas išorinis įtampos šaltinis. Bandymo metu registruojami daliniai išlydžiai ir kitos charakteristikos. Bandyme Nr.2 eksperimentinis izoliacinis kartonas užpilamas izoliacine alyva. Vykdoma analogiška bandymo eiga.

### **3.2.2. Bandymas Nr.1**

Pirmojo bandymo metu registruojami izoliaciniame kartone susidarantys daliniai išlydžiai.

Šio bandymo metu bandomoji įtampa buvo 10 kV. Ji buvo pasiekta naudojant transformatorių per 9 s. Bandymo trukmė – 22 s.



**3.13 pav.** Momentinis dalinių išlydžių krūvis pagal fazės kampą, naudojant izoliacinį kartoną

Pagal paveikslo Nr.3.13 duomenis nustatyta, kad daliniai išlydžiai, naudojant izoliacinį kartoną, suintensyvėja, kai fazinis kampas yra intervale  $45^{\circ} \div 115$  ir  $210^{\circ} \div 285^{\circ}$ .

Registruojant dalinius išlydžius, buvo fiksuojamas aukštas triukšmų lygis. Nustatytas jų lygis siekia apie 200 nC. Tokių didelių triukšmų priežastis gali būti naudojamas per mažo skerspjūvio  $1 \times 35 \text{ mm}^2$  kabelis jungiantis transformatorių ir bandomąjį įrenginį. Kitos galimos priežastys: tinkle esantys triukšmai, blogas eksperimentinės įrangos sujungimas, elektromagnetinis laukas ar kitokio pobūdžio aplinkos poveikis.



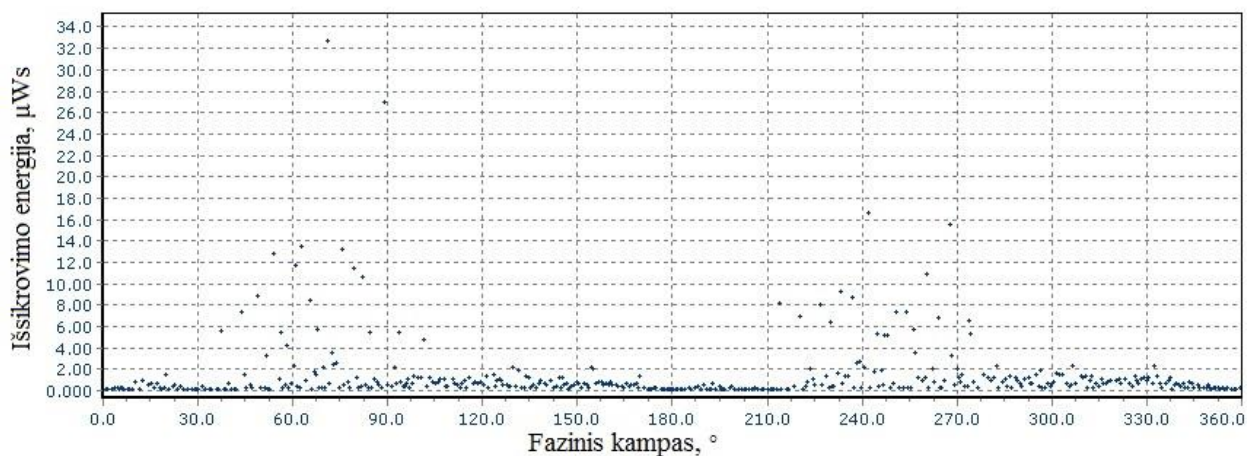
**3.14 pav.** Išsikrovimo srovės dydis bandymo metu, naudojant izoliacinį kartoną

Pagal paveiksle Nr.3.14 pateiktus duomenis nustatyta, kad išsikrovimo srovė po 16 s, nuo bandymo pradžios, pasiekia savo didžiausią reikšmę ir laikui bėgant nebekinta. Bandymo Nr.1 metu nustatyta didžiausia išsikrovimo srovės reikšmė siekia apie 2,72  $\mu\text{A}$ .

Bandymo eigoje, laiko momentu 20:28:00 buvo užregistruotas staigus išsikrovimo srovės dydžio kritimas. Jo metu, registruojamas dydis krito nuo 2,11  $\mu\text{A}$  iki 1,4  $\mu\text{A}$ , po to buvo



registruojamas didelis šuolis iki  $2,40 \mu\text{A}$ . Šio reiškinio priežastys nėra aiškios. Kadangi bandymo metu nebuvo nustatytas joks staigus kitų esminių parametru kitimas, priimama, kad tai yra įrenginio generuojamų duomenų klaida.



**3.15 pav.** Momentinis dalinio išlydžio energijos dydis pagal fazės kampą

Pagal paveikslą Nr.3.13 ir Nr.3.15 duomenis nustatytas proporcingumas tarp dalinių išlydžių dydžio ir jų generuojamos energijos. Energijos šuoliai pastebimi tuose pačiuose intervaluose kaip ir daliniai išlydžiai.

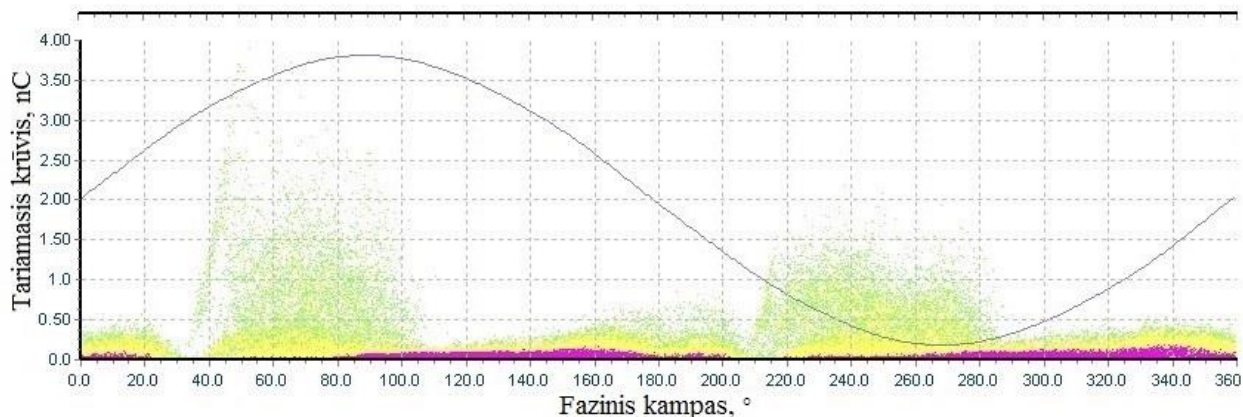
Dėl įvairių triukšmus generuojančių šaltinių, „PD-Smart electrical“ įrenginys registruoja dalinių išlydžių energiją, kuri yra intervale nuo 0 iki  $1 \mu\text{Ws}$ . Šiuos duomenis atmetame, kaip triukšmų generuojamus bandymo netikslumus.



**3.16 pav.** Dalinių išlydžių pikinės reikšmės pagal fazės kampą, kai laiko momentas  $t = 20 \text{ s}$

Pagal duomenis pateiktus paveiksle Nr.3.16 nustatyta ta pati dalinių išlydžių išsidėstymo tendencija, kaip ir paveiksle Nr.3.13. Šiame paveiksle pateikiamos pikinės dalinių išlydžių reikšmės.

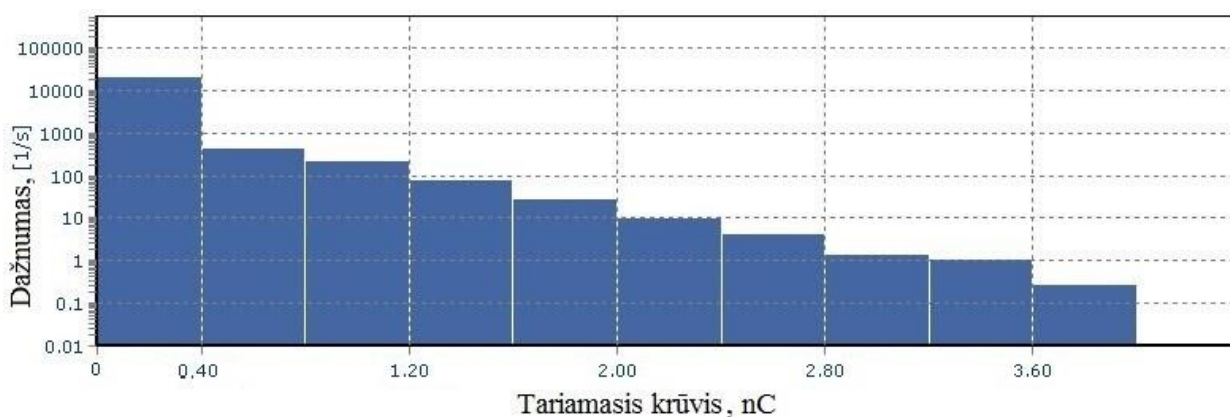
Pagal gautus duomenis, galima daryti išvadą, kad bandymo metu, pirmajame pusperiodyje susidariusių dalinių išlydžių reikšmės yra didesnės nei antrojo beveik du kartus. Pikinės dalinių išlydžių pirmajame pusperiodyje reikšmės laiko momentu  $t = 20$  s yra intervale  $2,20 \text{ pC} \div 4,93 \text{ pC}$ , o antrajame –  $1,40 \text{ pC} \div 2,48 \text{ pC}$ .



**3.17 pav.** Dalinių išlydžių pasiskirstymas laiko momentu  $t = 20$  s

Pagal paveiksle Nr.3.17 pateiktą informaciją galima matyti dalinių išlydžių suminių pasiskirstymą, jų krūvį ir dažnumą tame taške.

Laiko momentu  $t = 20$  s matomas dalinių išlydžių pasiskirstymas bandymo pabaigoje. Kaip ir pikinių reikšmių paveiksle (3.16 pav.), ir momentinių dalinių išlydžių reikšmių paveiksle (3.13 pav.) matomas didelio krūvio dalinių išlydžių pasiskirstymas konkrečiuose intervaluose. Pagal paveiksle Nr. 3.17 užfiksuotus suminius duomenis galima patikslinti išvadą, kad daliniai išlydžiai naudojant izoliacinį kartoną ir esant bandomosioms sąlygoms yra intensyviausi intervaluose  $40^\circ \div 105$  ir  $210^\circ \div 285^\circ$ .



**3.18 pav.** Dalinių išlydžių dažnumas laiko momentu  $t = 20$  s

Pagal paveikslo Nr.3.18 duomenis nustatyta, kad bandymo metu susidariusių triukšmų generuojamų dalinių išlydžių dažnumas siekia daugiau kaip 20'000 kartų per sekundę. Dalinių išlydžių, kurių krūvis yra intervale nuo 1,2 nC iki 2 nC, dažnumas siekia apie 120 kartų per

sekundę. Didžiausio krūvio dalinių išlydžių, kurių krūvis siekia 2 nC ir daugiau, dažnumas yra beveik 20 kartų per sekundę.

Q <sub>iec</sub> : 2.78 nC	Q <sub>iec</sub> <sup>2</sup> : 7.71 (nC) <sup>2</sup>	Kumuliuotas krūvis 53.2 nC
Išsikrovimo energija (min): 1.11 nWs	Išsikrovimo energija (vid): 1.18 μWs	Išsikrovimo energija (max): 23.0 μWs
Išsikrovimo galia: 2.82 mW	Išsikrovimo srovė: 2.75 μA	Kvad. krūvio dažnis: 1690.8 (nC) <sup>2</sup> /s

**3.19 pav.** Pagrindiniai bandymo Nr.1 parametrai

Paveiksle Nr.3.19 pateikiami bandymo Nr.1 svarbiausių parametų reikšmės:

- Q<sub>iec</sub> – tariamasis krūvis (q);
- minimali, vidutinė ir maksimali dalinio išlydžio metu atsiradusios energijos reikšmė;
- viso bandymo metu suakumuliuoto krūvio reikmė;
- dalinio išlydžio metu atsiradusios galios reikšmė;
- išsikrovimo srovės reikšmė;
- kita.

Mažiausia DI reikšmė: 1.81 pC	Didžiausia DI reikšmė: 3.89 nC
----------------------------------	-----------------------------------

**3.20 pav.** Bandymo Nr.1 metu užfiksuotos mažiausia ir didžiausia dalinių išlydžių reikšmės

Paveiksle Nr.3.20 pateikiamos bandymo Nr.1 metu užfiksuoti didžiausias ir mažiausias dalinio išlydžio dydžiai. Didžiausio reikšmė siekia 3890 pC. Tokio tipo defektai literatūroje [1] nurodomi kaip kritiniai ir yra netinkami eksploatacijai.

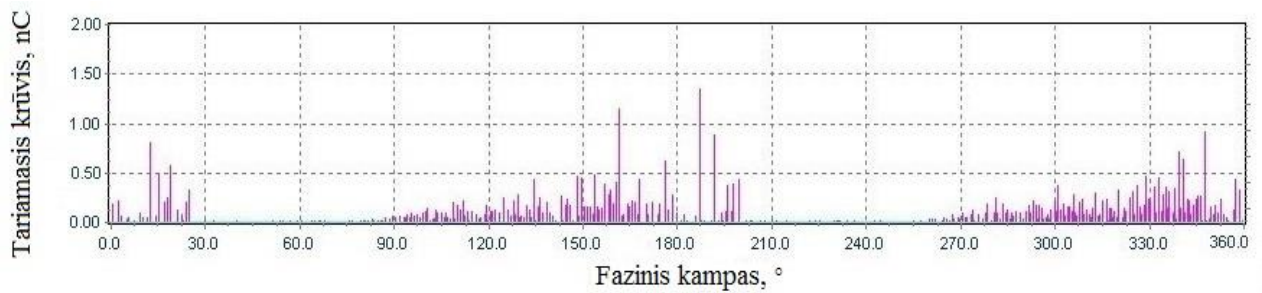
### 3.2.3. Bandymas Nr.2

Antrojo bandymo metu registruojami daliniai išlydžiai ir kiti parametrai naudojant kombinuotą izoliaciją. Ją sudaro:

1. Izoliacinis kartonas (naudotas pirmojo bandymo metu);
2. Izoliacinė alyva.

Šio bandymo metu bandomoji įtampa buvo 11 kV. Ji buvo pasiekta naudojant transformatorių per 8 s. Bandymo trukmė – 20 s.

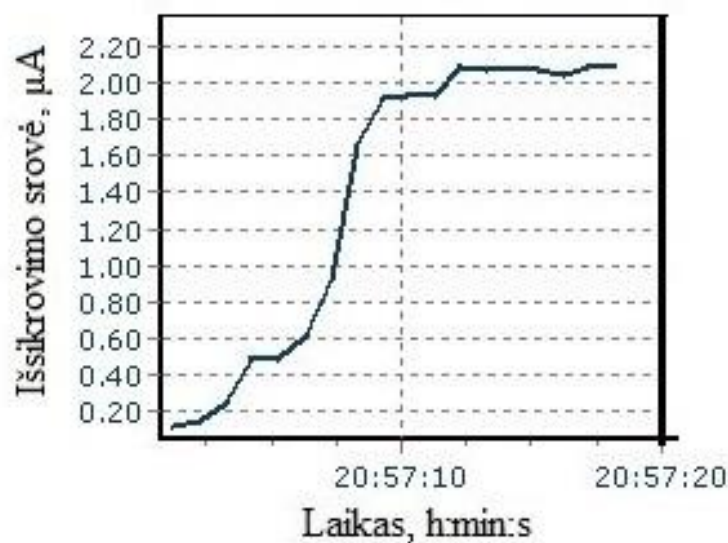




**3.21 pav.** Momentinis dalinių išlydžių krūvis pagal fazės kampą, naudojant kombinuotąją izoliaciją

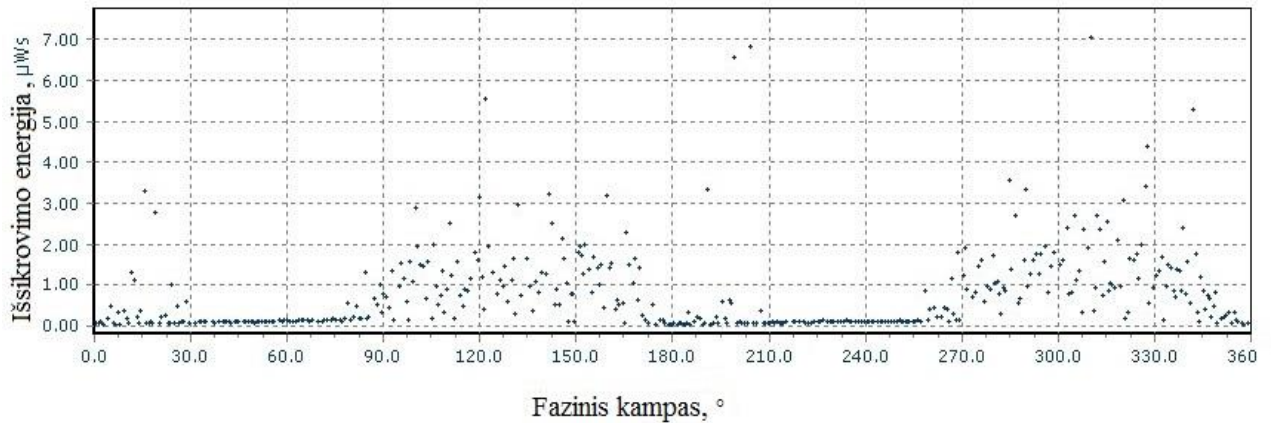
Pagal duomenis, užfiksuotus paveiksle Nr.3.21, nustatyta, kad daliniai išlydžiai, naudojant kombinuotąją izoliaciją, suintensyvėja, kai fazinis kampas yra intervale  $90^{\circ} \pm 200$  ir  $270^{\circ} \pm 25^{\circ}$ . Lyginant su pirmojo bandymo duomenimis pastebima, kad daliniai išlydžiai prasideda esant didesniai faziniam kampui ir tęsiasi ilgiau.

Skirtingai nei pirmame bandyme (3.13 pav.), pastebimas daug mažesnis triukšmų lygis. Tai galima paaiškinti izoliacinio modelio talpos sumažėjimu. Sumažėjus bandymo modelio talpai, esant tiems patiems parametrams ( $U = 11 \text{ kV}$ ;  $f = 50 \text{ Hz}$ ), “PD-Smart electrical” įrenginys neregistruoja triukšmų generuojamų dalinių išlydžių, nes jų galia yra per menka.



**3.22 pav.** Išsikrovimo srovės dydis bandymo metu, naudojant kombinuotąją izoliaciją

Paveiksle Nr.3.22, kaip ir paveiksle Nr.3.14 matoma, kad išsikrovimo srovė pasiekia savo didžiausią reikšmę ir daugiau nebedidėja. Bandymo metu nustatyta maksimali išsikrovimo srovės reikšmė siekia apie  $2,1 \mu\text{A}$  ir yra  $0,6 \mu\text{A}$  mažesnė nei nustatyta pirmojo bandymo metu. Didžiausia išsikrovimo srovė pasiekta po 13 s. Tai yra 3 s greičiau nei pirmuoju bandymu.



**3.23 pav.** Momentinis dalinio išlydžio energijos dydis pagal fazės kampą

Pagal paveikslo Nr.3.23 duomenis matoma, kad triukšmai antrojo bandymo metu generuoja mažesnę dalinių išlydžių energiją. Ji yra intervale nuo 0 iki 0,2  $\mu\text{Ws}$ . Lyginant su pirmajame bandyme gautais duomenimis, pastebima, kad triukšmų generuojama dalinių išlydžių energija yra 10 kartų mažesnė.

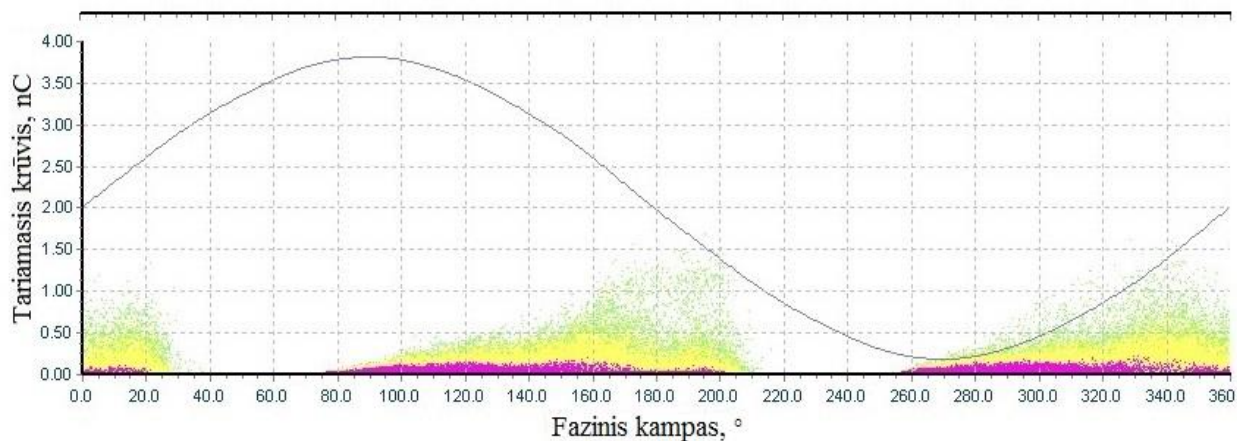
Didelis skirtumas pastebimas ir pikinėse dalinių išlydžių energijos reikšmėse. Jos yra apie 4,5 karto mažesnės nei pirmajame bandyme. Daroma išvada, kad naudojant kombinuotąjį izoliacijos modelį ir įrenginį eksploatuojant tomis pačiomis sąlygomis, kaip ir kietosios izoliacijos modelyje, jo izoliacijos resursas bus didesnis ir defekto didėjimo sparta bus lėtesnė.



**3.24 pav.** Dalinių išlydžių pikinės reikšmės pagal fazės kampą, kai laiko momentas  $t = 19$  s

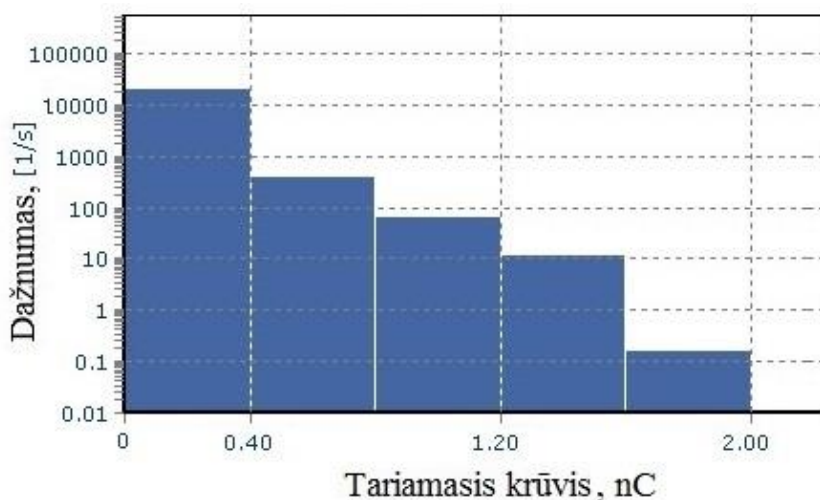
Paveiksle Nr.3.24 pateikiamos pikinės dalinių išlydžių reikšmės laiko momentu  $t = 19$  s. Nustatyta, kad pirmojo ir antrojo pusperiodžio sukeltų dalinių išlydžių reikšmės, skirtingai nei pirmuoju atveju, yra panašių reikšmių.

Pikinės dalinių išlydžių reikšmės laiko momentu  $t = 19$  s yra intervale  $0,4 \text{ pC} \div 1,6 \text{ pC}$ , o tai yra 3-4 kartus mažesnės reikšmės nei užfiksuotos naudojant tik izoliacinį kartoną.



**3.25 pav.** Dalinių išlydžių pasiskirstymas laiko momentu  $t = 19$  s

Laiko momentu  $t = 19$  s (3.25 pav.) nustatytas dalinių išlydžių pasiskirstymas bandymo pabaigoje. Pagal bandymo Nr.2 sąlygomis užfiksuotus duomenis, daliniai išlydžiai yra intensyviausi intervale  $100^\circ \div 210^\circ$  ir  $280^\circ \div 25^\circ$ .



**3.26 pav.** Dalinių išlydžių dažnumas laiko momentu  $t = 19$  s

Pagal paveikslo Nr.3.26 duomenis nustatyta, kad bandymo metu susidariusių dalinių išlydžių, kurių krūvis yra intervale nuo 1,2 nC iki 2 nC, dažnumas siekia apie 10 kartų per sekundę. Didžiausio krūvio dalinių išlydžių, kurių krūvis siekia 2 nC ir daugiau, antrojo bandymo metu nebuvo užregistruota.

Lyginant su bandymu, kurio metu buvo naudojamas tik izoliacinis kartonas, izoliacinio kartono ir alyvos kombinuota įrenginio izoliacija sugeneravo 12 kartų mažiau dalinių išlydžių, kurių krūvis yra intervale nuo 1,2 nC iki 2 nC.

Q <sub>iec</sub> : 1.29 nC	Q <sub>iec</sub> <sup>2</sup> : 1.66 (nC) <sup>2</sup>	Kumuliuotas krūvis: 43.9 nC
Išsikrovimo energija (min): 673.2 pWs	Išsikrovimo energija (vid): 728.3 nWs	Išsikrovimo energija (max): 7.02 μWs
Išsikrovimo galia: 10.3 mW	Išsikrovimo srovė: 2.08 μA	Kvad. krūvio dažnis: 645.7 (nC) <sup>2</sup> /s

**3.27 pav.** Pagrindiniai bandymo Nr.2 parametrai

Lyginant pirmojo ir antrojo bandymo rezultatus pagal paveikslų Nr.3.19 ir Nr.3.27 duomenis nustatyta, kad:

- naudojant izoliacinio kartono ir alyvos modelį, „PD–Smart electrical“ įrangos apskaičiuotas tariamasis krūvis yra 2,2 karto mažesnis nei tik izoliacinio kartono;
- viso antrojo bandymo metu sukumuluoto krūvio reikšmė yra 1,2 karto mažesnė nei pirmojo bandymo;
- vidutinė dalinių išlydžių išsikrovimo energija, užfiksuota antrojo bandymo metu, yra 1,6 karto mažesnė nei pirmajame bandyme. Atitinkamai didžiausia užfiksuota išsikrovimo energija skiriasi net 3,3 karto;
- dalinių išlydžių metu susidariusi srovė, lyginant antrąjį su pirmuoju bandymu, yra 1,3 karto mažesnė;
- nors tariamojo krūvio, dalinių išlydžių energijos ir išsikrovimo srovės reikšmės yra žymiai didesnės naudojant tik izoliacinį kartoną, tačiau modelyje su papildomai naudojama izoliacinės alyvos išsikrovimo galia yra 3,7 karto didesnė nei pirmuoju bandymu.

Mažiausia DI reikšmė: 3.00 pC	Didžiausia DI reikšmė: 1.70 nC
----------------------------------	-----------------------------------

**3.28 pav.** Bandymo Nr.2 metu užfiksuotos mažiausia ir didžiausia dalinių išlydžių reikšmės

Pagal paveikslų Nr.3.20 ir Nr.3.28 duomenis buvo nustatyta, kad mažiausia dalinio išlydžio krūvio reikšmė buvo didesnė naudojant kombinuotą izoliaciją, o didžiausia reikšmė – naudojant izoliacinį kartoną. Pirmojo bandymo metu užfiksuota didžiausia dalinio išlydžio reikšmė yra 2,3 karto didesnė nei užfiksuota antruoju bandymu.

#### **3.1.4. Bandymo rezultatų analizė**

1. Atlikus bandymus nustatytas skirtingas dalinių išlydžių išsidėstymas fazėje. Pirmojo bandymo metu, kai buvo naudojamas tik izoliacinis kartonas, daliniai išlydžiai suintensyvėjo faziniam kampui esant intervale 40°÷105 ir 210°÷285°. Antrojo bandymo metu, kai įrenginio

izoliacijai buvo naudojama izoliacinis kartonas ir alyva, daliniai išlydžiai suintensyvėjo faziniam kampui esant intervale  $100^\circ \div 210^\circ$  ir  $280^\circ \div 25^\circ$ . Pagal šiuos duomenis nustatyta, kad papildomai naudojant izoliacinę alyvą sumažėjo modelio talpa. Dėl šios priežasties, stebimas dalinių išlydžių suaktyvėjimo uždelsimas lyginant antrąjį bandymą su pirmuoju. Užfiksuota, kad antrojo bandymo metu daliniai išlydžiai pasislinko fazėje  $82,5^\circ$  ir truko  $42^\circ$  ilgiau. Kadangi pirmojo bandymo metu buvo fiksuojami santykinai dideli triukšmai, galima minimali tyrimo rezultatų paklaida.

2. Nustatyta, kad dalinių išlydžių energija ir išsikrovimo srovė yra tiesiogiai proporcinga izoliacijos modelio talpai. Pirmuoju atveju dalinių išlydžių išsikrovimo srovės maksimali reikšmė siekė  $2,72 \mu\text{A}$ , o antruoju bandymu –  $2,1 \mu\text{A}$ . Atitinkamai dalinio išlydžio metu generuojama vidutinė energija siekė  $1,18 \mu\text{Ws}$  ir  $0,73 \mu\text{Ws}$ .

3. Lyginant pirmojo ir antrojo bandymo rezultatus nustatyta, kad antrojo atveju registruojama dalinių išlydžių galia yra 3,7 karto didesnė nei naudojant tik izoliacinį kartoną ir siekia  $10,3 \text{ mW}$ . Bandymo schemą supaprastinus iki elementarių kondensatorių, kurie atitinka įvairias terpes (izoliacinį kartoną, alyvą, defektą), nustatyta, kad sumažėjus modelio talpai reikalinga didesnė galia jos pramušimui.

## IŠVADOS

1. Tyrimo metu išskiriami pagrindiniai parametrai, kurie apibūdina dalinius išlydžius ir jų poveikį įrenginio izoliacijai: dalinių išlydžių tariamasis krūvis, išsikrovimo srovė ir energija, įtampa, veikianti pirmojo pramušimo metu. Pagal šios įtampos kreivę, rekomenduojama nustatyti įrenginio izoliacijos būklę.

2. Naudojantis matematiniu modeliu, ištirtos izoliacinės alyvos kiekio kombinuotoje izoliacijoje įtaka dalinius išlydžius charakterizuojantiems parametrams. Tyrimo metu buvo analizuojami 0,5; 1 ir 2 mm dydžio defektai. Nustatyta, kad kombinuotosios izoliacijos alyvos sluoksnio storio didinimas, modelį veikiant 11 kV bandomąja įtampa, tampa nebeefektyvus, kai alyvos sluoksnio dydis pasiekia 1 mm, kai defektas yra 0,5 mm dydžio, 2 mm, kai defektas yra 1 mm dydžio, ir 6 mm, defekto dydžiui esant 2 mm. Viršijus šias reikšmes, dalinių išlydžių parametrai kinta nežymiai.

3. Tyrimo metu buvo nustatyti kritiniai defekto dydžiai esant skirtingiems izoliacinės alyvos sluoksnio storiams. Defektui pasiekus kritinį dydį, įrenginio izoliacijoje registruojamas staigus dalinių išlydžių parametru didėjimas – ji tampa netinkama eksploatacijai. Kombinuotoje izoliacijoje, kai kartono sluoksnio storis yra 4 mm, o izoliacinės alyvos sluoksnio storis yra 1 ir 2 mm, kritiniai defekto dydžiai atitinkamai yra 2,3 ir 2,5 mm.

4. Eksperimentinio bandymo metu buvo nustatyta, kad bandymo objektą veikiant 11 kV įtampa, modelis su kombinuotąja kartono ir alyvos izoliacija turi geresnes izoliacines savybes, lyginant su tik kietąją izoliaciją turinčiu modeliu. Kombinuotąją izoliaciją veikiantis vidutinis dalinių išlydžių tariamasis krūvis buvo 2,2 karto mažesnis, lyginant su vidutiniu krūviu susidaranti izoliaciniame kartone. Taip pat buvo registruojama mažesnė išsikrovimo srovė ir energija, susidaranti dalinio išlydžio metu. Jos atitinkamai buvo 1,3 ir 1,6 karto mažesnės. Užfiksuota, kad daliniai išlydžiai izoliacijos modeliuose laike pasiskirsto skirtingai - naudojant kombinuotąją izoliaciją daliniai išlydžiai fiksuojami 82,5° vėliau ir truko 42° ilgiau, lyginant su daliniais išlydžiais kietosios izoliacijos modelyje.

## LITERATŪRA

1. Degutis, A. Miliūnė, R. Morkvėnas, A. Elektros įrenginių bandymų ir gedimų diagnostikos metodai. Kaunas, 2013.
2. Baublys, J. Jankauskas, P. Markevičius, L. Morkvėnas, A. Izoliacija ir viršįtampiai. Kaunas: Technologija, 2008. 388 p. ISBN: 978-9955-25-472-0.
3. Johns, A. T. Warne D. F. Advances in high voltage engineering. The institutions of of engineering and technology, 2007. p. 648. ISBN: 978-0-85296-158-2.
4. Baublys, J. Aukštosios įtampos elektros įrenginių izoliacinių medžiagų savybės. Vilnius: AB „Punktuko“ spaustuvė, 2007. 308 p. ISBN: 9986-858-30-5.
5. LR ūkio ministerija. Elektros įrenginių bandymo normos ir apimtys. Vilnius, 2001. p. 122.
6. Valatka, P. Sučila, V. Daukšys, G. Investigation of the voltage influence on partial discharge characteristic parameters in solid insulation. Kaunas: Technologija, 2010. p. 63-66.
7. Onal, E. A study fos examining dissipation factors of various insulations and test transformers in the wide range of frequency. Stambulas, 2012. p. 27-32.
8. Čeponis, Ž. Jasiūnas, K. Morkvėnas, A. Stanionienė, R. Dalinių išlydžių proceso kombinuotojoje alyvos ir popieriaus izoliacijoje tyrimas. Kaunas, 2003. p. 21-27.
9. Cavallini, A. Montanari, G. C. Ciani, F. Analysis of Partial discharge Phenomena in Paper-Oil Insulation system as a Basis for Risk Assessment Evaluation. Italija, 2005. p. 241-244. ISSN: 2153-3725.
10. Rui-jin Liao, Li-jun Yang, Jian Li, Grzybowski, S. Aging Condition Assessment of Transformer Oil-paper Insulation Model Based on Partial Discharge Analysis. 2011. p. 303-311. ISSN: 1070-9878.
11. Ariastina, W. G. Khawaja, R. H. Blackburn, T. R. Investigation of Partial discharge Properties in Oil-Impregnated Insulation. 2006. p. 714-717. ISSN: 2160-9225.
12. Chen, X. Morshuis, P. H. F. Zhuang, Q. Smit, J. J. Xu, Z. Aging of Oil-impregnated Transformer Insulation Studied through Partial Discharge Analysis. 2010. p. 1-4.
13. Tatizawa, H. Burani, G. F. Analysis and location of partial discharge in power transformers by means of electrical methods. 2001. ISSN: 0537-9989.
14. Sokolov, V. Mayakov, V. Kuchinsky, G. Golubev, A. On-site partial discharge measurment of transformers. p. 19.
15. Perednis, A. Volkovas, V. Adaptable vibration monitoring in rotor systems. Vibromechanika, 2010. P. 396-405. ISSN: 1392-8716.



16. The use of multiple sensors for the on-line partial discharge measurement of high voltage electrical equipment. The Singapore engineer. p. 14-18. [žiūrėta 2016-03-20]. Prieiga per internetą: <http://www.jmpangseah.com/wp-content/uploads/2003/07/chapter-9.pdf>.
17. Garnacho, F. Ortego, J. Alvarez, F. Sanches-Uran, M. A. Application of HFCT and UHF Sensors in On-Line Partial Discharge Measurements for Insulation Diagnosis of High Voltage Equipment. Sensors, 2015. p. 7360-7387. ISSN: 1424-8220.
18. Coenen, S. Tenbohlen, S. Markalous, S. M. Detection of partial Discharges in Power Transformers using UHF PD Measurements and Acoustic Measurements. Vokietija, 2007. [žiūrėta 2016-05-19]. Prieiga per internetą: [http://www.uni-stuttgart.de/ieh/forschung/veroeffentlichungen/S\\_Coenen\\_PD\\_Det\\_UHF\\_Acoustic.pdf](http://www.uni-stuttgart.de/ieh/forschung/veroeffentlichungen/S_Coenen_PD_Det_UHF_Acoustic.pdf).
19. Valatka, P. Aukštosios įtampos elektros įrenginių izoliacijos buklės įvertinimo parametru tyrimas. Kaunas, 2012. p. 87.
20. Doble Lemke. PD-Smart electrical [žiūrėta 2016-05-18]. Prieiga per internetą: [http://www.doble.com/wordpress/wp-content/uploads/PDSmart\\_web.pdf](http://www.doble.com/wordpress/wp-content/uploads/PDSmart_web.pdf).



## **PRIEDAS NR.1**

```

%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:\Users\viliu_000\Desktop\10 kV registrac
Kreives\SCOPE_DATA';
%Reg_Data(1).Data_Files='2009_08_13_10_49_51_890.csv';

%
%-----
%Kudirkos Naumiestis
Reg_Data(2).Place='Kudirkos Naumiestis';
Reg_Data(2).Data_Path='C:\Users\viliu_000\Desktop\10 kV registrac
Kreives\SCOPE_DATA';
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';

%OBJEKTO PASIRINKIMAS
%3 faziu braizymas
for i= 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;
plot(tt(1:length(d_v2)),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)]);
%if expression
% statements
%end
%if expression1
% statements
%elseif expression2
% statements
%else
% statements
%end
%pause %pauze renkant grafika

%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]);
%
!
Duomenų 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/freg;
legend('Faze C');

%Registracijos duomenų apdorojimas
% nreg_p=100; %registracijos pradzia
% nreg_g=600; %registracijos galas
nreg_p=32090; %registracijos pradzia
nreg_g=34000; %registracijos galas buvo 34000
d_v10=d_v5(nreg_p:nreg_g, 1)*119; %braizomos fazes parinkimas
plot(tt(nreg_p:nreg_g),[d_v10],'linewidth',2);
legend('Faze C'); %legenda
title('Analizuojamoji imtis');
xlabel({'\it t} ( s )' );
ylabel({'\it U} ( V )');
ylim([-25*10^3 25*10^3]);
xlim([tt(nreg_p) tt(nreg_g)]);
grid on;
pause
treg=(nreg_g-nreg_p+1)/freg;

%clear all;

```

```

% II ETAPAS DALINIŲ ISLYDŽIŲ MODELIAVIMAS
%2010-07-25 Sferinio defekto pilnas modelis
%1.1. Duomenų įvedimas
%clear all;
%Um=100000;% V
D=0.002;% m
r=D/2;% m
s=0.004;% m kietosios izoliacijos dalies storis
s2=0.002;% m skystosios izoliacijos dilaies storis
T=treg;% s
h=1/freg;
%h=5/10^6;% zingsnis
tau=0.3/10^6;% s vidutine daliniu islydziu sroves impulsotrukme (0.01-0.3)
Eu=3000000;% V/m prad el lauko stipris normaliomis atmosfer salyg
p=760;%760;% mm Hg st atmosferinis slegis;
Temp=20;% oC Temperatura;
eo=8.854*10^(-12); %F/m dielektrine skvarba vakume

er1=2.0;%santykine kartono dielektrine skvarba
er2=2.5;%santykine alyvos dielektrine skvarba
e1=eo*er1;
e2=eo*er2;

f=50;% Hz daznis
w=2*pi*f; %kampinis daznis

%Skaiciavimai
%1.2.1 Pradiniu parametru nustatymas
CDI=4*pi*eo*r; % Sferinio defekto savitoji talpa (buvo 4*pi*eo*r)
%CDI=eo/6*D*pi % cilindrinio defekto savitoji talpa
ro=r/(s-D)*log(2);
Cid=pi*e1*r*(1+ro+ro^2+ro^3+ro^4); %kietojo izoliacijos sluoksnio talpa
%Cid=4*pi*e1*r*s/(s-r);%kietojo izoliacijos sluoksnio talpa NAUJAI
delta=p/760*293/(273+Temp); %Slegio ir temperaturos pataisos koeficientas
Uk=2*r*Eu*delta; %Defekto kibirkstinio tarpelio pramusimo itampa
%Csum=CDI*Cid/(CDI+Cid);
UDI=Cid/(CDI+Cid);
%UDI=Cid;
UDIpr=Uk/UDI; %modeli veikianti itampa pirmo pramusimo metu
Idmx=Cid*Uk/tau; % Sroves suolio amplitude persikrovimo metu (buvo
Idmx=Cid*Uk/tau;)
Idx=Idmx*tau; % sroves dydis kai t=0;
qlx=Uk*Cid; % daliniu islydziu (defekto) tariamasis kruvis (buvo qlx=Uk*Cid;)
Wkx=qlx*UDIpr/2; % Dalinio islydzio energija
%P=UDIpr*Idx;%???????
%t1p=asin(UDIpr/Um)/pi*2*T; % Dalinio islydzio pirmas momentas
%nx=T/t1p; % daliniu islydziu kiekis
%Wkxdaz=nx/T %daliniu islydziu daznis

%1.2.2 Pradiniu parametru nustatymas kombinuotoje izoliacijoje
Cik=Cid; %kietosios izoliacijos talpa
ro2=r/(s2+(s-D))*log(2);
Cis=pi*e2*r*(1+ro2+ro2^2+ro2^3+ro2^4);
%Cis=4*pi*e2*s*s2/(s2-s); %skystosios izoliacijos talpa
%Csum2=(Cik*Cis*CDI)/(CDI*Cik+CDI*Cis+Cis*Cik);
UDIk=(Cik*Cis)/(CDI*Cik+CDI*Cis+Cis*Cik); %kietojoje izoliacijoje esanti
defekta veikianti itampa (2.20 formule)
%C1=Cik*Cis/(Cis+Cik);
%UDIc=C1/(CDI+C1);
UDIcpr=Uk/UDIc %modeli veikianti itampa pirmo pramusimo metu
Cek=Cik*Cis/(Cik+Cis);%?????!!!!!!
%Cek=Cik*Cis*CDI/(Cik*Cis+Cik*CDI+Cis*CDI);

```

```

Idmxk=Cek*Uk/tau %(buvo Idmxk=Cek*Uk/tau;)
Idxk=Idmxk*tau;
qly=Uk*Cek
Wky=qly*UDIkpr/2
%Pk=UDIkpr*Idxk;%

%1.3.1 Modeliavimas kombinuotos izo
mU=UDIkpr; %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=Idmxk*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(2,1,1), 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); %pakeistas  
KK*UDI  
%title('Defekta veikianti itampa daliniu islydziu modelyje');  
%xlabel('\it t} ( )');  
%ylabel('\it U} ( V )');  
%xlim([tt(nreg_p) tt(nreg_g)]);  
%grid on;
```

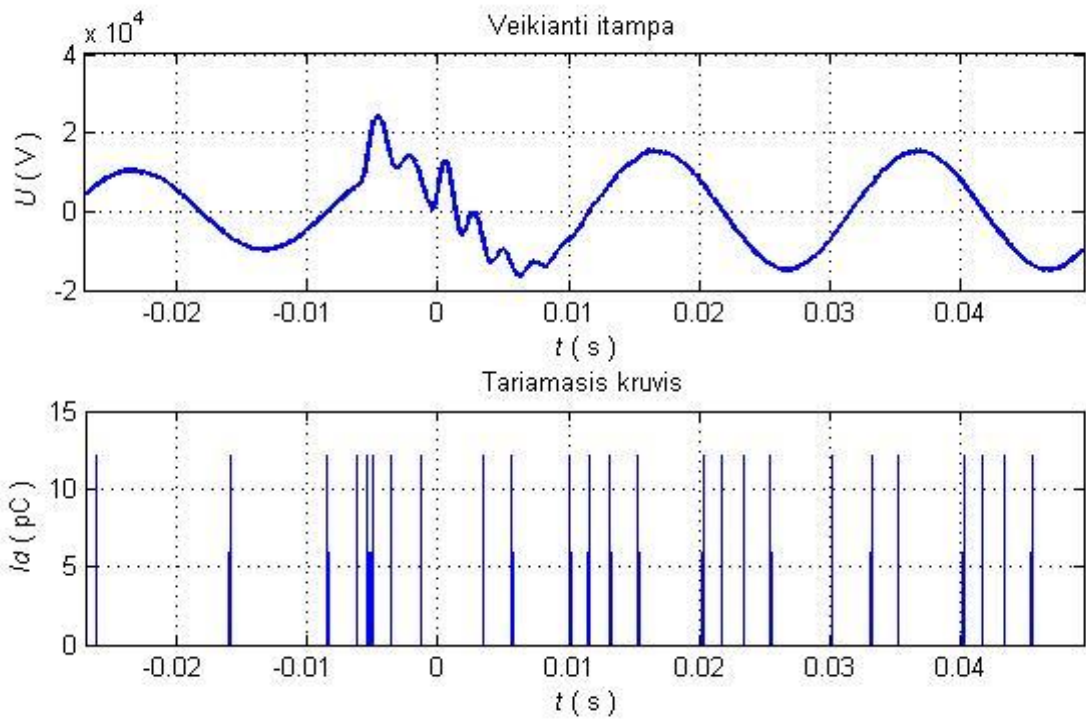
```
%subplot(2,1,1), plot(tt(nreg_p:nreg_g), ((II)*UDI, 'r');  
%title('Energijos kiekis DI metu');  
%xlabel('\it t} ( s )');  
%ylabel('\it Wk} ( J )');  
%xlim([tt(nreg_p) tt(nreg_g)]);  
%grid on;
```

```
subplot(2,1,2), plot(tt(nreg_p:nreg_g), II*1e12, 'linewidth', 1);  
title('Tariamasis kruvis');  
xlabel('\it t} ( s )');  
ylabel('\it Id} ( pC )');  
xlim([tt(nreg_p) tt(nreg_g)]);  
grid on;  
hold on;
```

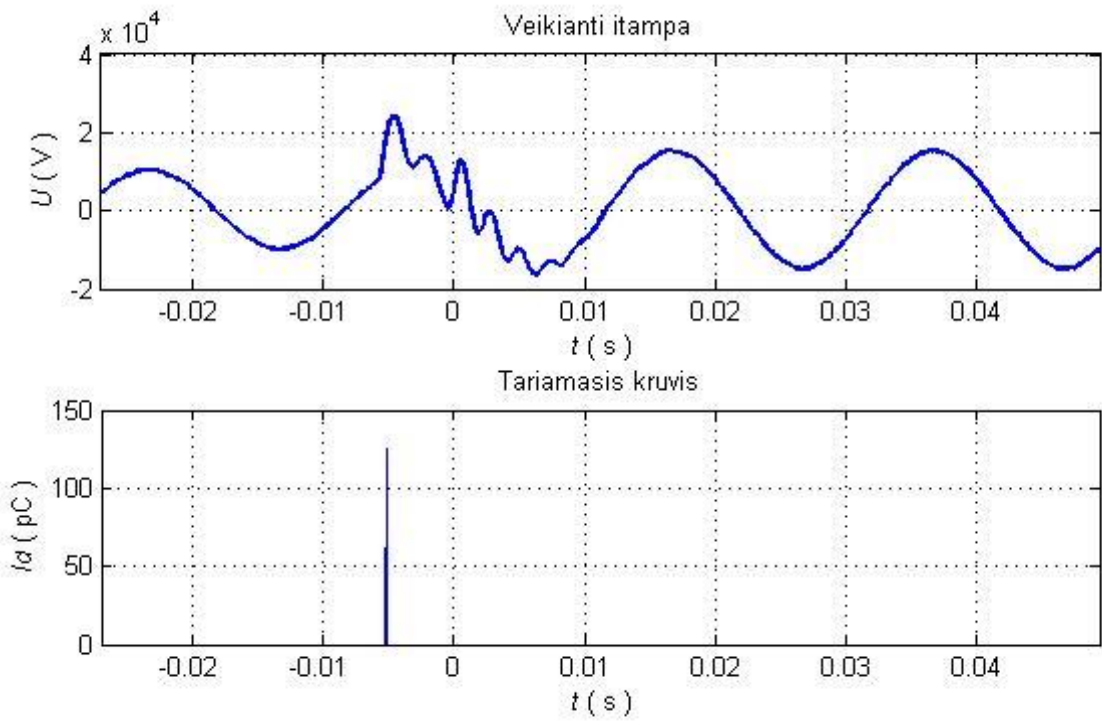
## **PRIEDAS NR.2**



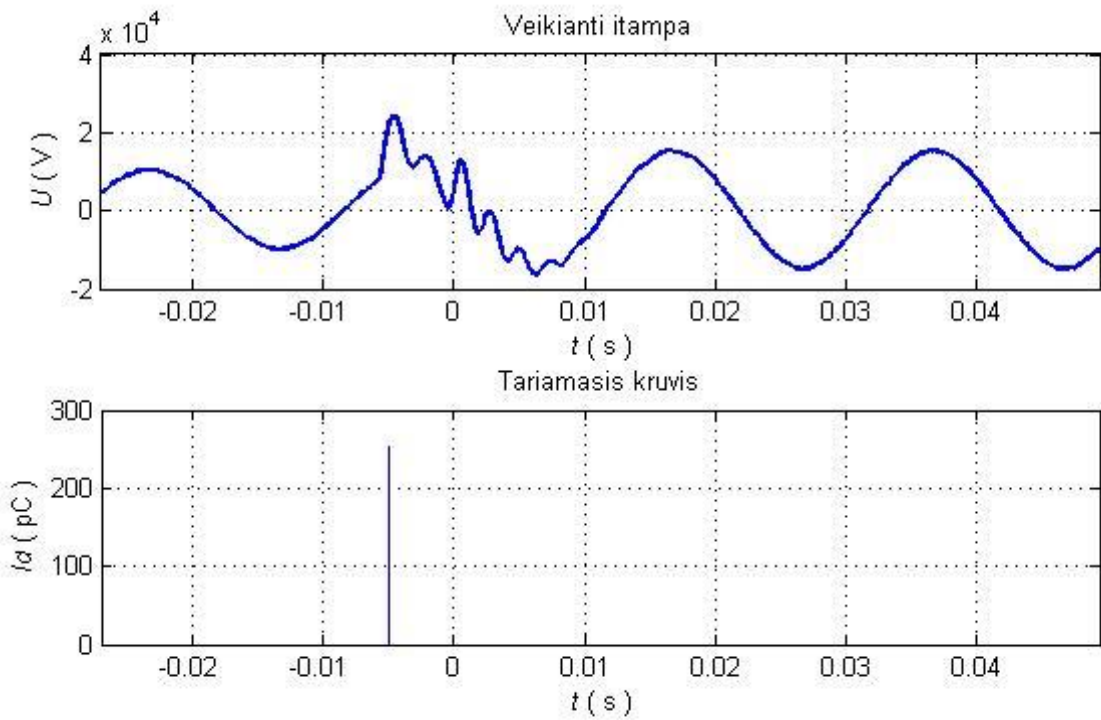
Kai D = 0,5 mm



Kai D = 1,5 mm



Kai  $D = 2 \text{ mm}$



Kai  $D = 2,5 \text{ mm}$

