



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Izoliacijos defekto atpažinimas pagal dalinių išlydžių charakteristikas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Tomas Merfeldas**

Projekto autorius

**Prof. Saulius Gudžius**

Vadovas

---

**Kaunas, 2020**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

# **Izoliacijos defekto atpažinimas pagal dalinių išlydžių charakteristikas**

Baigiamasis magistro projektas

Elektros energetikos inžinerija (6211EX010)

---

**Tomas Merfeldas**

Projekto autorius

**Prof. Saulius Gudžius**

Vadovas

**Doc. Renata Miliūnė**

Recenzentė

---

**Kaunas, 2020**



**Kauno technologijos universitetas**

Elektros ir elektronikos fakultetas

Tomas Merfeldas

## **Izoliacijos defekto atpažinimas pagal dalinių išlydžių charakteristikas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Tomo Merfeldo, baigiamasis projektas tema „Izoliacijos defekto atpažinimas pagal dalinių išlydžių charakteristikas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir 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)

Merfeldas, Tomas. Izoliacijos defekto atpažinimas pagal dalinių išlydžių charakteristikas baigiamasis projektas vadovas / Saulius Gudžius; Kauno technologijos universitetas, Elektros ir elektronikos fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė ): studijų kryptis – elektros inžinerija, krypčių grupė – inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: Daliniai išlydžiai, izoliacijos gedimas, identifikavimas, galios transformatorius.

Kaunas, 2020. 57 p.

### **Santrauka**

Magistro baigiamajame projekte gilintasi į aukštos įtampos elektros įrenginių izoliacijos būklės kitimą veikiant daliniams išlydžiams. Išnagrinėti pagrindiniai šio fenomeno aptikimo metodai. Taip pat buvo sudarytas eksperimentinis modelis imituojantis galios transformatoriaus dvigubos izoliacijos gedimą. Šiam defektui aptikti naudotas aukštų dažnio impulsų metodas, kuris daugelio autorių teigimu, pasižymėjo didžiausiu jautrumu. Eksperimente taikant tris įtampos lygius gautos charakteristikos patvirtinančios imituojamo defekto pobūdį. Iš jų sudarytos kreivės, kuriomis remiantis galima greitai, be didelių tyrimų, identifikuoti aukštos įtampos įrenginio gedimą.

Merfeldas, Tomas. Detection of Insulation Defect According to Characteristics of Partial Discharge. Master's Final Degree Project / supervisor prof. Saulius Gudžius; Electrical and Electronics faculty, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): power engineering, engineering science

Keywords: Partial discharge, insulation defect, detection, power transformer.

Kaunas, 2020. 57 pages.

### **Summary**

The master's thesis delved into aging processes of high-voltage electrical equipment insulation caused by partial discharges. Main methods of detecting this phenomena are investigated. An experimental model simulating power transformer double insulation defect were prepared as well. At this point ultra high frequency method were proposed as many authors asserted like technique with the highest level of sensitivity for partial discharges. During the research, characteristics obtained from the experiment model using three voltage levels confirm the nature of simulated defect. Due to all the results of simulating insulation defect, curves, that identify weather insulation of electrical equipment is reliable or not, were made

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas.....</b>	<b>7</b>
<b>Paveikslų sąrašas.....</b>	<b>8</b>
<b>Įvadas .....</b>	<b>10</b>
<b>1 Literatūros apžvalga .....</b>	<b>11</b>
1.1 Dalinių išlydžių poveikis .....	11
1.2 Izoliacijos gedimų formavimasis.....	11
1.3 Dalinių išlydžių klasifikavimas.....	14
1.4 Izoliacijos defektų radimas .....	16
1.4.1 Aukšto dažnio impulsų metodas .....	16
1.4.2 Optinis dalinių išlydžių aptikimas.....	18
1.4.3 Akustinis dalinių išlydžių aptikimo metodas.....	21
1.5 Apibendrinimas .....	24
<b>2 Pasiruošimas eksperimentui .....</b>	<b>25</b>
<b>3 Eksperimento eiga .....</b>	<b>30</b>
3.1 Tiriamojo objekto kurio defekto skersmuo 0,5 mm bandymų rezultatai.....	30
3.1.1 Bandymai su 10 kV įtampa.....	30
3.1.2 Bandymai su 20 kV įtampa.....	32
3.1.3 Bandymai su 30 kV įtampa.....	33
3.2 Tiriamojo objekto kurio defekto skersmuo 1 mm bandymų rezultatai .....	34
3.2.1 Bandymai su 10 kV įtampa.....	34
3.2.2 Bandymai su 20 kV įtampa.....	36
3.2.3 Bandymai su 30 kV įtampa.....	37
3.3 Tiriamojo objekto kurio defekto skersmuo 2 mm bandymų rezultatai .....	39
3.3.1 Bandymai su 10 kV įtampa.....	39
3.3.2 Bandymai su 20 kV įtampa.....	40
3.3.3 Bandymai su 30 kV įtampa.....	42
<b>4 Eksperimente imituojamo defekto identifikavimas .....</b>	<b>44</b>
4.1 Defekto atpažinimas veikiant 10 kV įtampai.....	44
4.2 Defekto atpažinimas veikiant 20 kV įtampai.....	46
4.3 Defekto atpažinimas veikiant 30 kV įtampai.....	48
<b>5 Eksperimento rezultatų apibendrinimas.....</b>	<b>51</b>
<b>Išvados .....</b>	<b>54</b>
<b>Literatūros sąrašas.....</b>	<b>55</b>
<b>Priedai .....</b>	<b>58</b>
1. priedas. Eksperimento metu gautų duomenų apdorojimo ir atvaizdavimo R programos kodas..	58

## Lentelių sąrašas

1 lentelė. Eksperimento apimtis.....	27
2 lentelė. Doble DFA 300 pagrindiniai parametrai.....	29

## Paveikslų sąrašas

<b>1 pav.</b> Izoliacijos defektai [5].....	12
<b>2 pav.</b> a Strimerinis ir b lyderinis išlydžiai [6].....	14
<b>3 pav.</b> XPLE kabelio izoliacija paveikta dalinių išlydžių [6] .....	15
<b>4 pav.</b> Popieriaus alyvos izoliacija paveikta dalinių išlydžių [6].....	15
<b>5 pav.</b> Izoliacijos defektų aptikimo aukšto dažnio impulsų metodu blokinė schema [15].....	17
<b>6 pav.</b> Adaptyvus dalinių išlydžių triukšmo slopintuvas [17].....	17
<b>7 pav.</b> Dalinio išlydžio signalas naudojant ANC filtrą [18] .....	18
<b>8 pav.</b> Vainikinių išlydžių aptikimo iš jų skleidžiamos šviesos blokinė schema [21] .....	19
<b>9 pav.</b> Skirtingų dalinių išlydžių šviesos ir srovės impulsai [19].....	20
<b>10 pav.</b> Akustiniai jutikliai ant transformatoriaus [23].....	21
<b>11 pav.</b> Akustinio metodo blokinė schema [25].....	22
<b>12 pav.</b> Dalinis išlydis užfiksuotas vienu akustiniu jutikliu [26] .....	23
<b>13 pav.</b> Trijų akustinių jutiklių dalinio išlydžio signalai [27].....	23
<b>14 pav.</b> Tiriamieji objektai. a dalyje 1mm defekto storio plokštelė, b dalyje 2 mm defekto storio plokštelė, c dalyje pagamintos plokštelės, naudojamos eksperimente .....	25
<b>15 pav.</b> Eksperimentinis modelis .....	26
<b>16 pav.</b> Bandymo kapsulė.....	27
<b>17 pav.</b> Pilna eksperimento struktūra .....	28
<b>18 pav.</b> Eksperimentu metu naudotas dalinių išlydžių matuoklis Doble DFA 300 .....	29
<b>19 pav.</b> Laboratorijos fonas.....	30
<b>20 pav.</b> Plokštelės su 1 mm storio ir 0,5 mm skersmens defektu paveiktos 10 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai.....	31
<b>21 pav.</b> Plokštelės su 2 mm storio ir 0,5 mm skersmens defektu paveiktos 10 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai.....	31
<b>22 pav.</b> Plokštelės su 1 mm storio ir 0,5 mm skersmens defektu paveiktos 20 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai.....	32
<b>23 pav.</b> Plokštelės su 2 mm storio ir 0,5 mm skersmens defektu paveiktos 20 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai.....	33
<b>24 pav.</b> Plokštelės su 1 mm storio ir 0,5 mm skersmens defektu paveiktos 30 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai.....	33
<b>25 pav.</b> Plokštelės su 2 mm storio ir 0,5 mm skersmens defektu paveiktos 30 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai.....	34
<b>26 pav.</b> Plokštelės su 1 mm storio ir 1 mm skersmens defektu paveiktos 10 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai.....	35
<b>27 pav.</b> Plokštelės su 2 mm storio ir 1 mm skersmens defektu paveiktos 10 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai.....	35
<b>28 pav.</b> Plokštelės su 1 mm storio ir 1 mm skersmens defektu paveiktos 20 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai.....	36

<b>29 pav.</b> Plokštelės su 2 mm storio ir 1 mm skersmens defektu paveiktos 20 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai.....	37
<b>30 pav.</b> Plokštelės su 1 mm storio ir 1 mm skersmens defektu paveiktos 30 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai.....	38
<b>31 pav.</b> Plokštelės su 2 mm storio ir 1 mm skersmens defektu paveiktos 30 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai.....	38
<b>32 pav.</b> Plokštelės su 1 mm storio ir 2 mm skersmens defektu paveiktos 10 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai.....	39
<b>33 pav.</b> Plokštelės su 2 mm storio ir 2 mm skersmens defektu paveiktos 10 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai.....	40
<b>34 pav.</b> Plokštelės su 1 mm storio ir 2 mm skersmens defektu paveiktos 20 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai.....	41
<b>35 pav.</b> Plokštelės su 2 mm storio ir 2 mm skersmens defektu paveiktos 20 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai.....	41
<b>36 pav.</b> Plokštelės su 1 mm storio ir 2 mm skersmens defektu paveiktos 30 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio.....	42
<b>37 pav.</b> Plokštelės su 2 mm storio ir 2 mm skersmens defektu paveiktos 30 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai.....	43
<b>38 pav.</b> Plokštelių su 1 ir 2 mm storio bei 0,5 mm skersmens defektu palyginimas, veikiant 10 kV įtampa.....	44
<b>39 pav.</b> Plokštelių su 1 ir 2 mm storio bei 1 mm skersmens defektu palyginimas, veikiant 10 kV įtampa.....	45
<b>40 pav.</b> Plokštelių su 1 ir 2 mm storio bei 2 mm skersmens defektu palyginimas, veikiant 10 kV įtampa.....	45
<b>39 pav.</b> Plokštelių su 1 ir 2 mm storio bei 0,5 mm skersmens defektu palyginimas, veikiant 20 kV įtampa.....	46
<b>42 pav.</b> Plokštelių su 1 ir 2 mm storio bei 1 mm skersmens defektu palyginimas, veikiant 20 kV įtampa.....	47
<b>43 pav.</b> Plokštelių su 1 ir 2 mm storio bei 2 mm skersmens defektu palyginimas, veikiant 20 kV įtampa.....	47
<b>44 pav.</b> Plokštelių su 1 ir 2 mm storio bei 0,5 mm skersmens defektu palyginimas, veikiant 30 kV įtampa.....	48
<b>45 pav.</b> Plokštelių su 1 ir 2 mm storio bei 1 mm skersmens defektu palyginimas, veikiant 30 kV įtampa.....	49
<b>46 pav.</b> Plokštelių su 1 ir 2 mm storio bei 2 mm skersmens defektu palyginimas, veikiant 30 kV įtampa.....	49
<b>47 pav.</b> 1 mm storio ir 0,5 mm skersmens izoliacijos defekto veikiamo 10 kV įtampa trendas.....	51
<b>48 pav.</b> 1 mm storio ir 0,5 mm skersmens izoliacijos defekto veikiamo 20 kV įtampa trendas.....	52
<b>49 pav.</b> 1 mm storio ir 0,5 mm skersmens izoliacijos defekto veikiamo 30 kV įtampa trendas.....	53

## **Įvadas**

Elektros įrenginių izoliacija yra vienas reikšmingiausių aparato elementų. Nuo jos tiesiogiai priklauso eksploatuojamo prietaiso būklė. Atsiradus pažeidimams šiame elemente, įrenginys tampa silpnas, tuo pačiu metu mažėja tinklo patikimumas bei didėja nenumatyto gedimo tikimybė. O tai sąlygotų didelius nuostolius. Todėl pastaraisiais metais, vis didesnis dėmesys skiriamas izoliacijos defektų aptikimams. Bandomi įvairūs modeliai, stebimi izoliacijos savybių pakitimai, kurie leistų įvertinti įrenginio būklę. Visais atvejais yra stebimi daliniai išlydžiai, kurie tiesiogiai daro įtaką izoliacijos būsenai. Literatūroje galima rasti medžiagos apie dalinis išlydžius ir jų aptikimo metodus (aukštų dažnio impulsų, optinis, akustinis), galimas pasekmes, kuo baigiasi nestebimas šių mažų išlydžių degimas. Tačiau labai trūksta informacijos apie aukštos įtampos elektros įrenginio izoliacijos būklės įvertinimą nenaudojant sudėtingų ir ilgai trunkančių eksperimentų bei jų duomenų analizavimų.

### **Darbo tikslas**

Sukurti kreivę, aukštos įtampos elektros įrenginio izoliacijos defektams diagnozuoti.

### **Darbo uždaviniai:**

1. pateikti dalinių išlydžių pagrindinius parametrus, apžvelgti jų identifikavimo metodus;
2. sukurti modelį, kuriuo būtų galima tirti izoliaciją ir stebėti dalinių išlydžių lygį, kintant bandomajai įtampai bei imituojamo defekto dydžiui;
3. ištirti dalinių išlydžių priklausomybes nuo įtampos ir imituojamo defekto dydžio.

## **1 Literatūros apžvalga**

Izoliacijos gedimai, atsirandantys aukšto įtampos įrenginyje yra rimta problema. Dažnai tai lieka nepastebėta iki kol eksploatuojami agregatai toliau nebegali dirbti. Todėl atliekama labai daug tyrimų, identifikuojant izoliacijos gedimų pobūdį, kurie užtikrintų įrenginio išvedimą iš darbo jam dar nesugedus.

### **1.1 Dalinių išlydžių poveikis**

Pastaraisiais metais vis didesnis dėmesys skiriamas daliniams išlydžiams, kurie yra neatsiejama aukštos įtampos įrenginių eksploatavimo dalis. Nestebimas jų lygis sugadina galingus generatorius, variklius, aukštos įtampos kabelinių linijų izoliaciją bei pažeidžia vieną brangiausią elektros tinklo įrenginių – galios transformatorių [1].

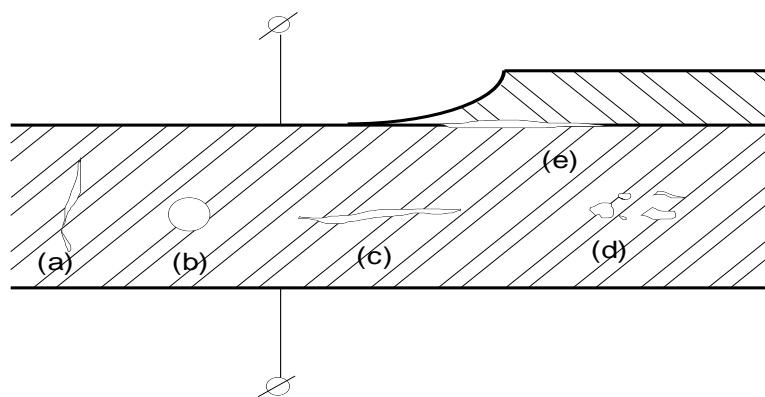
Visi elektros sistemos aparatai naudojami ne vienerius metus. Jų eksploatacija būna numatyta dešimtmečiams, todėl natūralu, kad ir jų kaina yra labai didelė, kartais siekianti net ir šešiaženklės sumas. Svarbu ir tai, kad tiek skirstomojo tinklo, tiek perdavimo tinklo nesuplanuotas tam tikrų mazgų pašalinimas ar staigus remontas reikalauja taip labai daug lėšų, o kur dar skubus naujų įrenginių pirkimas, visi demontavimo ir montavimo darbai [2] [3].

Izoliacija, sąlygojama dalinių išlydžių, pačiuose svarbiausiuose ir brangiausiuose elektros sistemos mazguose – galios transformatoriuose, kurie eksploatuojami po 20 ir daugiau metų, baigiasi mažais laisvai besiformuojančiais elektros lankais tarp apvijų, vijų, apvijų ir korpuso, kurie, laikui einant, pereitų į pilną elektros lanko užsidegimą. Tokiu atveju atsiranda avarijos rizika, kuri reikštų ne vien tik galios transformatoriaus nepataisomą sugadinimą, bet taip pat didelę žalą šalia jo esantiems įrenginiams. Pasekmės reikštų sunkius ir brangius rekonstravimo darbus [2] [3].

Tačiau kaip ir visos problemos taip ir ši – nėra išimtis, sprendimų yra. Ir priartėti prie jų galima išnagrinėjant bei apibrėžiant dalinius išlydžius ir jų atsiradimo priežastis.

### **1.2 Izoliacijos gedimų formavimasis**

Pagrindinis izoliacijos gedimas yra daliniai išlydžiai. Tai elektros iškrovos reiškinys, kuris atsiranda izoliacijoje tarp skirtingo potencialo laidininkų. Šis fenomenas susidaro vietose, kur izoliacija yra silpniausia, pavyzdžiui: tuščios ertmės joje, tai gali būti ir oro tarpai, gamybiniai brokai, izoliacijos senėjimo pasekmės, susikaupusi drėgmė (1 pav.). Šios vietos yra itin pavojingos, nes išlydžiui atsirasti užtenka gerokai silpnesnio elektrinio lauko, nei jo reikėtų sveikai izoliacijai perdengti [4] [5].



**1 pav.** Izoliacijos defektai [5]

Daliniai išlydžiai yra savaimė gęstantis elektros lanko procesas. Jis užsidega ir vėl užgęsta vos per kelias mikro ar nano sekundes. Taip yra todėl, kad elektrinis laukas tarp dielektriko yra per silpnas palaikyti nuolatos degantį išlydį [4] [5]. Šie maži elektros lankai kaskart išsižiebdami degina elektros aparato izoliaciją. Tuo pačiu metu jie skleidžia elektromagnetinę spinduliuotę, akustinius triukšmus bei sąlygoja chemines reakcijas. Akivaizdu, kad jeigu dalinio išlydžio metu spinduliuojama energija – ją galima pamatuoti ir apibrėžti [6].

Tačiau šio fenomeno aptikimas nėra paprastas. Tikslios formulės ar apibrėžtų dėsningumų, kurie aiškiai nurodytų dalinio išlydžio atsiradimo vietą – taip pat nėra. Todėl siekiant kuo tikslesnio šio reiškinio vietos nustatymo naudojami įvairūs modeliavimo algoritmai, iteraciniai skaičiavimai, kurie labiau tinka vieniems ar kitiems dalinių išlydžių aptikimo metodams (aukšto dažnio impulsų, akustinis...) ir padidina jų tikimybę teisingai nuspėti galimo izoliacijos defekto vietą. Dalinių išlydžių vietos nustatymas yra tikimybinis procesas [7]. Būtent dėl šio reiškinio nenuspėjamumo, jo identifikavimui ir lokalizavimui yra labai daug parametrų: tariamasis krūvis, dalinių išlydžių pasikartojimo intensyvumas, vidutinė išlydžio srovė, kvadratinis jo greitis, dalinių išlydžių galia [4] [5].

Pagrindinis iš šių parametrų yra tariamas krūvis. Pasak IEC 60270 standarto – tariamasis krūvis yra krūvis, kuris suformuojamas per labai mažą laiko tarpą dvejiems laidininkams, esantiems izoliacinėje medžiagoje, prijungtiems prie bandomosios matavimo grandinės. Jis atspindi pačio dalinio išlydžio impulsą. Šie įtampos impulsai matuojami piko kulonais (pC) [4] [5] [8] [9]

Taip pat dalinius išlydžius apibrėžia šio fenomeno intensyvumas – tai dalinių išlydžių skaičius per skaičiuojamą laiką

$$N = \frac{q}{T_{ref}} \quad (1.2.1)$$

Čia  $q$  yra dalinis išlydis arba tariamasis krūvis  $C$ ;

$T_{ref}$  tai laiko tarpas, per kurį skaičiuojamas dalinių išlydžių atsiradimas  $s$ .

Dažniausiai dalinių išlydžių intensyvumas apibūdinamas išlydžių skaičiumi per vieną sekundę. Matuojamas kartais per pasirinktą laiko vienetą [4] [5] [9].

Toliau dalinio išlydžio vietos indentifikavimui naudojami standartizuoti integraliniai dydžiai: vidutinė išlydžio srovė – tai tariamojo krūvio impulsų suma per tam tikrą laiko tarpą ir padalinta iš laiko per kurį sumuojamos jo amplitudės.

$$I = \frac{1}{T_{ref}} \cdot \sum_{i=1}^m |q_i| \quad (1.2.2)$$

Čia  $q_i$  – tariamojo krūvio amplitudė;

Paprastai vidutinė išlydžio srovė matuojama kulonais per sekundę (C/s) arba tiesiog amperais (A) [4] [5] [9]

Kvadratinis dalinių išlydžių pasikartojamumas yra dalinių išlydžių krūvių kvadratinė suma per tam tikrą laiko tarpą ir padalinta iš šio laiko

$$D = \frac{1}{T_{ref}} \cdot \sum_{i=1}^m q_i^2 \quad (1.2.3)$$

Dalinių išlydžių kvadratinis pasikartojamumas matuojamas kvadratiniais kulonais padalintais iš sekundės (C<sup>2</sup>/s) [4] [5] [9].

Dalinių išlydžių galia reiškia vidutinio impulso, kuris paduodamas į du laidininkus patalpintus izoliaciniėje medžiagoje, prijungtus prie bandomosios matavimo grandinės, galią.

$$P = \frac{1}{T_{ref}} \cdot \sum_{i=1}^m (q_i \cdot u_i) \quad (1.2.4)$$

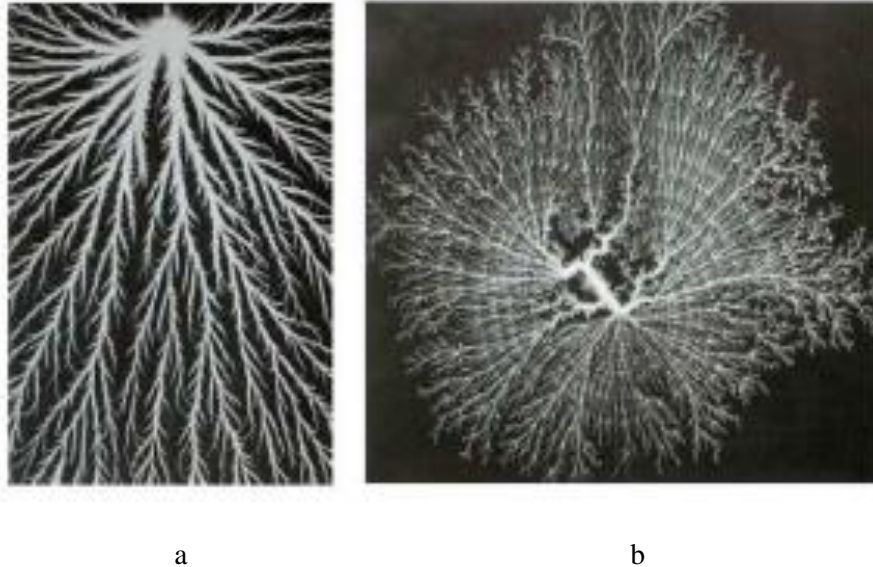
Čia  $u_i$  – tam tikro laiko momento  $i$ -toji įtampa, esant  $i$ -tajam tariamajam krūviui  $q_i$ .

Paprastai dalinių išlydžių galia išreiškiama vatais (W) [4] [5] [9].

Naudojantis tariamuoju krūviu bei dalinių išlydžių intensyvumu (1.2.1 formulė) elektros sistemos įrenginyje galima aptikti izoliacijos defektą. Tačiau to ne visada pakanka. Kaip žinia dauguma eksploatuojamų elektros įrenginių nėra nauji, daliniai išlydžiai pradeda atsiradinėti praktiškai bet kurioje įrenginio izoliacijos vietoje (jeigu nėra aiškaus izoliacijos pažeidimo) ir vien tik nustatyti, kad izoliacija yra perdengiama pavyzdžiui galios transformatoriaus apvijose, jo remontui neužtenka. Todėl siekiant pilnai charakterizuoti izoliacijos defektą, kas yra būtina izoliacijos defekto pašalinimui, reikalingi integraliniai dydžiai (1.2.2 – 1.2.4 formulės) [4] [5] [6] [9].

### 1.3 Dalinių išlydžių klasifikavimas

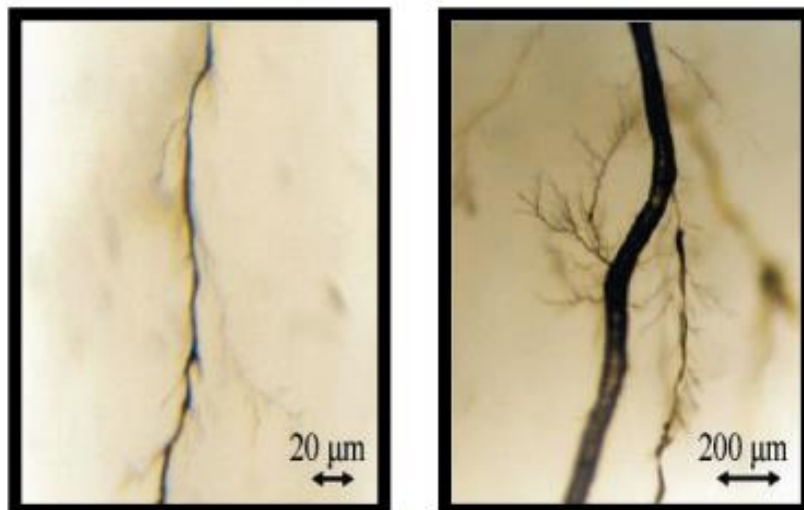
Savaime susiformuojanti elektronų griūtis gali būti tik dujose. Todėl tam, kad išlydis įvyktų kietame arba skystame dielektrike, turi būti izoliacijos pakitimų: dujų burbuliukas skystajame, tuštuma ar įtrūkimas kietajame dielektrike. Dažnai elektros lankas įsižiebia dujinėje izoliacijoje (pavyzdžiui oro linijos) ir čia jis pasireiškia kaip strimerinis arba lyderinis išlydžiai (2 pav.). Šie impulsiniai išlydžiai yra nuo keleto iki 100 pC ir trunka mažiau nei vieną mikro sekundę [6].



**2 pav.** a Strimerinis ir b lyderinis išlydžiai [6]

Techniniu požiūriu, tokie išlydžiai gali būti dviejų tipų: išorinis arba vidinis. Išoriniai daliniai išlydžiai dar žinomi kaip vainikiniai išlydžiai vyksta dujose (pvz. oras) ir pasireiškia švytėjimu [6]. Vainikinis išlydis yra savaiminis ir pats aplink laidininką išsilaikantis išlydis, atsirandantis tada, kai įtampos gradientas šalia laidininkų paviršiaus pasiekia ribinę vertę. Šis reiškinys priklauso nuo atstumo iki laidininko paviršiaus, jo grublėtumo, oro, supančio laidininkus temperatūros, slėgio ir drėgmės. [10].

Vidinis dalinis išlydis tai toks išlydis, kuris formuojasi izoliacijos viduje. Kietuose dielektrikuose, kaip jau buvo minėta anksčiau, yra įvairūs įtrūkimai, oro ertmės, užterštumas. Šiuose defektuose esančios dujos veikiamos elektromagnetinių laukų yra jonizuojamos, o dielektrikas apsuptas defektų lengvai poliarizuojamas. Todėl tokiose vietose pasidaro 2 paveiksle pateikti srovei laidūs intarpai. Juose puikios sąlygos susidaryti daliniams išlydžiams. Dažnai degantys maži elektros lankai gadina aplinkui juos esančią izoliaciją. Toks reiškinys vadinamas pagreintu izoliacijos senėjimu [6].



**3 pav.** XPLE kabelio izoliacija paveikta dalinių išlydžių [6]

Taip pat daliniai išlydžiai veikia ir skystus dielektrikus. Jeigu pavyzdžiui transformatoriaus alyva yra užteršta vandeniu ar joje yra oro bei kitų dujų burbulų, jie taip pat gali būti jonizuojami, kas reikštų laidžių kanalų susidarymą. Toliau viskas vykta kaip ir kietuose dielektrikuose – laidžiuose kanaluose užsidegtų dalinių išlydžių lankas, kuris degintų jį supančią izoliaciją, nuo degimo proceso išsiskirtų dujos, šios vėl būtų jonizuojamos. Tokiu būdu yra greitinamas skystosios izoliacijos senėjimas [6].



**4 pav.** Popieriaus alyvos izoliacija paveikta dalinių išlydžių [6]

Tuose elementuose, kuriuose izoliacija sudaryta iš dviejų sluoksnių, vieno sluoksnio dielektrinių savybių pasikeitimas tiesiogiai įtakoja kito sluoksnio atsparumą elektros srovei. 4 paveiksle pateikti kabelio su popieriaus ir alyvos izoliacija dalinių išlydžių pasekmės, kai alyvoje atsirado tiek priemaišų, jog jos nesunkiai buvo jonizuojamos, tuomet šalia laidininko esanti popieriaus izoliacija patapo apsupta jonizuotų alyvos izoliacijos priemaišų, o tai labai palankios sąlygos dalinių išlydžių išsiplėtimui iki popieriaus izoliacijos perdengimo ir tada pilno elektros lanko uždegimo [6].

## 1.4 Izoliacijos defektų radimas

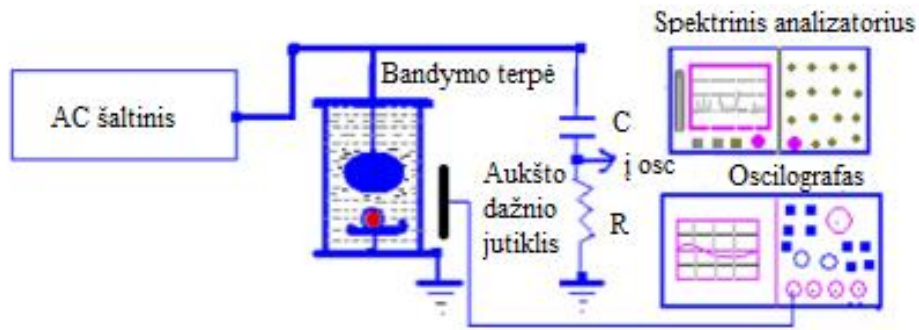
Daugumos įrenginių izoliacijos pagreitinto senėjimo galima išvengti tiesiog stebint dalinių išlydžių lygį. Joje daliniai išlydžiai gali formotis nuo  $10^{-2}$  iki  $10^6$  pC. Tai riba nuo visiškai nekenksmingų elektros įrenginiui dalinių išlydžių iki absoliutaus izoliacijos sunaikinimo vos per keliasdešimt valandų. Pradinis dalinių išlydžių lygis, kuris eksploatuojamo elektros įrenginio izoliacijai reikšmingo poveikio nepadaro yra 10 – 100 pC. Geriausias tariamasis krūvis transformatoriaus izoliacijoje 10 pC alyvai ir iki 50 pC kietajai – elektrotechniniam popieriui [5]. Didesnės tariamojo krūvio vertės reikštų galimą izoliacijos defektą, kuris galios transformatoriuose yra ieškomos keliais populiariausiais dalinių išlydžių aptikimo metodais: aukšto dažnio impulsų, optiniu ir akustiniu [11]. Šiais būdais įmanoma nustatyti galimą izoliacijos susidėvėjimą ar jos staigų pakitimą bei išvengti neplanuoto aukštos įtampos įrenginio gedimo [12].

### 1.4.1 Aukšto dažnio impulsų metodas

Aukšto dažnio impulsų būdas priklauso elektrinių metodų grupei [13] ir pasižymi dideliu jautrumu dalinių išlydžių identifikavimui bei amplitudės nustatymui [14]. Šis būdas realizuojamas gana plačiai, pavyzdžiui, galios transformatoriaus izoliacijoje, dalinių išlydžių nustatymui galios kabeliuose, įvairių srovę ribojančių reaktorių ir kitų galios įrenginių, izoliacijos pažeidimams surasti. Aukšto dažnio impulsais patogu nustatyti elektros įrenginio defektą, nes nereikia jo ardyti ir tai yra labai didelis privalumas elektros mašinų bandymuose [15].

Nagrinėjant aukšto dažnio impulsų metodą transformatorių izoliacijai, siekiant kuo tiksliau imituoti dalinį išlydį, bandymas gali būti varijuojamas keletu variantų: išlydis tarp dviejų gretimų transformatoriaus apvijų vijų, dalinis išlydis tarp apvijų ir įžemintos dalies ar daliniai išlydžiai tarp skirtingų fazių apvijų ir t.t. [1].

Aukšto dažnio impulsų metodą galima bandyti 5 pav. parodyta schema. Ji susideda iš sklandžiai valdomo kintamos aukštos įtampos (120 kV) šaltinio, cilindrinės formos bandymo terpės, pripiltos transformatorių alyvos ir joje panardintų dviejų elektrodų: viršutinio – sferinio ir apatinio, išgaubto kaip lėkštelė, kuriame yra mažas 2,5 mm skersmens aliumininis kamuoliukas, imituojantis izoliacijos defektą (paveiksle pažymėtas raudona spalva). Elektrodus skiria 15 mm tarpas. Prie šios bandymo terpės pridėtas aukštų dažnių impulsų jutiklis, sujungtas su oscilografu ir spektriniu analizatoriumi. Taip pat dalinio išlydžio įtampos nustatymui, panaudoti standartinis jungimasis kondensatorius 120 kV įtampos ir 1000 pF bei paskutinis elementas sudarantis bandymo schemą – 50  $\Omega$  varža. [15] [12].

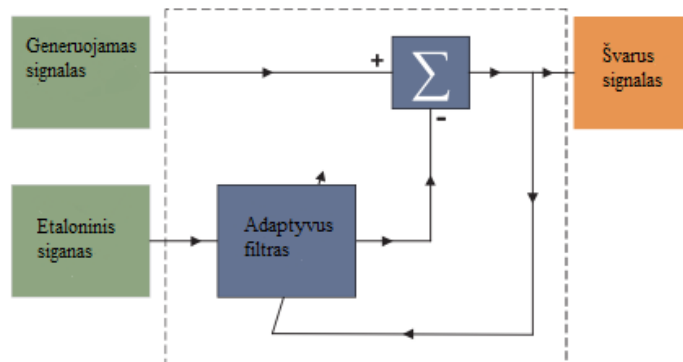


**5 pav.** Izoliacijos defektų aptikimo aukšto dažnio impulsų metodu blokinė schema [15]

Pavyzdyje, paleidus kintamą įtampą, dalelė per pirmąjį įtampos pusperiodį yra įkraunama teigiamai. Keičiantis įtampai į neigiamą pusperiodį elektrodo poliaringumas labai greitai pasikeičia, o dalelės vis dar lieka teigiamas, todėl veikiama elektrinio lauko, ji pradeda kilti link viršutinio elektrodo. Atsiradusios jėgos dėl elektrodų ir dalelės elektrinių laukų sąveikos, priverčia kamuoliuką judėti netvarkingai (netolygiai šokinėti). Toks chaotiškas šio rutuliuko judėjimas jį tai priartina prie viršutinio elektrodo, atitolindamas nuo apatinio ir toliau nuo viršutinio elektrodo, artindamas prie apatinio. Tokiu būdu prie vieno ir prie kito elektrodo sukeliama dažni ir labai maži elektros lankai, kurie įveikia ploną transformatoriaus alyvos izoliacijos sluoksnį. [15]

Dalinio išlydžio reiškinys trunka vos keletą nano ( $10^{-9}$ ) sekundžių. Tai yra laiko tarpas, per kurį spinduliuojami aukšto dažnio impulsai. Tai trunka tik akimirka, bet jo metu išspinduliuojama elektromagnetinę energiją, kurią galima užfiksuoti su aukštų dažnio impulsų jutikliu. Šis jutiklis privalo turėti plačiąjuosį atsaką ir būti pakankamai jautrus 500 – 1500 MHz [15] [12].

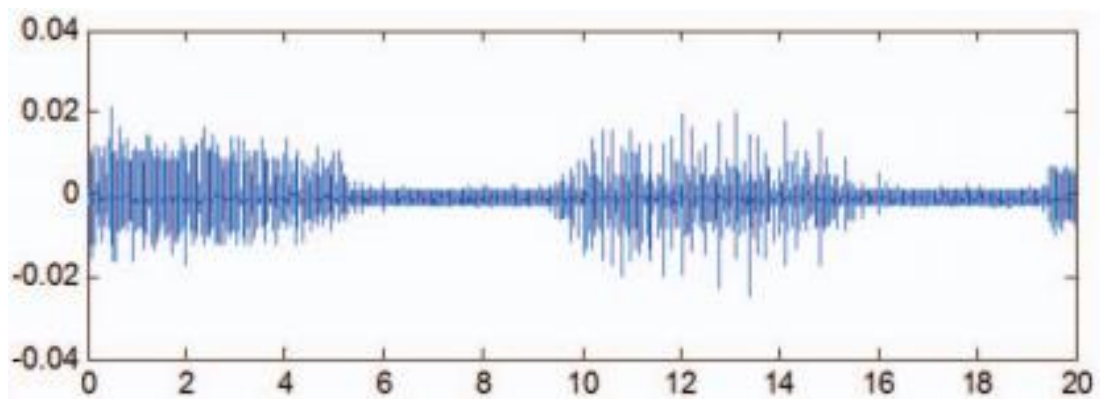
Nors tokiu metodu galima nustatyti nedidelius dalinius išlydžius, tačiau jis turi trūkumą. Silpniausia dalinių išlydžių aptikimo aukšto dažnio impulsais metodu vieta yra triukšmas. Jis yra labai žemo lygio ir karatais panašus į dalinių išlydžių skleidžiamą signalai. Todėl juos sunku atskirti [16]. Tačiau šiai problemai yra sprendimų. Vienas iš jų tai ANC adaptyvus triukšmo slopintuvas (Adaptive noise cancellation). Skirtingai nuo esamų optimalių ir matematinių filtravimo metodų, šis triukšmo slopinimas modelis reikalauja mažiau skaičiavimų ir jį paprasta įgyvendinti [17].



**6 pav.** Adaptyvus dalinių išlydžių triukšmo slopintuvas [17]

Kaip parodyta 6 paveiksle, ANC turi du įėjimus: pagrindinį, bandymo rezultatų sugeneruotiems signalams, ir šalutinį, etaloniniam signalui. Generuojamas signalas susideda iš dalinių išlydžių generuojamų aukšto dažnio impulsų ir triukšmo. Etaloninis signalas, tai teorinis, matematiškai apskaičiuotas dalinių išlydžių atsiradimas. Defekto sukelti trikdžiai ir triukšmo impulsai  $\Sigma$  bloke yra sudedami ir lyginami su etaloniniu. Gautas signalas nuolatos tikrinamas adaptyviu filtru. Čia, jis bus be triukšmų, o tai smarkiai pagerina izoliacijos defekto nustatymo metodą [17].

Tipinis aukštų dažnio impulsų metodu gautas signalas pateiktas 7 pav. Čia atvaizduotos laikinė signalo amplitudės charakteristika. Tokius svyravimus, kai signalas sutankėja ir padidėja – sukelia daliniai išlydžiai. Šiame paveiksle galima pastebėti tris dalinių išlydžių užsidegimus. Taip pat akivaizdžiai matosi ANC filtro įtaka signalui. Laiko momentais, kada dalinis išlydis nėra fiksuojamas (5–9 ms, 16–19 ms), signalas yra tolygus [18].



7 pav. Dalinio išlydžio signalas naudojant ANC filtrą [18]

Taigi, aukšto dažnio impulsų dalinių išlydžių aptikimo metodas yra jautrus ir efektyvus siekiant nustatyti ar įrenginio izoliacija yra pažeista. Taip pat šiuo metodu galima aptikti dalinius išlydžius dar pačioje pradinėje jų stadijoje [16] [17].

#### 1.4.2 Optinis dalinių išlydžių aptikimas

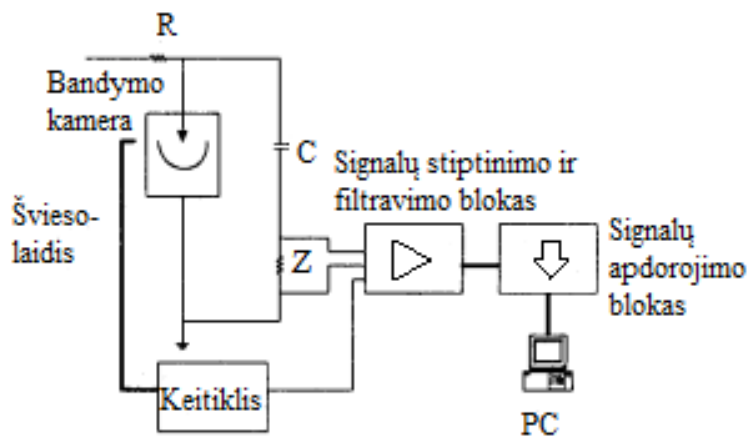
Šis ne elektrinis dalinių išlydžių aptikimo metodas nėra toks jautrus kaip aukšto dažnio impulsų. Su juo sunku nustatyti išlydžio amplitudę. Tačiau būdas daug efektyvesnis dalinių išlydžių vietos nustatymui tiek sandariuose (pavyzdžiui transformatorius), tiek atviruose (aukštos įtampos oro linijos) įrenginiuose. Svarbu tik, kad elektros įrenginio izoliacija būtų skaidri (pavyzdžiui dujos ar alyva) [19].

Vainikinio išlydžio užsidegimas ir nuolatinis jo rusenimas gali smarkiai pakenkti tiek pačiam laidininkui, tiek jo izoliacijai. O tam, kad įrenginį galima būtų remontuoti, esant pažeistai izoliacijai, būtina žinoti defekto vietą. Štai čia puikiai pasitarnauja optinis dalinių išlydžių aptikimo metodas. Jis ypatingai efektyvus sandariuose renginiuose, ten kur negali patekti joks pašalinės šviesos fotonų srautas. Tai lemia šio metodo tikslumą ir žemą triukšmo lygį [19].

Šiuo metu yra paplitę du optiniai dalinių išlydžių aptikimo būdai: tiesioginio optinio signalo aptikimo ir optinio spinduliavimo pokyčio [11].

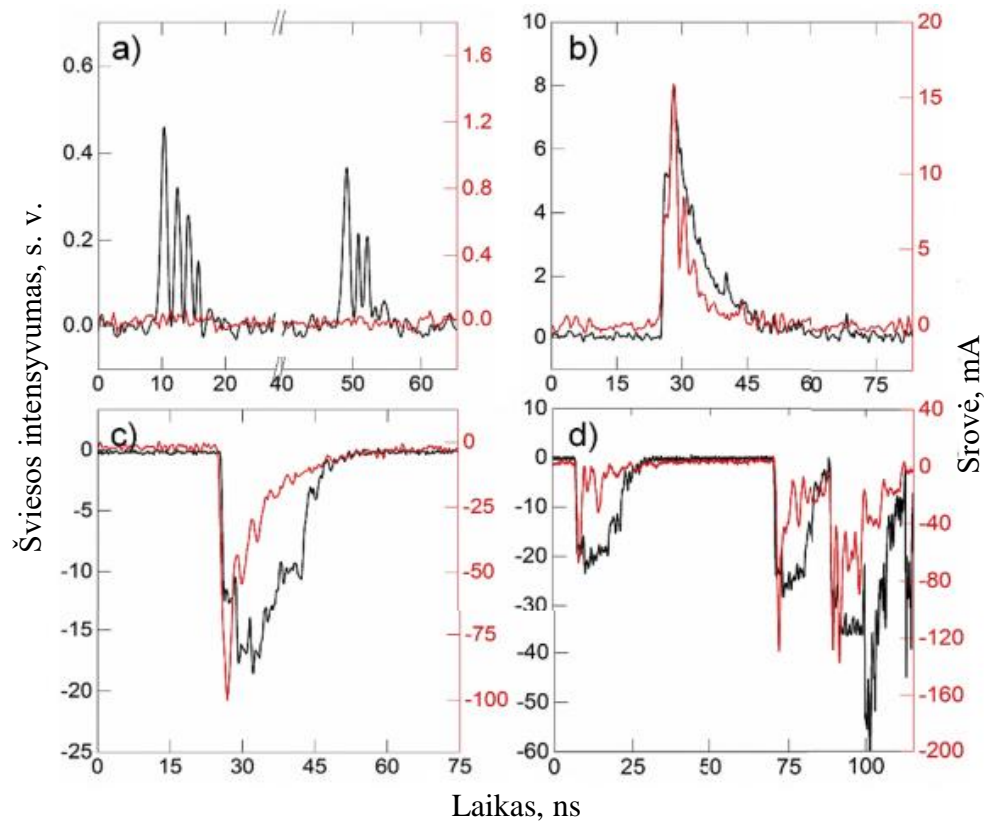
Pirmuoju atveju optinį metodą galima pritaikyti ne sandariems įrenginiams. Pavyzdžiui aukštos įtampos elektros perdavimo oro linijos. Vainikinius išlydžius, kurie susidaro aplink laidus ar prie izoliatorių girliandų, galima stebėti ultravioletinių spindulių kamera, kuri fiksuoja 280–410 nm ilgio bangas. Tai dažnis būdingas oro linijose susidarantių vainikinio išlydžio šviesai. Toks stebėjimas nebus tikslus išlydžių amplitudės ar galios įvertinimas, tačiau tai aiškiai atskleis galimo izoliacijos defekto vietą [11].

Antruoju atveju daliniai išlydžiai stebimi įrenginiuose, į kurių izoliaciją išorinė šviesa nepatenka. Ši optinio metodo atmaina šiek tiek sudėtingesnė. Čia atliekamas izoliacijos bandymas, kuriam reikia šviesos jutiklio. Tam tinka silikoniniai foto daugintuvai (SiPM) [20] arba tiesiog šviesolaidis praveistas izoliacijos bandymo terpėje (pav. Nr. 8). Vykstant vainikiniam išlydžiui dalis jo šviesos per šviesolaidį perduodama į keitiklį, kuriame ji verčiama į elektrinį signalą. Šie daliniai išlydžiai nebūna labai stiprūs ir jų sugeneruotos šviesos signalai ne visada būna aiškūs, todėl elektrinį signalą reikia sustiprinti. Paprastai jis didinamas daugiau nei 60 dB (stiprinimas gali priklausyti nuo tiriamo objekto dydžio, gedimo, izoliacijos tipo). Taip pat dalinio išlydžio srovės nustatymui, panaudoti standartinis jungimasis kondensatorius ir aktyvioji bei kompleksinė varžos. Visi gauti signalai yra multiplikuojami o vėliau apdorojami taip, kad juos būtų galima analizuoti naudojant kompiuterinę įrangą [21].



**8 pav.** Vainikinių išlydžių aptikimo iš jų skleidžiamos šviesos blokinė schema [21]

Nagrinėjamame pavyzdyje naudojamas 50 Hz kintamosios įtampos šaltinis. Tiriant dalinių išlydžių aptikimą optiniu metodu taip pat buvo lyginama dalinių išlydžių srovė, su jų sukelta šviesa [21]. Eksperimento duomenys lyginami 9 pav. pateiktuose grafikuose.



**9 pav.** Skirtingų daliųjų išlydžių šviesos ir srovės impulsai [19]

Pradinė jonizacija susiformuoja kai elektrinis laukas orientuoja laisvuosius krūvininkus (elektronus arba jonus) lauko kryptimi. Kaip rodo 9 pav. a dalis, toks procesas pagal srovę neatpažįstamas, tačiau jis jau skleidžia šviesą (o tai reiškia daliųjų išlydžių formavimąsi), dėl kurios ir buvo aptiktas. Įtampai padidėjus, o elektriniam laukui sustiprėjus, pradeda formotis teigiamas ir neigimas strimeriniai išlydžiai, 9 pav. b ir c. Tiek šviesos impulsai, tiek srovės impulsai aiškiai matosi, todėl naudojantis optiniu daliųjų išlydžių aptikimo metodu jie aptinkami ne rečiau nei šis fenomenas gali būti aptinkamas pagal jų srovės impulsus. Dar daugiau padidinus įtampą, pasireiškia pilnas strimerinis išlydis toks, kaip pavaizduota 9 pav. d dalyje. Čia taip pat išlydį galima atpažinti pagal srovę ir šviesą.

Privalu paminėti tai, kad tiek srovės, tiek šviesos impulsai yra lengvai pastebimi dar prieš jų maksimalią amplitudės vertę. Visi šie išlydžių impulsai pasireiškia per labai trumpą laiko tarpą ( $10^{-9}$  s eilės) ir išskiria pakankamai šviesos, kad juos būtų galima užfiksuoti [21].

Akivaizdu, kad norint aptikti vainikinius išlydžius, optinis metodas savo tikslumu nei kiek nenusileidžia šių išlydžių aptikimui pagal jų srovės impulsus. Toks būdas pakankamai jautrus, kad pastebėtų 5 pC tariamojo krūvio defektus [22]. Tokie daliniai išlydžiai izoliacijos dar nepažeidžia, bet metodo tikslumas leidžia sekti jų lygį ir imtis veiksmų, esant izoliacijos gedimo grėsmei [21].

Taigi, dalinių išlydžių aptikimas fiksuojant jų išskirtą šviesą yra efektyvus potencialių izoliacijos defektų radimui. Taip pat nėra triukšmų kurie turi tiesioginės įtakos izoliacijos bandymo rezultatų paklaidai [22].

### 1.4.3 Akustinis dalinių išlydžių aptikimo metodas

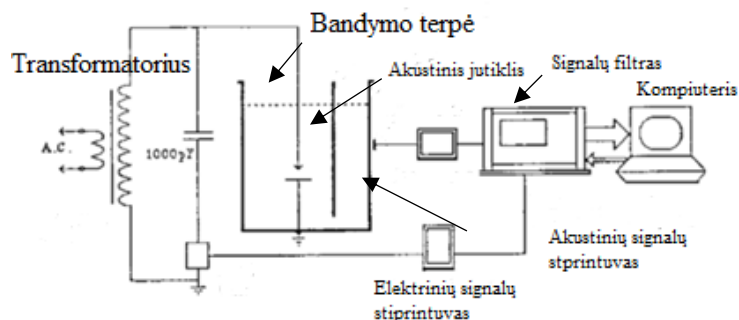
Akustinis dalinių išlydžių indentifikavimo ir lokalizacijos nustatymo būdas, kaip ir optinis – priklauso ne elektrinių metodų grupei. Tačiau jis ne mažiau populiarus. Akustinis izoliacijos defektų aptikimas pritaikomas daugelyje aukštos įtampos elektros įrenginių: kabelinėse linijose, renkamosiose šynose, jeigu jų izoliaciją atlieka SF6 dujos, taip pat transformatoriuose bei kitose elektros mašinose [13]. Tokį platų metodo pritaikymą lemia jo paprastumas ir patikimumas. Norint patikrinti įrenginio izoliaciją pavyzdžiui transformatoriuje, nereikia nei jo ardyti, nei vežti į specialias laboratorijas. Pakanka pritvirtinti akustinius jutiklius, kurie fiksuos galimo triukšmą (pav. Nr. 10) [23].



10 pav. Akustiniai jutikliai ant transformatoriaus [23]

Šio metodo veikimo principas yra gana paprastas. Akustiniai jutikliai užfiksuoja dalinio išlydžio keliamus mechaninius triukšmus. Ir nėra didelio skirtumo ar eksploatuojamo aukštos įtampos įrenginio izoliacija yra kietos, dujinės, ar skystos agregatinės būsenos, nes jose akustiniai garsai yra perduodami šios medžiagos slėgio pokyčiu. Tai tarsi slenkantis slėgio svyravimas įrenginio izoliacinėje medžiagoje [24].

Paprasčiausia šio metodo schema pateikta 11 paveiksle. Ją sudaro transformatorius, bandomajai įtampai paduoti, kondensatorius, kurio įsikrovimas ir išsikrovimas atvaizduoja dalinio išlydžio įtampos signalą, bandymo terpė, pripildyta transformatoriaus alyva, akustinis jutiklis, generuotų signalų stiprintuvai, filtras bei kompiuteris [25].



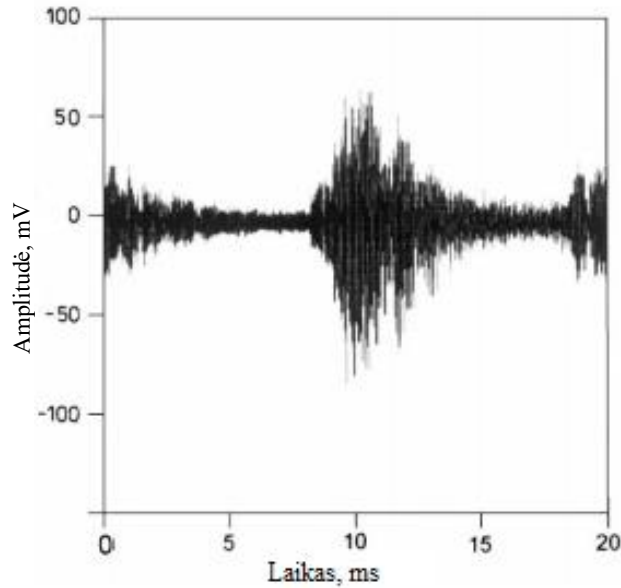
**11 pav.** Akustinio metodo blokinė schema [25]

Daliniai išlydžiai daugiausia tiriami brangiuose aukštos įtampos elektros įrenginiuose – jų izoliacijoje. Tokie įrenginiai gali skleisti vibracijas dirbdami net ir tuščiąja veika. Prijungus apkrovą vibracija dar labiau išauga. Tokie triukšmai sunkiai atskiriami kai nėra aiškaus izoliacijos gedimo. Taip pat laikui einant įrenginys sensta, dėvėjimosi procesas izoliacijoje greitėja o tai sąlygoja dar didesnius akustinius triukšmus, sukeltus ne vien izoliacijos pakitimų. Tuomet akustinio metodo efektyvumas pradeda mažėti [25].

Kita kliūtis, kuri mažina šio metodo tikslumą – tai interferencija. Šis reiškinys ypatingai dažnas transformatoriuose. Dalinio išlydžio sukeltas akustinio triukšmo bangos susideda ir tam tikrose erdvės srityse atsiranda jų susilpnėjimas, o kitose sustiprėjimas. Tai klaidina rezultatus ir silpni daliniai išlydžiai gali būti nenustatomi arba nustatomi neteisingai [25].

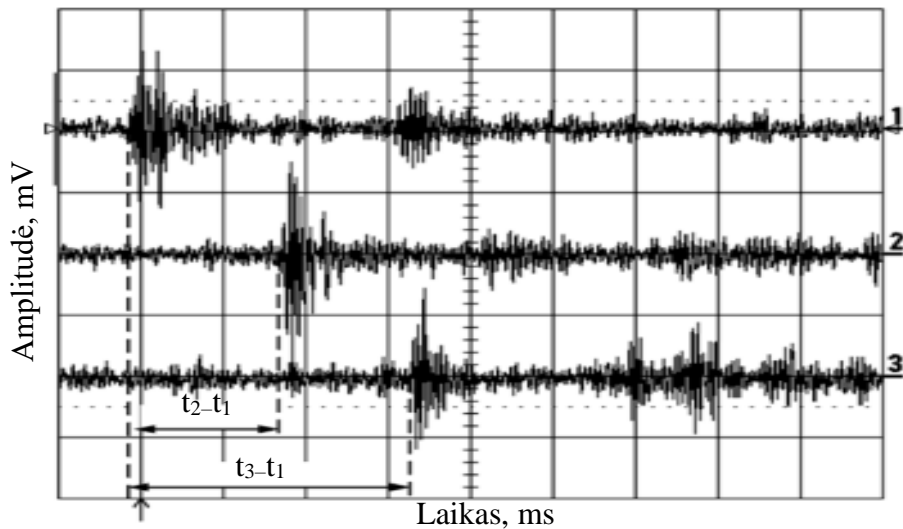
Tačiau tokiems metodo trūkumams yra sprendimų. Elektrinių dalinio išlydžio signalų sulyginimas su akustiniais smarkiai pagerina nagrinėjamo metodo efektyvumą. Tose srityse, kur akustiniai signalai nėra stiprūs ir galėtų atrodyti panašūs į triukšmą, elektriniai signalai sukelti išlydžio įtampos impulso, gali tiksliau parodyti ar tai tikrai triukšmo pasekmė ar transformatoriaus apvijų defektas [25]. Taip pat akustinio metodo tikslumą pagerina ne vieno o dviejų, trijų ar dar daugiau akustinių jutiklių naudojimas. Keleto akustinių jutiklių naudojimas ypatingai padeda tikslios izoliacijos defekto vietos nustatymui.

12 paveiksle yra pateiktas dalinio išlydžio sukeltas akustinis triukšmas transformatorių alyvoje, kurį užfiksavo vienas jutiklis. Šis gedimas prasidėjo maždaug nuo 7 s ir tęsėsi iki 15 s. Nesunku pastebėti, jog jeigu nebūtų aiškaus izoliacijos pažeidimo ir nebūtų žinoma, jog gedimas apskritai yra, dalinių išlydžių aptikimui taikyti akustinis bandymą būtų netikslingas [27].



**12 pav.** Dalinis išlydis užfiksuotas vienu akustiniu jutikliu [26]

13 paveiksle pateikti dalinio išlydžio izoliacinėje alyvoje akustinių bangų svyravimai užfiksuoti trejais jutikliais. Visi trys signalai yra vieno ir to pačio gedimo. Matoma, kad kiekvienas jutiklis gedimą užfiksavo skirtingu laiko momentu. Taip yra dėl nevienodo atstumo nuo izoliacijos defekto vietos iki kiekvieno jutiklio. Žinant koku atstumu išdėlioti šie jutikliai ir laiką per kurį dalinio išlydžio triukšmas atėjo iki daviklio – galima išskaičiuoti kurioje vietoje yra gedimas [27].



- |            |                        |
|------------|------------------------|
| 1 signalas | [500mV/div, 100ms/div] |
| 2 signalas | [500mV/div, 100ms/div] |
| 3 signalas | [500mV/div, 100ms/div] |

**13 pav.** Trijų akustinių jutiklių dalinio išlydžio signalai [27]

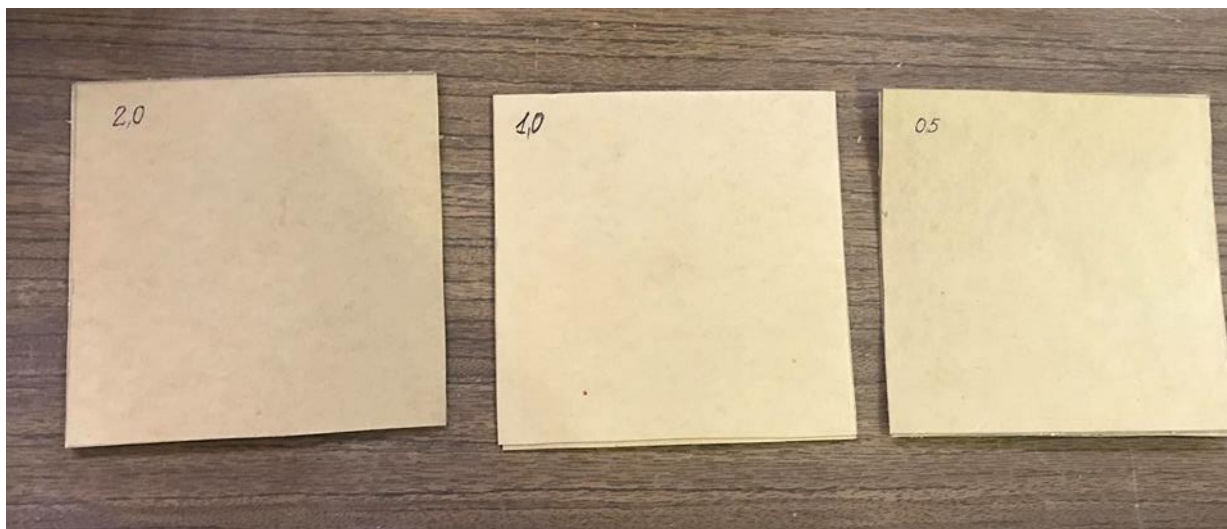
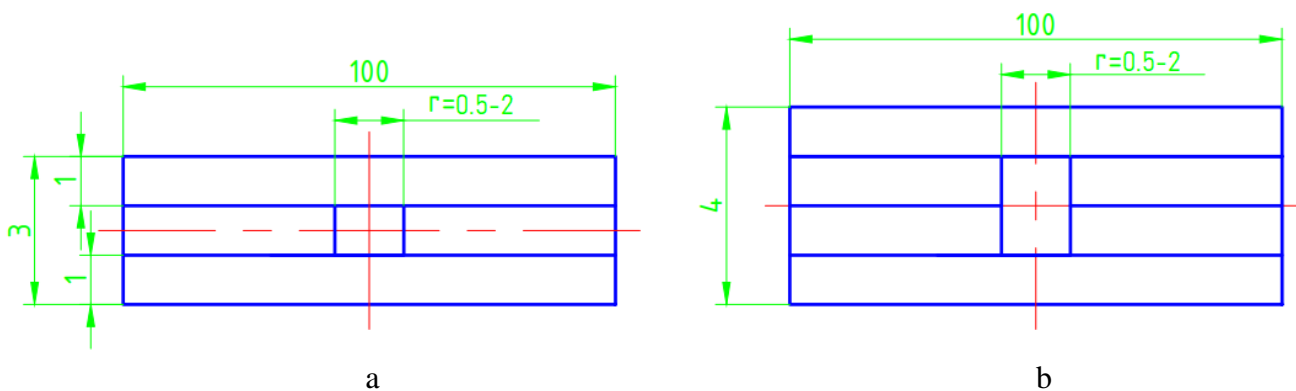
Taigi, akustinis dalinių išlydžių aptikimo metodas yra patikimas, pakankamai jautrus 50 pC ir didesniems daliniams išlydžiams bei nepriklauso nuo objekto, kurio izoliacijoje yra defektų, dydžio. Tokį metodą patogiu naudoti, nes jį pritaikyti nėra sudėtinga – nereikia ardyti įrenginių, akustinis daviklis montuojasi tikrinamo objekto išorėje. Taip pat galima ne tik identifikuoti dalinius išlydžius, bet ir nustatyti jų vietą [27] [28].

## **1.5 Apibendrinimas**

Apibendrinant išnagrinėtus literatūros šaltinius, galima teigti, kad dalinių išlydžių formavimasis aukštos įtampos elektros įrenginio izoliacijoje yra kritinis veiksnys lemiantis aparato eksploataavimo laiką, o taip pat ir viso elektros tinklo patikimumą. Todėl šį izoliacijos defektą stengiamasi aptikti dar pradinėje jo stadijoje, kada gedimas nėra smarkiai pakenkęs. Tačiau tai nėra lengvas uždavinys. Dalinių išlydžių atsiradimas sunkiai prognozuojamas. Nors tam yra daug įvairių parametrų, tokių kaip tariamasis krūvis, dalinių išlydžių pasikartojimo intensyvumas, vidutinė išlydžio srovė ir kt. jo atsiradimas įvertinamas labiau tikimybiškai nei tiksliai apskaičiuojamas. Todėl sukurta daug metodų, kurie skirtingai atranda šiuos defektus. Akustinis dalinių išlydžių aptikimo metodas yra efektyvus, kada norima nustatyti izoliacijos defekto vietą. Šis metodas nepastebės silpnos amplitudės dalinių išlydžių, tačiau jeigu izoliacija jau pažeista, bus nesudėtinga nustatyti defekto vietą. Optinis metodas, nėra toks tikslus nustatant izoliacijos defekto vietą, tačiau šiuo metodu praktiškai negaunamas triukšmas, o tai itin svarbu atliekant agregato būklės stebėseną. Taip pat praktikoje dažnai naudojamas aukštų dažnio impulsų metodas. Jo privalumas – labai didelis jautrumas. Šiuo būdu galima aptikti net silpniausios amplitudės dalinius išlydžius. Būtent dėl aukštų dažnio impulsų metodo jautrumo, jis ir buvo pasirinktas šiame darbe, izoliacijos defekto nustatymui pagal dalinių išlydžių charakteristikas.

## 2 Pasiruošimas eksperimentui

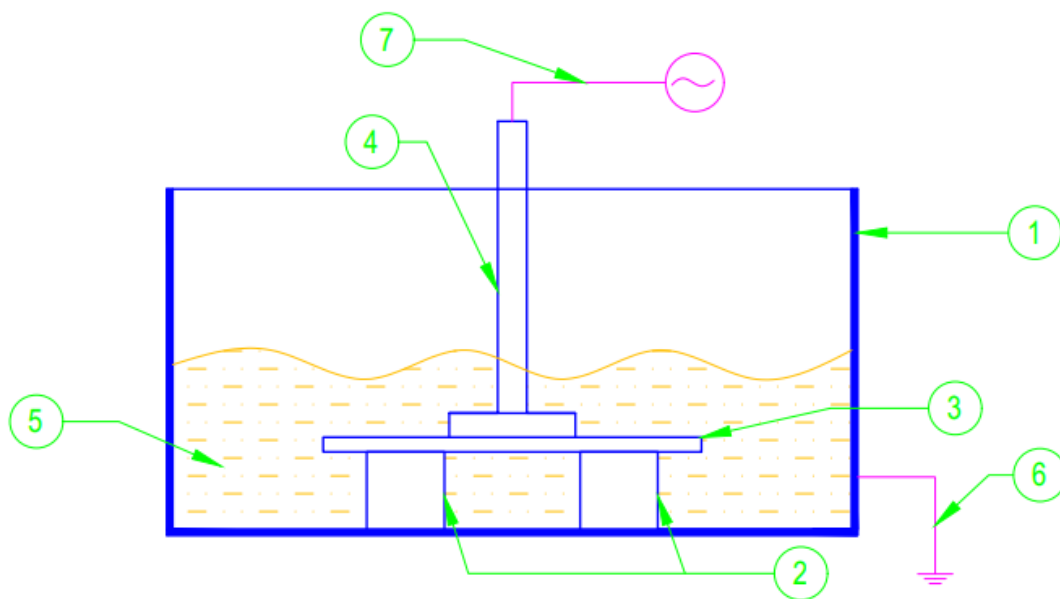
Eksperimentui buvo pagaminti 6 tiriamieji objektai. Kiekvienas iš jų – tai keletu sluoksnių elektrotechninio kartono plokštelės. Ši medžiaga pasižymi itin geromis dielektrinėmis savybėmis net ir veikiant stiprioms mechaninėms jėgoms esant plačiam temperatūros diapazonui [29] [30]. Tiriamųjų objektų matmenys yra 10 x 10 cm. Visi bandiniai turi tokio pačio tipo defektą – 0,5 mm, 1 mm ir 2 mm skersmens skylutę viduriniame sluoksnyje. Tačiau plokštelės nėra vienodos: trys bandiniai yra sudaryti iš trijų lakštų, likę bandiniai iš keturių lakštų. Pirmuoju atveju defekto storis yra 1 mm (vienos plokštelės storis), antruoju atveju – 2 mm (dviejų plokštelių storis). Tokiu būdu imituojama iš išorės sveika, tačiau viduje skirtingo dydžio defektą turinti kietoji izoliacija.



c

**14 pav.** Tiriamieji objektai. a dalyje 1mm defekto storio plokštelė, b dalyje 2 mm defekto storio plokštelė, c dalyje pagamintos plokštelės, naudojamos eksperimente

Eksperimento tikslas yra imituoti galios transformatoriaus popieriaus – alyvos izoliacijos defektą. Tam minėtos plokštelės bus patalpinamos į baką – bandymo kapsulę, pripiltą transformatorinės alyvos (žr. pav. Nr. 15).



**15 pav.** Eksperimentinis modelis

15 paveikslas pateikia esmines eksperimentinio modelio sudedamąsias dalis:

1. Bandymo kapsulė;
2. Mediniai tašeliai;
3. Tiriamasis objektas;
4. Elektrodas;
5. Transformatorinė alyva;
6. Bandymo kapsulės įžeminimas, priešingam potencialui sudaryti;
7. 50 Hz, trijų lygių kintamoji įtampa.

Pieš pradėdant tirti mėginius su izoliacijos defektu, privalu išmatuoti aplinkos foną. Tai yra labai svarbus matavimas ir jį privalu atlikti patį pirmą. Tai leis išvengti aplinkos triukšmų, kurie potencialiai gali būti įvertinti kaip dalinis išlydis.

Turint aplinkos foną, pradėdamas imituoti aukštos įtampos elektros įrenginio veikimas, esant blogai izoliacijai. Pirmoje lentelėje pateikta visa eksperimento apimtis. Čia matyti kad eksperimentiniame modelyje naudojami trys įtampos lygiai: 10 kV, 20 kV ir 30 kV. Visos trys įtampos vertės paduotos į kiekvieną tiriamąjį objektą atskirai t. y. kiekviena plokštelė bus paveikta skirtinga įtampa tris kartus. Taip bus gauta 18 bandymų.

1 lentelė. Eksperimento apimtis

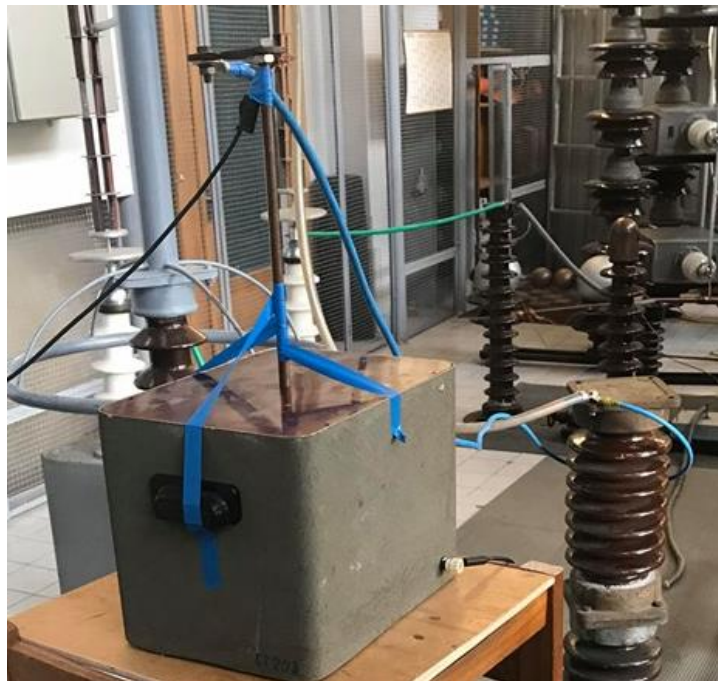
Izoliacijos defektas / Bandomoji įtampa		10 kV	20kV	30 kV
<b>Fonas</b>				
<b>1 mm storio defektas, kurio skersmuo:</b>	0,5 mm	X	X	X
	1 mm	X	X	X
	2 mm	X	X	X
<b>2 mm storio defektas, kurio skersmuo:</b>	0,5 mm	X	X	X
	1 mm	X	X	X
	2 mm	X	X	X

16 paveikslas pateikia ištrauką iš eksperimento eigos. Matomos bandymui naudotos medžiagos: eksperimento kapsulė, mediniai tašeliai joje, transformatorinė alyva ir bandinys paruoštas tyrimui. Ant jo dar turi užsidėti elektrodas.



16 pav. Bandymo kapsulė

Realus eksperimentinis modelis yra pavaizduotas 17 paveiksle. Čia pilnai matosi paruošta bandymui kapsulė. Nuotraukoje nesunku pastebėti elektroda, į kuri paduodama trijų lygių įtampa bei įžeminimo vieta, dėl kurios susidaro neigiamas potencialas bako dugne, po plokštele.



**17 pav.** Pilna eksperimento struktūra

Tokioje aplinkoje aukštąją įtampą veikiamas mėginys išsukia tam tikrus reiškinius, vadinamus daliniais išlydžiais, kurie plačiau aprašyti pirmajame skyrelyje.

Dalinių išlydžių sklaidžiamą elektromagnetinį triukšmą galima fiksuoti su specialia įranga. Šiame darbe tai yra Doble DFA 300 įrenginys turintis galimybę stebėti mažičius išlydžius akustiniu ir aukšto dažnio impulsu metodais.



**18 pav.** Eksperimentu metu naudotas dalinių išlydžių matuoklis Doble DFA 300

Eksperimente izoliacijos defektui identifikuoti naudojamas aukšto dažnio impulsų metodas, kuris, kaip daugelis autorių teigia, yra pats jautriausias [13] [14] [16] [17].

Doble DFA 300 matuoklio pagrindinės charakteristikos yra pateiktos antroje lentelėje.

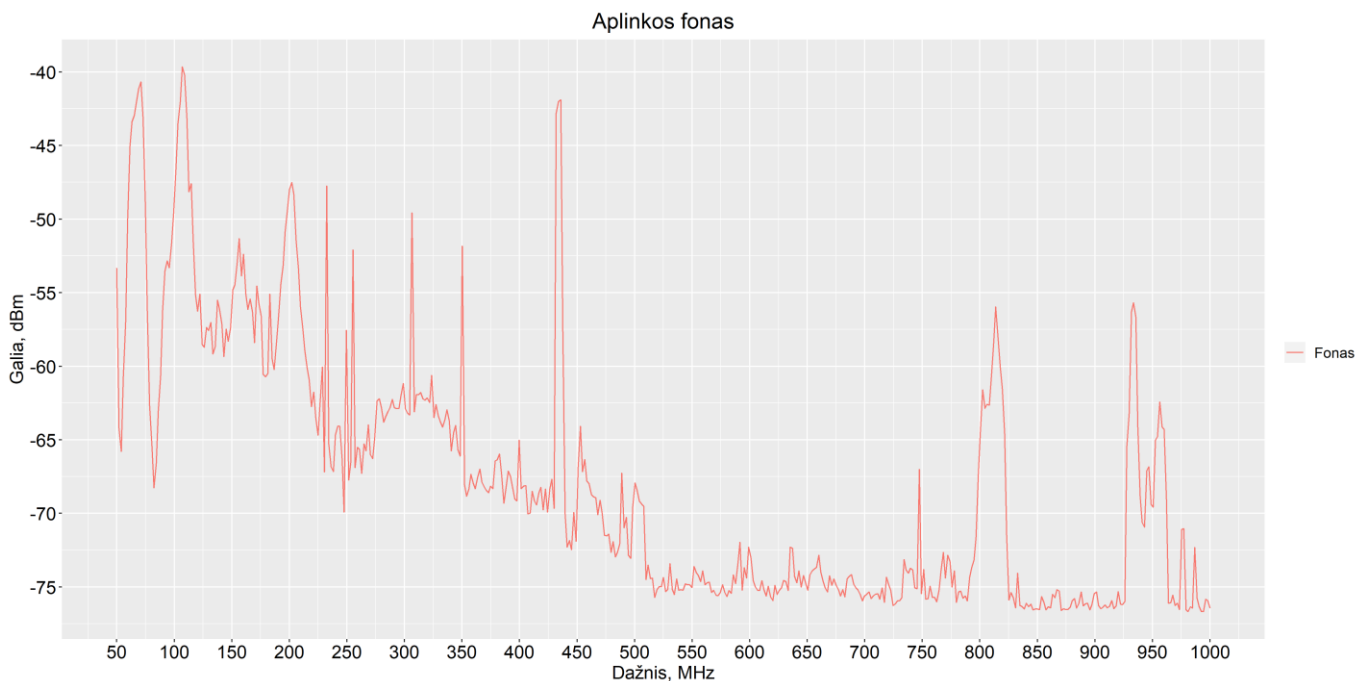
**2 lentelė.** Doble DFA 300 pagrindiniai parametrai

Įėjimo varža	$\Omega$	50
Dažnio diapazonas	MHz	50–1000
Tikslumas	kHz	$\pm 1000$ kHz
Identifikavimo būdas	–	Piko ir vidutinių impulsų
ADI jutiklio jungtis	–	BNC

Pažymėtina, kad prieš pradėdant darbą su matuokliu, būtina jį sukalibruoti. Patys pirmieji matavimai buvo skirti ne tikrinamojo objekto signalo gavimui, o prietaiso charakteristikų nustatymui, matavimo režimų, paklaidų įvertinimui, mastelio parinkimui [5].

### 3 Eksperimento eiga

Kaip jau buvo aptarta antrame skyriuje, tinkamai sukalibravus matuoklį pirmasis matavimas yra aplinkos įvertinimas. Toks matavimas yra pavaizduotas 19 paveiksle.



19 pav. Laboratorijos fonas

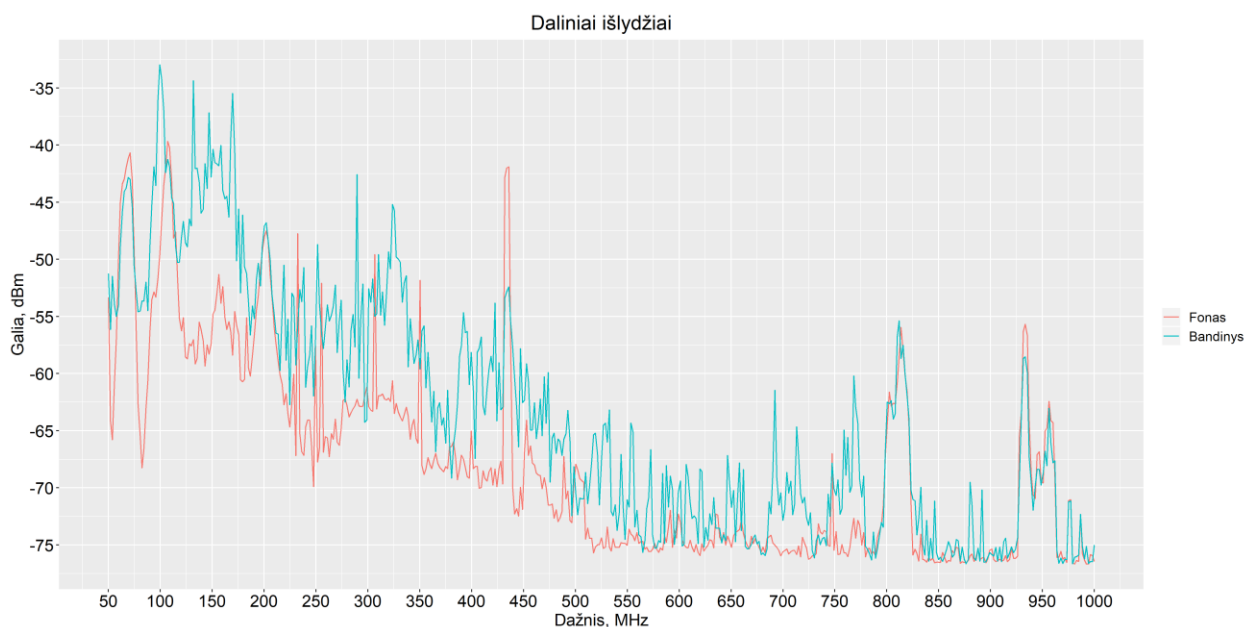
Akivaizdu, kad bandymų laboratorijoje aplinka nėra visiškai rami. Nuo 50 MHz 500 MHz matomas mažėjantis, tačiau pakankamai aktyvus aplinkos triukšmas. Tik nuo 0,5 GHz fonas šiek tiek nusistovi, nors keletas pikų prie 750 MHz, 825 MHz ir 935 MHz matosi tikrai aiškiai.

#### 3.1 Tiriamojo objekto kurio defekto skersmuo 0,5 mm bandymų rezultatai

Tam, kad žiūrint į paveikslus, būtų galima vizualiai interpretuoti jame esančius duomenis, visi su Doble DFA 300 matuokliu atlikti tiriamojo objekto matavimai pateikti vienoje koordinatinių sistemoje kartu su aplinkos fonu. Čia įtampa paveikta plokštelė su 0,5 mm skersmens defektu

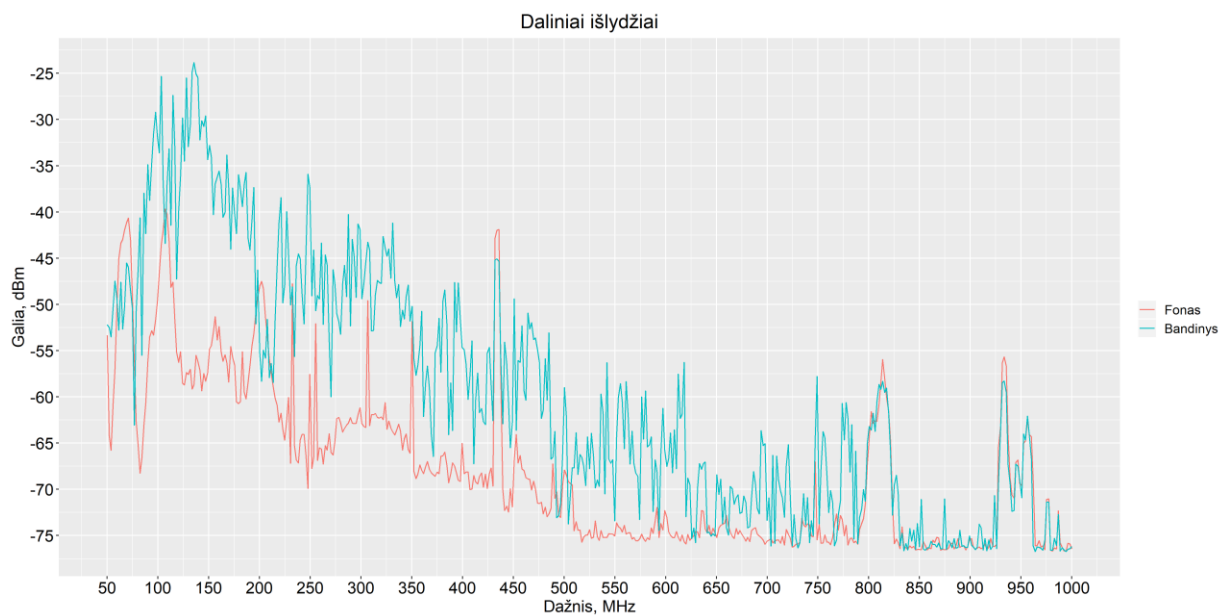
##### 3.1.1 Bandymai su 10 kV įtampa

Matyti, kad plokštelės duomenys, nemažoje dažnio matavimo dalyje, visiškai sutampa su fonu: 50–100 MHz tarpe, taip pat nuo maždaug 775 iki 1000 MHz. Tačiau 125–180 MHz dažnio juostoje plokštelės signalas šiek tiek sustiprėja ir pralenkia foną  $\approx 10$  dBm.



**20 pav.** Plokštelės su 1 mm storio ir 0,5 mm skersmens defektu paveiktos 10 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai

21 paveiksle tiriant 2 mm defekto storio, plokštelę, ta pačia, 10 kV įtampa, matyti, kad tendencijos vyrauja panašios kaip ir aukščiau aptartame paveiksle. Aukšto dažnio impulsų svyravimai, 50 – 100 MHz dažnio ruože beveik sutampa su fonu, kaip ir dažnio diapazone nuo 775 MHz iki 1000 MHz. Skirtumas lyginant su 1 mm storio defektu plokštelėje, yra nuo 100 iki 775 MHz. Šioje vietoje esant 2 mm dydžio izoliacijos gedimui signalo svyravimai šiek tiek labiau pakelti galios ašyje.

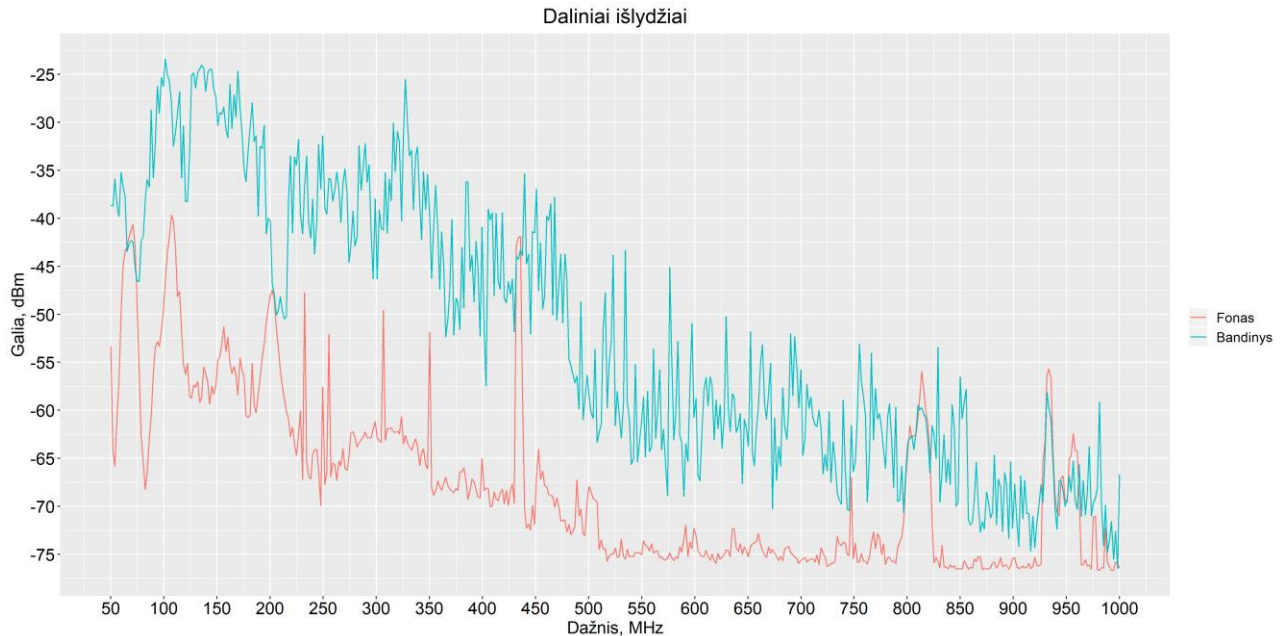


**21 pav.** Plokštelės su 2 mm storio ir 0,5 mm skersmens defektu paveiktos 10 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai

### 3.1.2 Bandymai su 20 kV įtampa

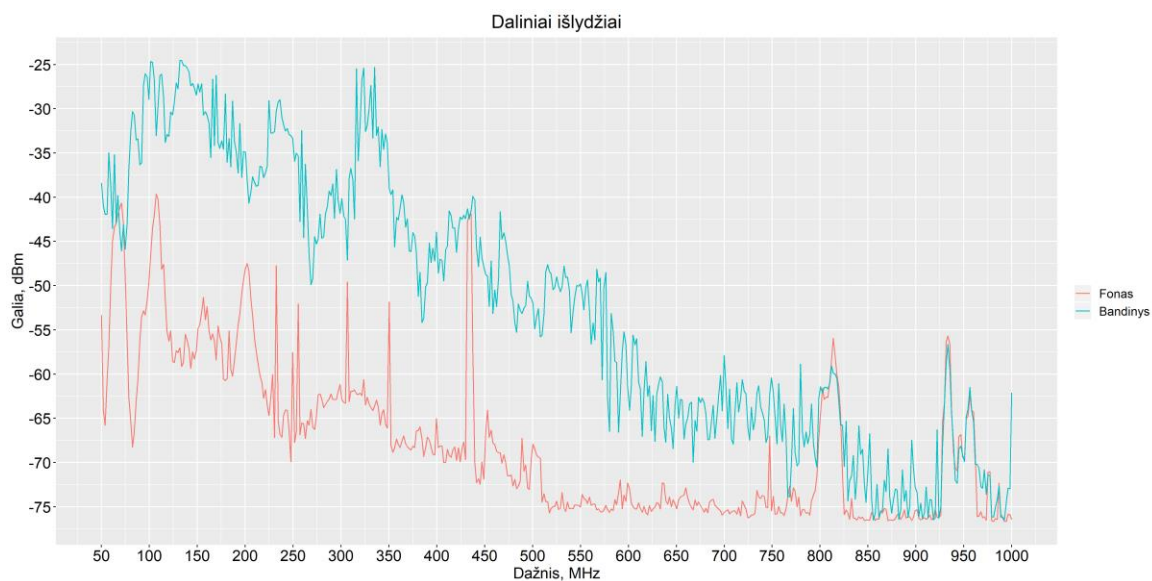
Tiriamąjį objektą, kuris buvo paveiktas 20 kV įtampa, sklaidžiami signalai yra pateikti 22 paveiksle. Čia laboratorijos fonas visame dažnio matavimo ruože yra gerokai žemiau mėginio duomenų. Taip yra todėl, kad bandymų laboratorijoje triukšmo galia yra silpnė nei aukšto dažnio impulsai, gauti veikiant plokštelę 20 kV įtampa.

Lyginant foną ir mėginio duomenis pastebima, kad 100 – 150 MHz dažnio diapazone svyravimai savo forma šiek tiek skiriasi nuo fono. Pikas šioje vietoje yra –25 dBm ir jis taip greit nesileidžia, kaip laboratorijos aplinkos signalas.



**22 pav.** Plokštelės su 1 mm storio ir 0,5 mm skersmens defektu paveiktos 20 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai

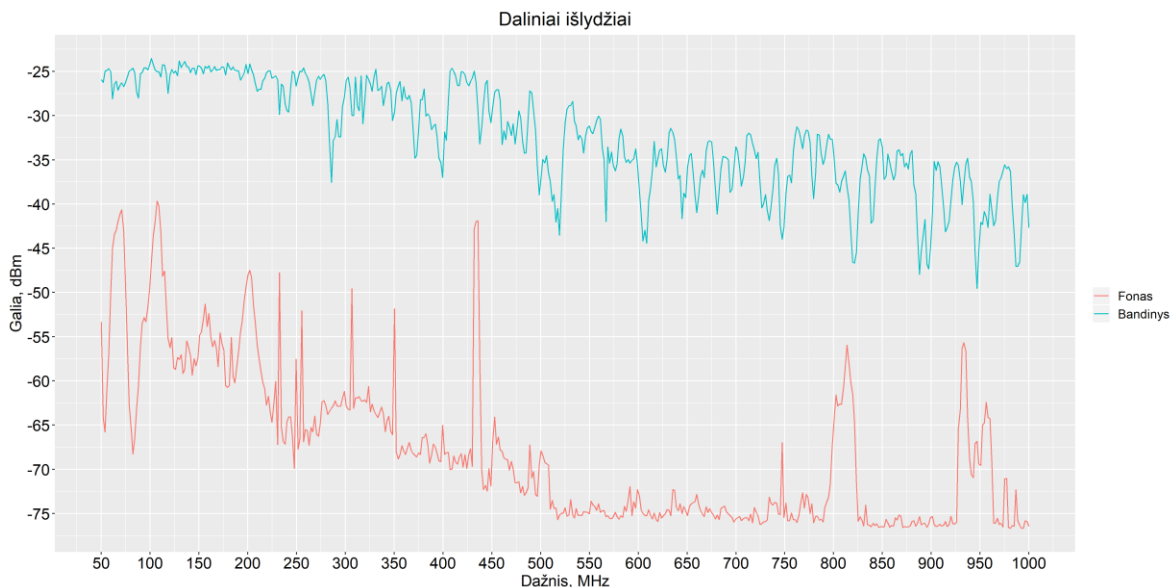
Tokia pačia įtampa veikiant 2 mm defekto dydžio plokštelę išryškėja dar keletas dažnio sričių, kur mėginio aukšto dažnio impulsų signalas neatrodo panašus į laboratorijos aplinką. 23 paveiksle aiškiai matosi 100 – 150 MHz dažnio ruože esantis ilgiau besitęsiantis pikas (kaip ir 1 mm defekto storio plokštelei), atsirado galios pakilimai 200 – 230 MHz ir 300 – 350 MHz diapazonuose, kurie taip pat apima platesnę dažnio juostą, nei fone.



**23 pav.** Plokštelės su 2 mm storio ir 0,5 mm skersmens defektu paveiktos 20 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai

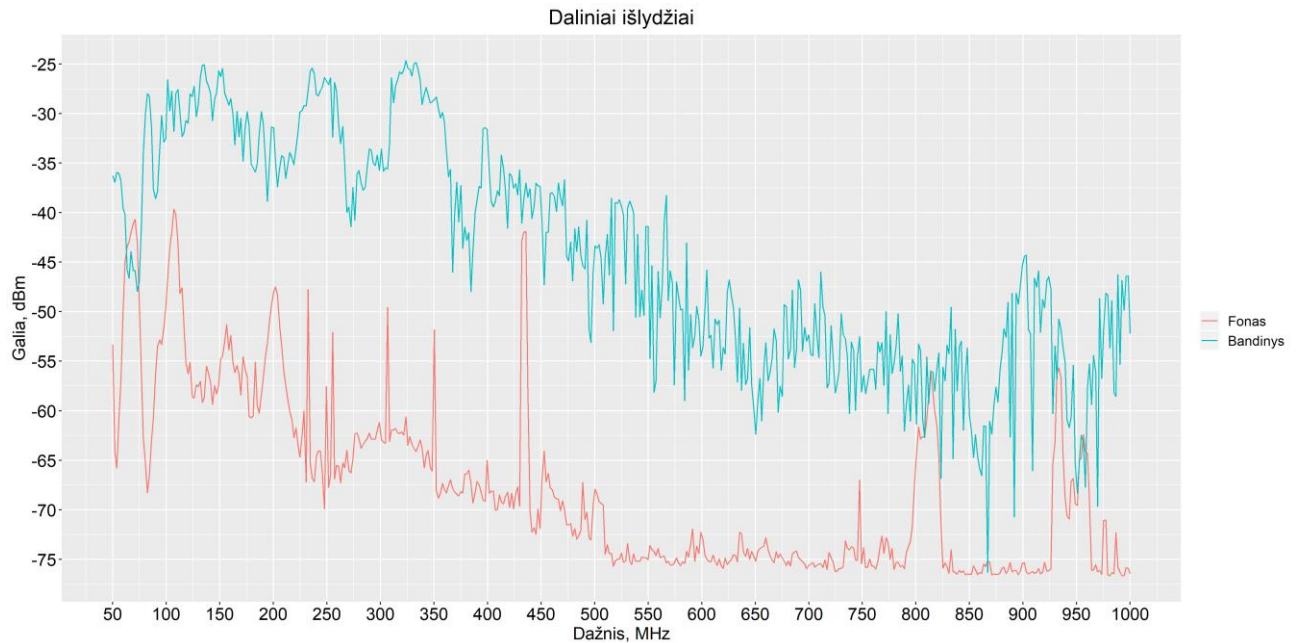
### 3.1.3 Bandymai su 30 kV įtampa

Bandant mėginį su 1 mm storio defektu 30 kV įtampa, gautas šiek tiek kitoks rezultatas nei prieš tai pateiktuose pavyzdžiuose. Vietose, kuriose buvo galima išvelgti tiriamojo objekto duomenų neatitikimą su fonu (100 – 150 MHz, 200 – 230 MHz, 300 – 350 MHz) naudojant 10 ir 20 kV vertės įtampas, dabar praktiškai neišsiskiria (24 pav.). Veikiant 30 kV įtampai, mėginio aukšto dažnio impulsai reikšmingai skiriasi nuo fono visame matuojamame dažnyje.



**24 pav.** Plokštelės su 1 mm storio ir 0,5 mm skersmens defektu paveiktos 30 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai

Veikiant plokštelę, kurios defekto dydis yra 2 mm, išryškėja ne tik jau aptarti prie 10 ir 20 kV įtampų dažnio diapazonai (100 – 150 MHz, 200 – 230 MHz, 300 – 350 MHz), bet ir 875 – 1000 MHz intervalas, kuriame fono ir mėginio svyravimų skirtumas yra akivaizdžiai matomas.



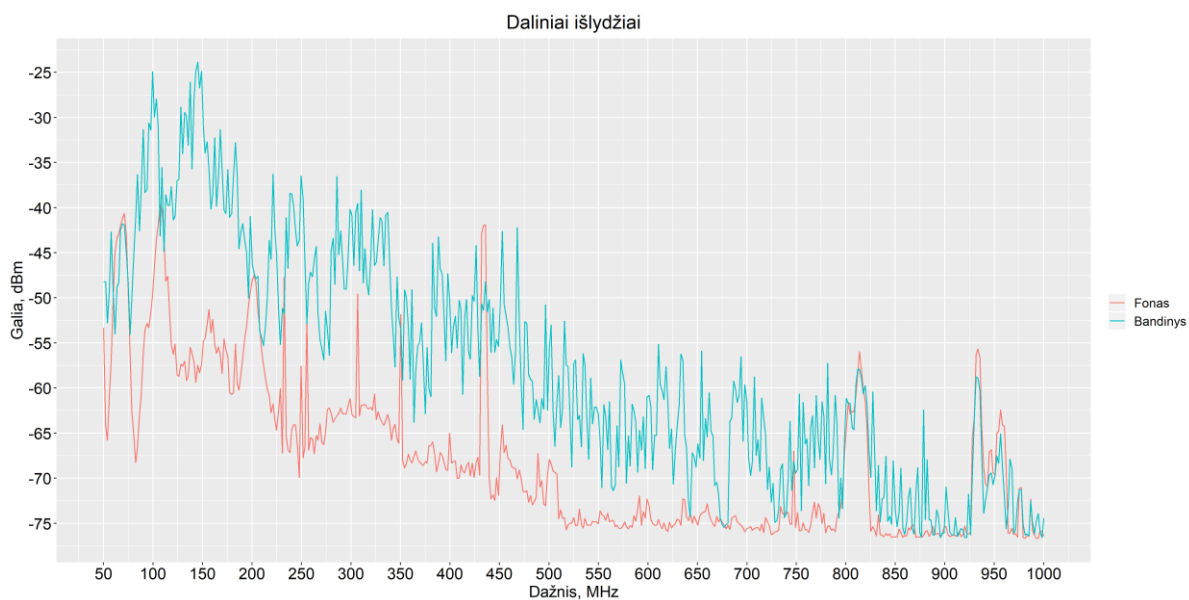
**25 pav.** Plokštelės su 2 mm storio ir 0,5 mm skersmens defektu paveiktos 30 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai

### 3.2 Tiriamojo objekto kurio defekto skersmuo 1 mm bandymų rezultatai

Šis mėginys, kaip ir 0,5 mm defekto skersmens, veikiamas 3 lygių įtampa, o gauti rezultatai atspindės dalinių išlydžių įtaką mėginio signalui.

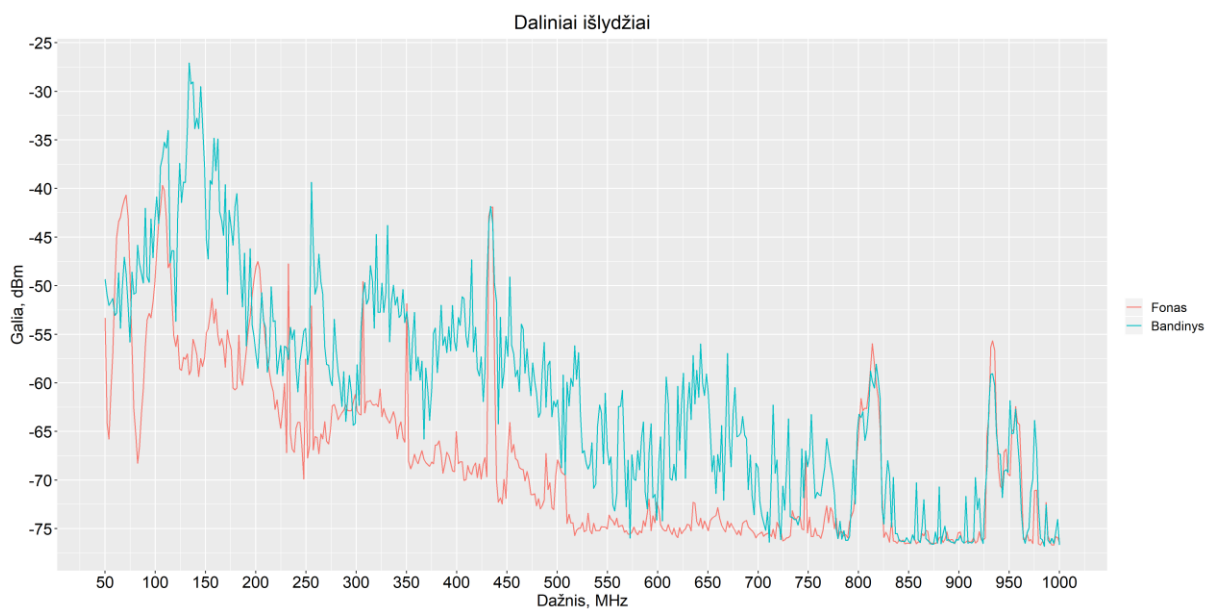
#### 3.2.1 Bandymai su 10 kV įtampa

Bandant plokštelę su dvigubai didesnio skersmens defektu nei 3.1 poskyryje aptartuose pavyzdžiuose, matosi panašios tendencijos. Tiriamąjį objektą veikiant 10 kV įtampa labiausiai išsiskiria 100 – 150 MHz dažnio ruožas. Šiame intervale (26 pav.) fonas nukrenta iki  $\approx -60$  dBm, o užfiksuoti aukšto dažnio impulsai sustiprėja iki  $(-30) - (-24)$  dBm. Toliau, kylant dažniui fono galia silpnėja kaip ir imituojamo defekto užfiksuoti svyravimai, kurie galiausiai susilygina su aplinka (925 – 1000 MHz).



**26 pav.** Plokštelės su 1 mm storio ir 1 mm skersmens defektu paveiktos 10 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai

Padidinus plokštelės defekto storį iki 2 mm ir pajungus 10 kV įtampą, reikšmingai besiskiriančių rezultatų nuo 26 pav. aptarto grafiko gauti nepavyksta. Akivaizdu, kad didžiausia mėginio svyravimų amplitudė 100 – 150 MHz intervale sumažėjo iki  $\approx 27$  dBm. Toliau, augant dažniui tiek fono, tiek mėginio svyravimų galia krenta, kol  $\approx 900$  MHz šie signalai pasidaro praktiškai lygūs.

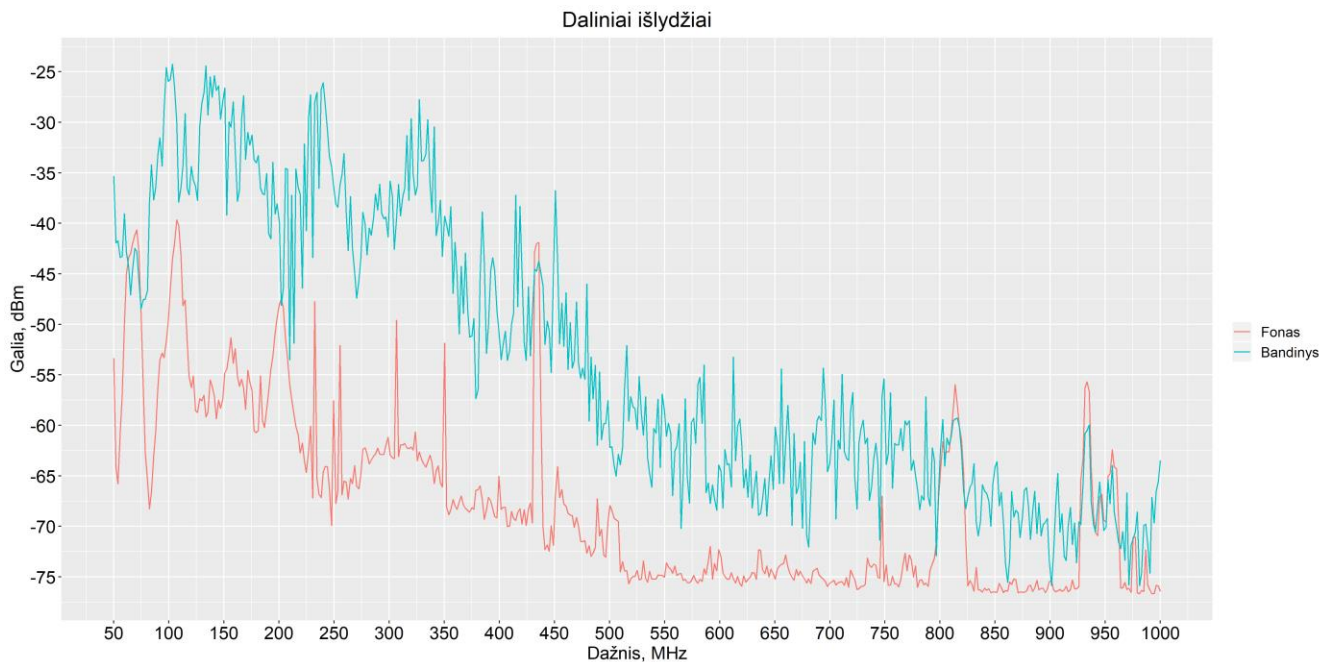


**27 pav.** Plokštelės su 2 mm storio ir 1 mm skersmens defektu paveiktos 10 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai

### 3.2.2 Bandymai su 20 kV įtampa

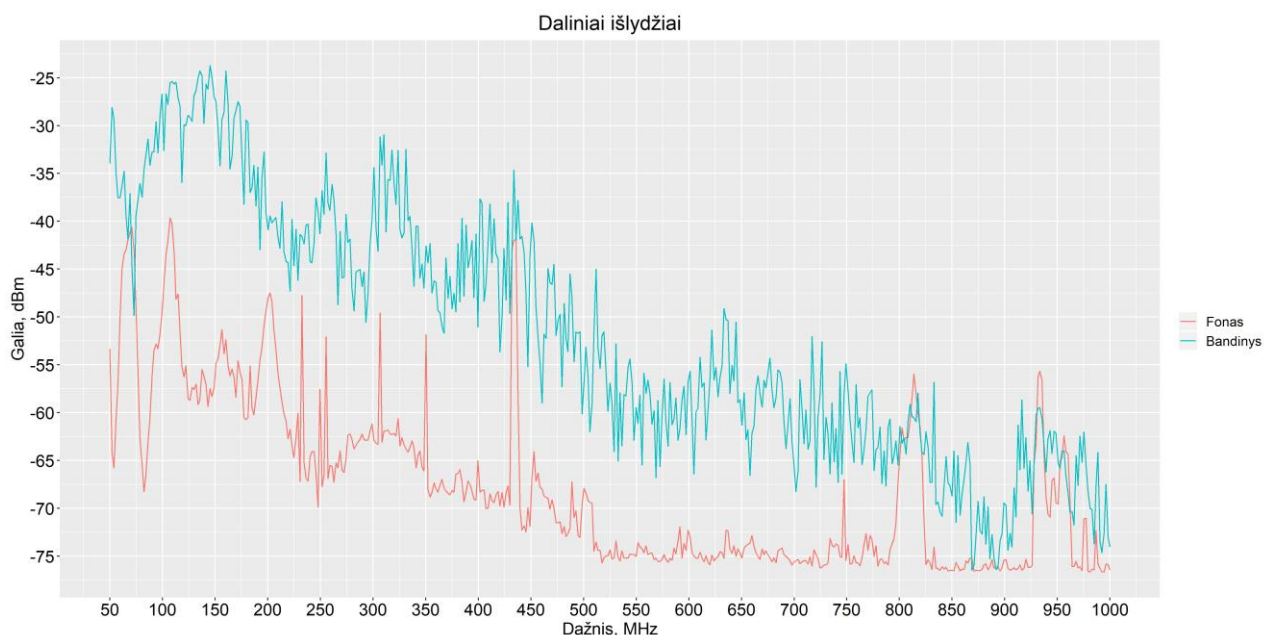
Pakėlus įtampą iki 20 kV, tiriamam objektui pasireiškia izoliacijos pažeidimų pikai kurių pakilimai nenukrenta taip greitai kaip fono. Pavyzdžiui bandinio kreivėje 100 – 150 MHz intervale matomi du pakilimai, kurie nėra kaip vienas „spyglys“, priešingai nei laboratorijos aplinkos matavime.

O dažniui didėjant, nors ir mėginio kreivė mažėja, ji vis tiek nepasiekia fono lygio, tik dvejose vietose svyravimai, nedideliame dažnio intervalui (25 – 50 MHz), sutampa su aplinkos įtaka ( ruožai nuo 800 iki 825 MHz ir 925 – 975 MHz).



**28 pav.** Plokštelės su 1 mm storio ir 1 mm skersmens defektu paveiktos 20 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai

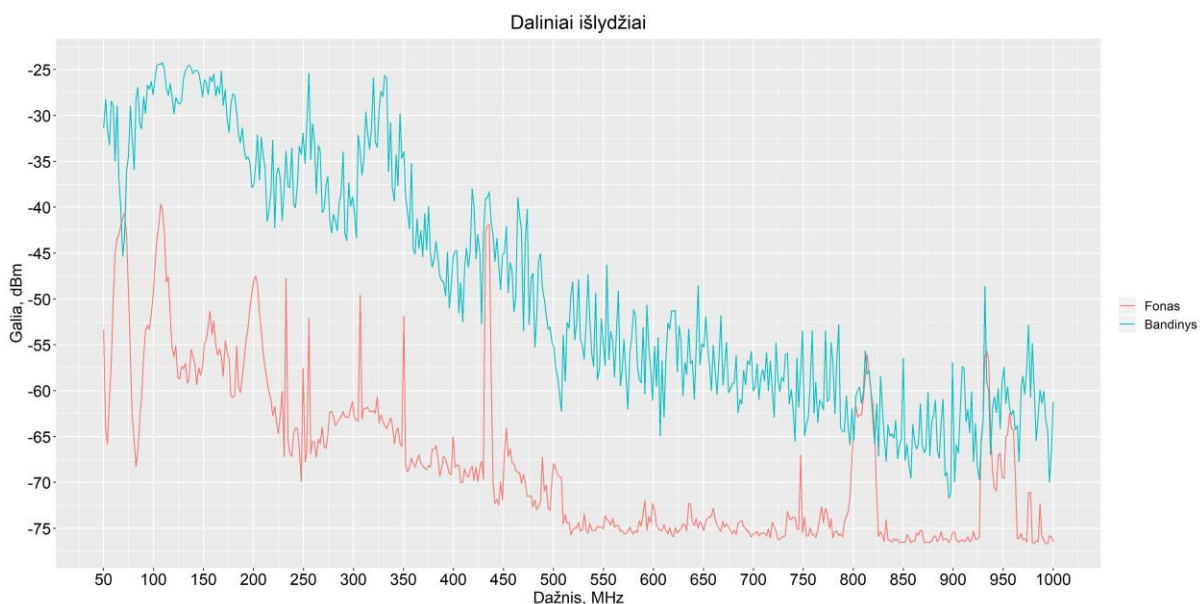
Tiriant mėginį su 2 mm dydžio defektu 20 kV įtampa, pastebimi keli bandinio kreivės neatitikimai su fonu. Pirmiausia tai kaip ir visuose ankstesniuose grafikuose matosi 100 – 150 MHz ruožas, su ilgiau besitęsiančiu piku. Taip pat bandinio aktyvumas pastebimas ir 600 – 675 MHz dažnio intervale.



**29 pav.** Plokštelės su 2 mm storio ir 1 mm skersmens defektu paveiktos 20 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai

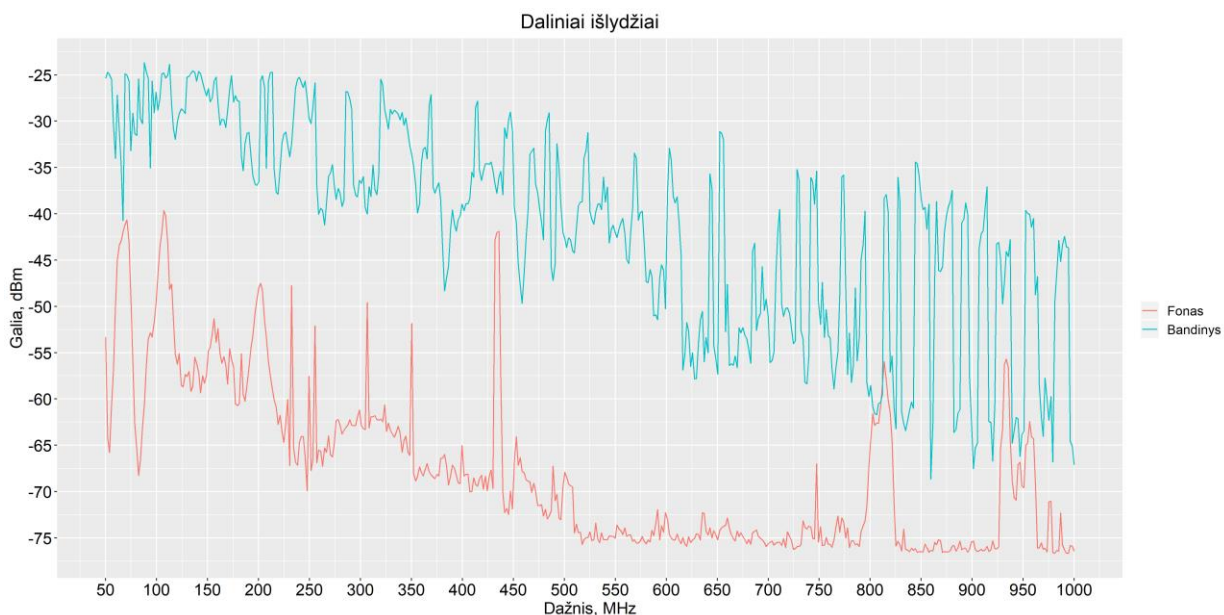
### 3.2.3 Bandymai su 30 kV įtampa

Tiriamąjį objektą su 1 mm skersmens defektu paveikus 30 kV įtampa (30 pav.), pastebimas labai išsiplėtęs pirmasis pikas. Ankstesniuose grafikuose jis matomas ties 100 – 150 MHz, o dabar jau 50 – 200 MHz. Tačiau didėjant dažniui anomalijos bandinio kreivėje mažėja. Matyti, kad svyravimai per likusį dažnį (200 – 1000 MHz) pasidaro panašesni į 20 kV įtampa veikiamo mėginio svyravimus (28 pav.).



**30 pav.** Plokštelės su 1 mm storio ir 1 mm skersmens defektu paveiktos 30 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai

Tačiau pakeitus plokštelę su 2 mm storio defektu, gaunamas panašus rezultatas, kaip ir 24 paveiksle, kur 0,5 mm defekto skersmens ir 1 mm storio plokštelė veikiama 30 kV įtampa. Tik šiuo atveju bandinio galios svyravimai yra gerokai didesnės amplitudės. Taip pat 31 pav. matoma, kad dažniui augant, svyravimų amplitudė taip pat didėja, o pikai siaurėja t. y. iki maždaug 500 MHz piko ilgis yra 20–25 MHz, o esant > 500 MHz dažniui, svyravimų periodas sumažėja.



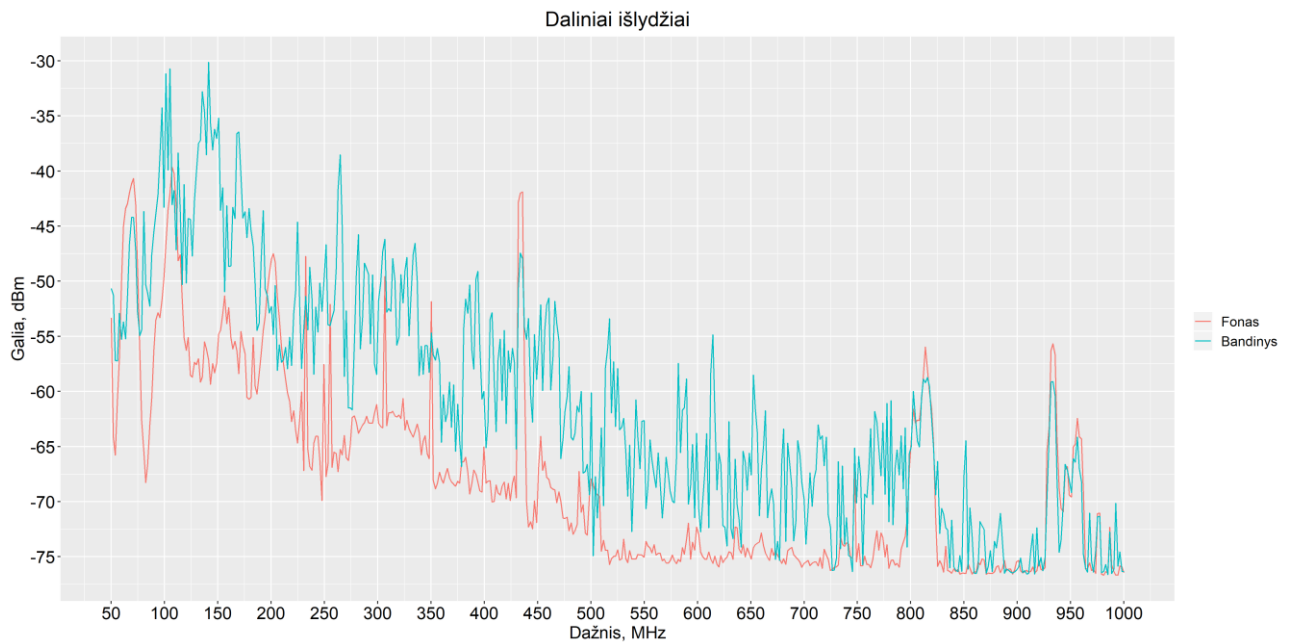
**31 pav.** Plokštelės su 2 mm storio ir 1 mm skersmens defektu paveiktos 30 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai

### 3.3 Tiriamojo objekto kurio defekto skersmuo 2 mm bandymų rezultatai

Šiame poskyryje tiriama didžiausio skersmens izoliacijos defektą turintys tiriamieji objektai. Matavimų duomenys pateikti eksperimentiniame modelyje naudojant 1 mm ir 2 mm gedimo storio mėginius.

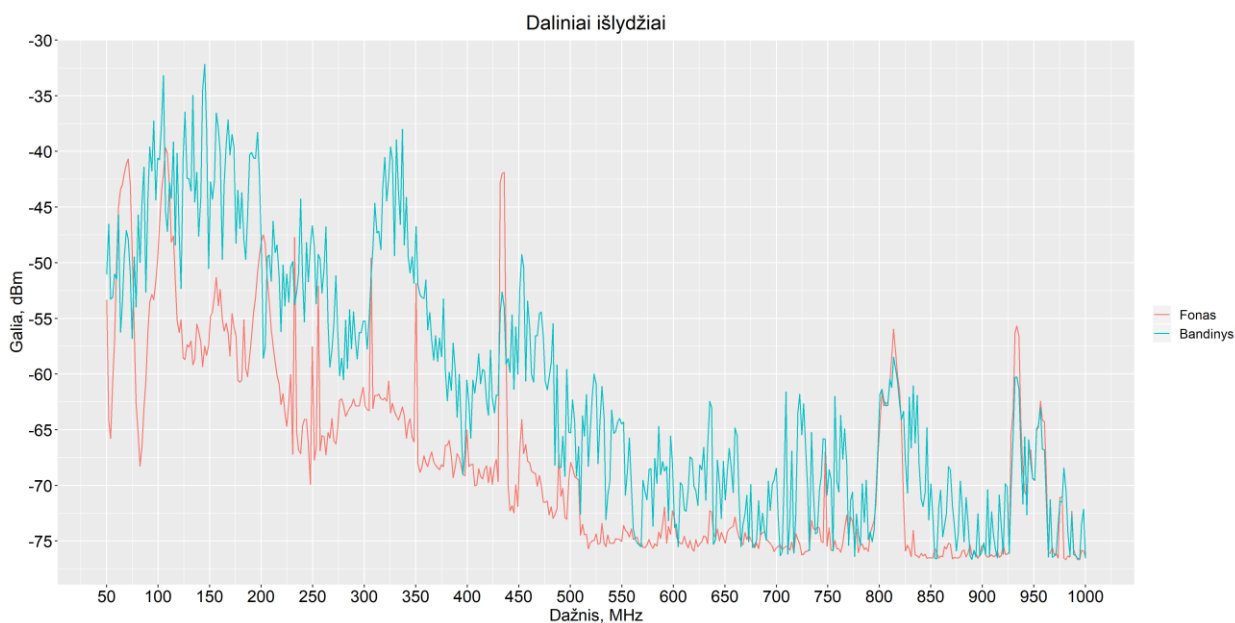
#### 3.3.1 Bandymai su 10 kV įtampa

Kaip ir ankstesniuose pavyzdžiuose, kur bandomos plokštelės veikiamos 10 kV įtampa, taip ir šiame matavime didelių nukrypimų nuo fono, bandinio duomenyse, pastebėti negalima. Išlieka tas pats 100 – 150 MHz dažnio intervalas, kuriame mėginio svyravimai šiek tiek skiriasi nuo fono: fonas yra  $\approx -55$  dBm, o tiriamojo objekto pikas toje pačioje vietoje  $\approx -38$  dBm. Ir tai vienintelis aiškiai matomas šių kreivių nesutapimas. Toliau dažniui didėjant, bandinio duomenys panašėja į foną kaip pateikta 32 pav.



**32 pav.** Plokštelės su 1 mm storio ir 2 mm skersmens defektu paveiktos 10 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai

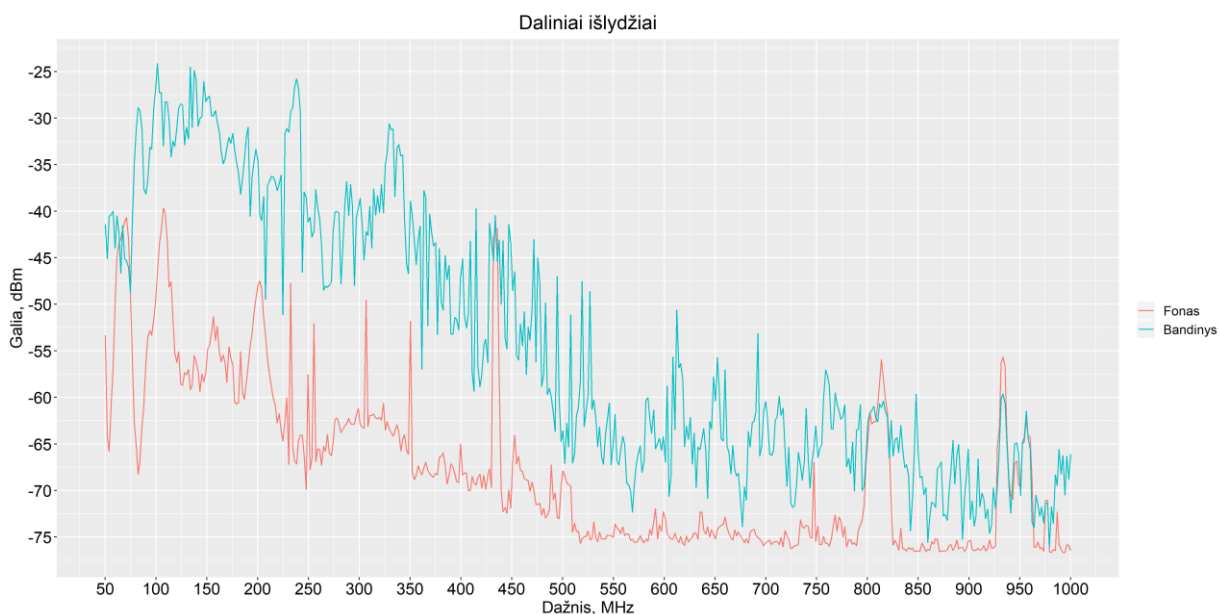
Padidinus defekto dydį iki 2 mm, bandinio duomenys vis dar išlieka labai panašūs į laboratorijos foną (žr. pav. Nr. 33). Nors keletas nesutapimų vis tik matosi. Tai 100 – 200 MHz bei 300 – 400 MHz intervalai, kurių ankstesniame matavime nebuvo. Tačiau toliau augant dažniui, matoma, kad bandymas praktiškai nesiskiria nuo visų jau aptartų tyrimų su 10 kV įtampa.



**33 pav.** Plokštelės su 2 mm storio ir 2 mm skersmens defektu paveiktos 10 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai

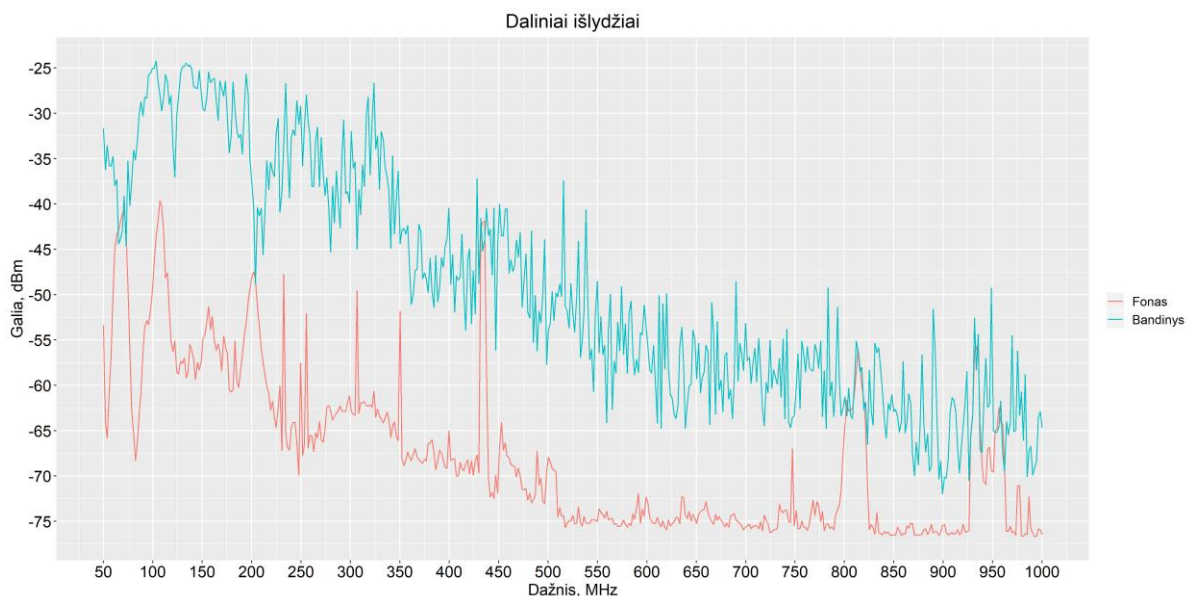
### 3.3.2 Bandymai su 20 kV įtampa

Tiriamąjį objektą paveikus 20 kV įtampa, lyginant su 32, 33 pav. pailgėja pirmasis pikas, kuriame užfiksuotų aukšto dažnio impulsų maksimali galios reikšmė ženkliai skiriasi nuo fono. Minėtuose paveiksluose šis nesutapimas yra 100 – 150, 100 – 200 MHz dažnio juostos, o pajungus bandomąją įtampą į mėginį su 1 mm storio ir 2 mm skersmens defektu, kaip matosi 34 paveiksle, nesutapimai prasideda jau nuo 75 MHz ir tęsiasi iki 200 MHz. Pažymėtina ir tai, kad nuo 550 – 800 MHz intervalas taip pat vyrauja galios svyravimai, kurių fono kreivėje nėra.



**34 pav.** Plokštelės su 1 mm storio ir 2 mm skersmens defektu paveiktos 20 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai

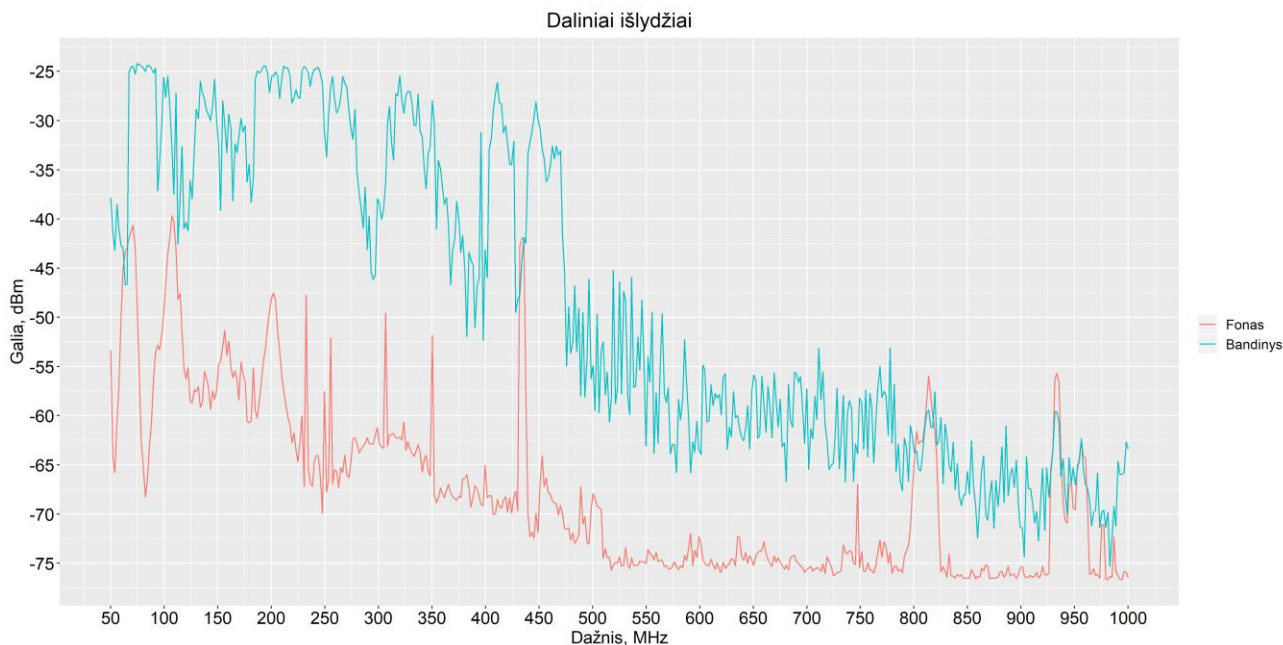
Kai 1 mm storio izoliacijos gedimas buvo pakeistas į 2 mm dydžio ir paveiktas 20 kV įtampa, pastebima, kad pirmajame dažnio intervale (100 – 200 MHz), kuris yra mažesnis nei su 1 mm storio defektu, mėginio galia tarsi šiek tiek nusistovi prie  $-25$  dBm, ko negalima pastebėti 34 paveiksle. Taip pat suvienodėjo svyravimai esantys intervale nuo 550 iki 800 MHz ir neliko tokio aiškaus skirtumo su fonu kaip aukščiau pateiktame pavyzdyje.



**35 pav.** Plokštelės su 2 mm storio ir 2 mm skersmens defektu paveiktos 20 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai

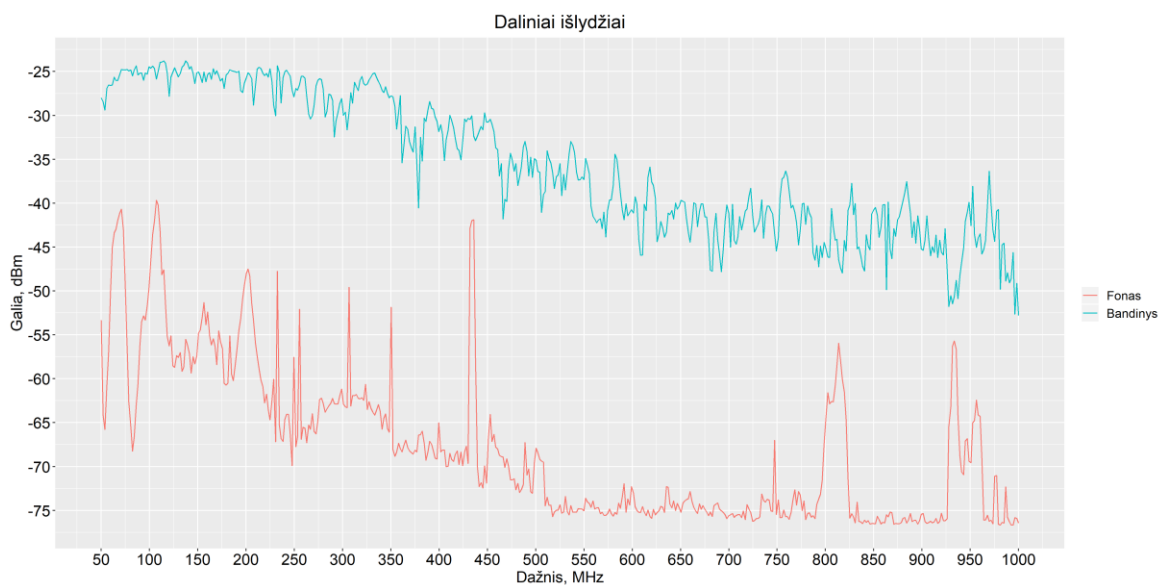
### 3.3.3 Bandymai su 30 kV įtampa

Kai įtampa buvo pakelta iki 30 kV mėginiui su 1 mm storio defektu, bandinio kreivė labai aiškiai pradėjo skirtis nuo fono. Iki 0,475 GHz dažnio galima pastebėti 6 didelius mėginio signalo galios padidėjimus, o du iš jų esantys 50 – 100 MHz ir 175 – 275 MHz dažnio juostoje praktiškai nusistovi esant –25 dBm galiai. Tačiau, nuo 475 iki 1000 MHz, kaip rodo 36 pav., plokštelės aukšto dažnio impulsų kreivė panašėja į foną. Nors ir yra šiek tiek aukščiau jos, tačiau tendencijos gana panašios.



**36 pav.** Plokštelės su 1 mm storio ir 2 mm skersmens defektu paveiktos 30 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio

įtampa paveikus plokštelę su 2 mm dydžio gedimu, gauti visiškai kitokie rezultatai nei dauguma šiame poskyryje aptarti eksperimento atvejai. 37 paveiksle pateikti duomenys panašūs į tiriamojo objekto su 2 mm storio ir 1 mm skersmens izoliacijos gedimu, veikiamo 30 kV įtampa (žr. pav. Nr. 31) ir į mėginį su 1 mm storio bei 0,5 mm skersmens defektu paveikto taip pat 30 kV (pav. Nr. 24). Visuose šiuose atvejuose matomas signalo svyravimai visiškai nepanašūs fonu. Vienintelis sutapimas su laboratorijos aplinka tai mėginio signalo galios mažėjimo tendencija.



**37 pav.** Plokštelės su 2 mm storio ir 2 mm skersmens defektu paveiktos 30 kV įtampa užfiksuoti aukšto dažnio impulsai

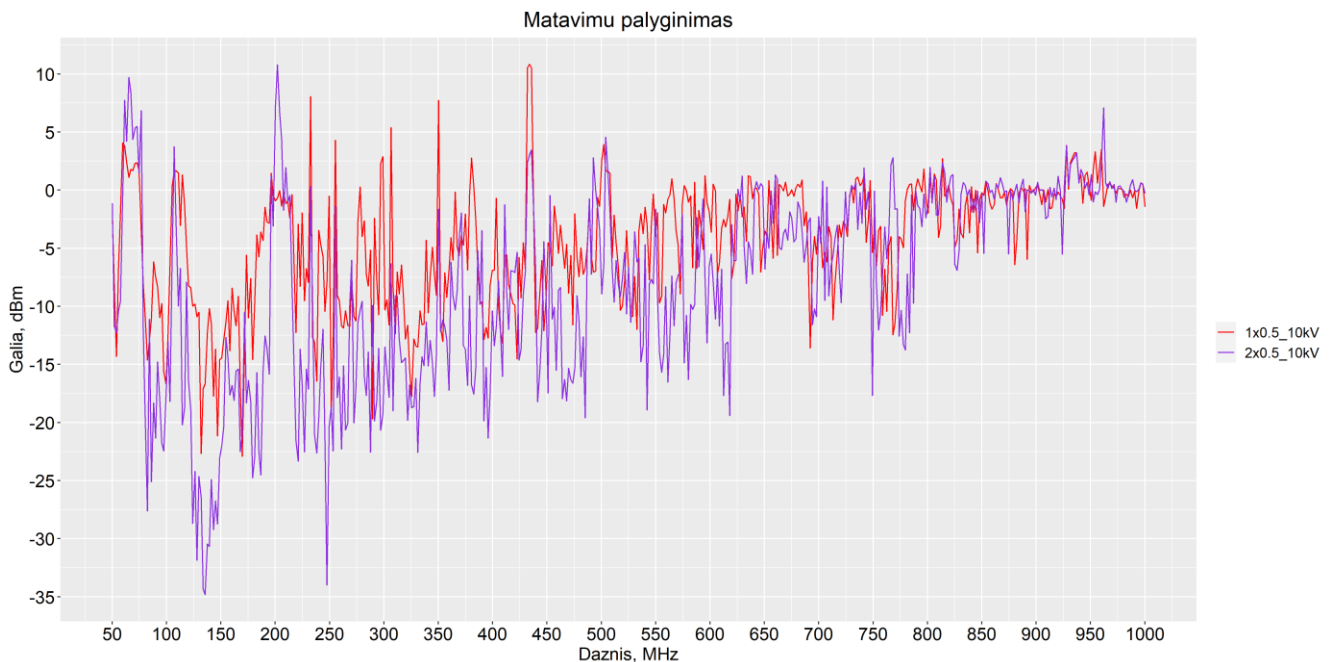
Taigi, apžvelgus visus šiame skyriuje su Doble DFA 300 užfiksuotus matavimus, matyti, kad veikiant 10 kV įtampai, nepriklausomai nuo imituojamo izoliacijos gedimo dydžio ar skersmens mėginio kreivė išlieka panaši į foną. Padidinus įtampą iki 20 kV ryškėja pikai, kurie aiškiai skiriasi nuo fono, o didinant defekto parametrus, signalo sustiprėjimai matuojamame dažnyje ilgėja. Veikiant 30 kV įtampai, tiriamojo objekto signalas dalyje dažnio arba visame 1 GHz intervale išlieka visiškai nepanašus į foną. Tokius iškraipymus lemia aktyvus dalinių išlydžių pasireiškimas.

## 4 Eksperimente imituojamo defekto identifikavimas

Iš tyrimo metu gautų rezultatų, kurie aprašyti 3 skyriuje daryti išvadas apie izoliacijos būklę yra ganėtinai sudėtinga. Tam, kad būtų galima nustatyti, kokio pobūdžio dalinių išlydžių lygis vyrauja mėginiuose, esant skirtingiems izoliacijos defekto parametrams, iš duomenų reikia likviduoti laboratorijos aplinkos įtaką.

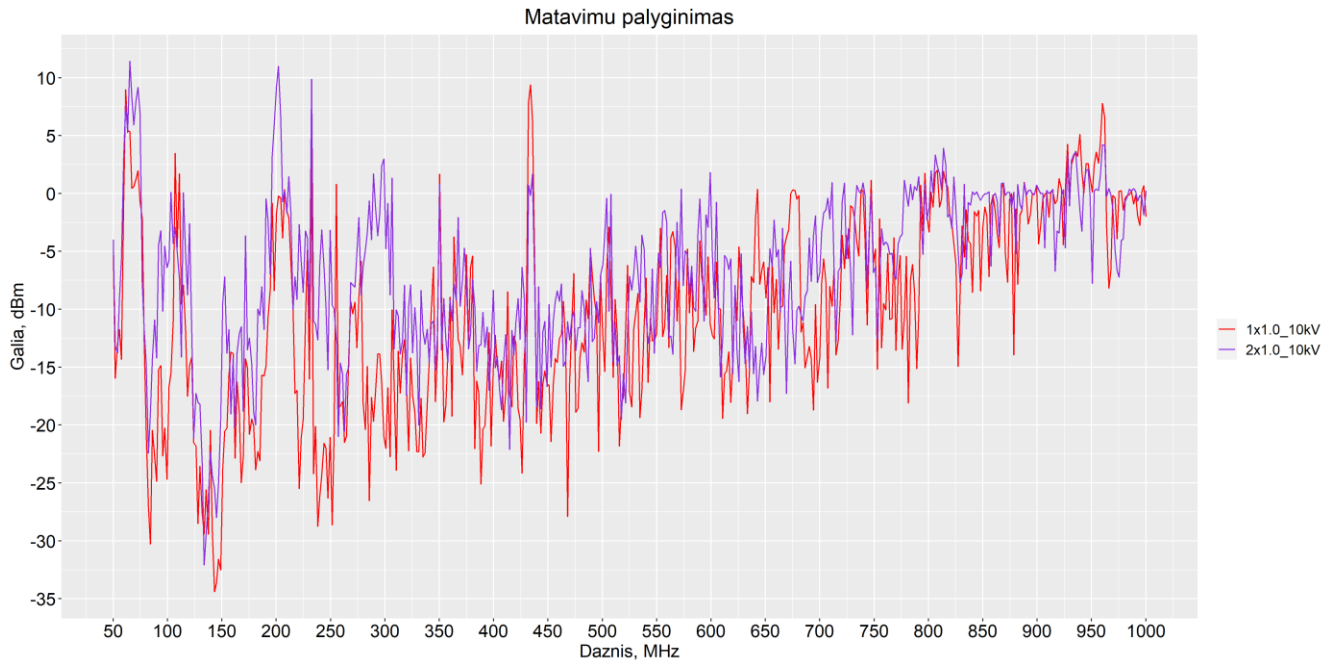
### 4.1 Defekto atpažinimas veikiant 10 kV įtampai

Pažymėtina, kad pajungus 10 kV įtampą į tiriamąjį objektą su 0,5 mm skersmens defektu, nėra didelio skirtumo ar mėginys sudarytas iš 4 ar 3 elektrotechninio kartotino sluoksnių. Abejų kreivių dalinių išlydžių dažninės charakteristikos (38 pav.) labai panašios. Jos pasižymi dideliais galios pokyčiais nuo 0 iki 350 MHz, bei 675 – 800 MHz intervaluose. Būtent šie dažnio ruožai identifikuoja esamą izoliacijos gedimą.



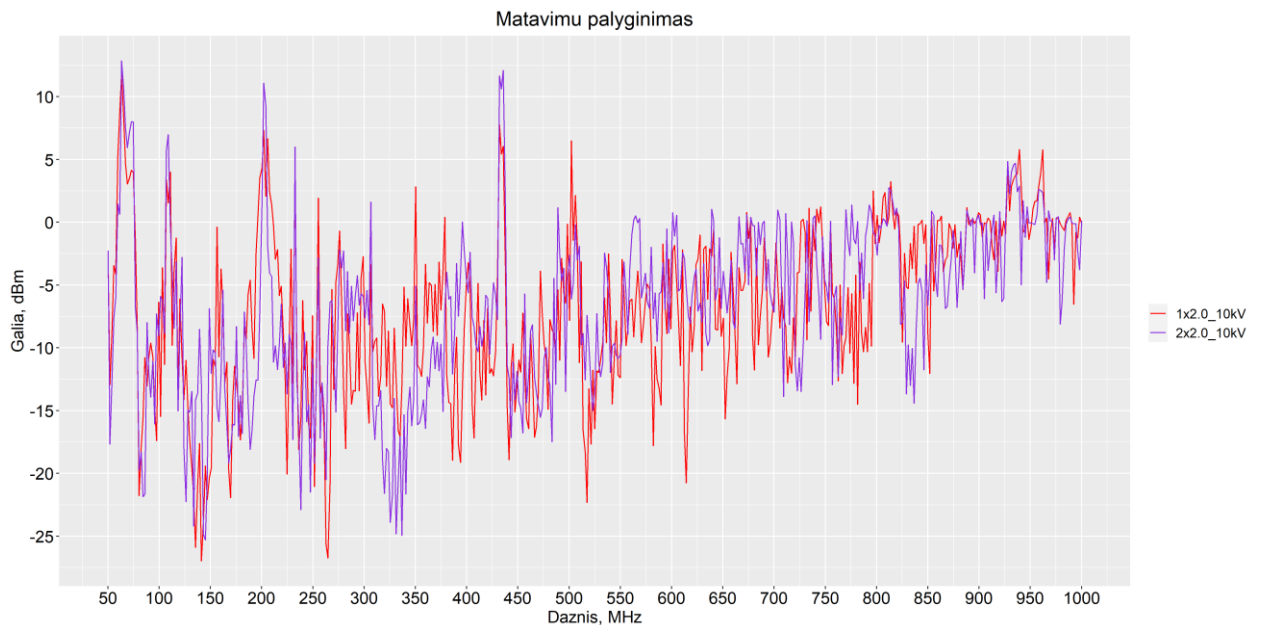
**38 pav.** Plokštelių su 1 ir 2 mm storio bei 0,5 mm skersmens defektu palyginimas, veikiant 10 kV įtampa

Padidinus bandomos dielektrinės plokštelės defekto skersmenį iki 1 mm pastebima, kad didesnės galios svyravimai gauti veikiant 2 mm gedimo storio plokštelę (violetinė kreivė), kai 38 pav. priešingai – daliniai išlydžiai stipresnis 1 mm dydžio gedime (raudona kreivė). Tačiau kaip ir ankstesniame atvejyje, imituojamą gedimą atspindi abejos kreivės.



**39 pav.** Plokštelių su 1 ir 2 mm storio bei 1 mm skersmens defektu palyginimas, veikiant 10 kV įtampa

Kai tiriamajame objekte imituojamo izoliacijos gedimo skersmuo padidinamas iki 2 mm, nebegalima išskirti, kokio storio defekte (1 ar 2 mm) vyrauja didžiausi daliniai išlydžiai. Tiek 1 mm, tiek 2 mm storio gedimuose labai panašios dalinių išlydžių tendencijos, kurios savo pobūdžiu nesiskiria nuo 0,5 ir 1 mm skersmens izoliacijos gedimų.

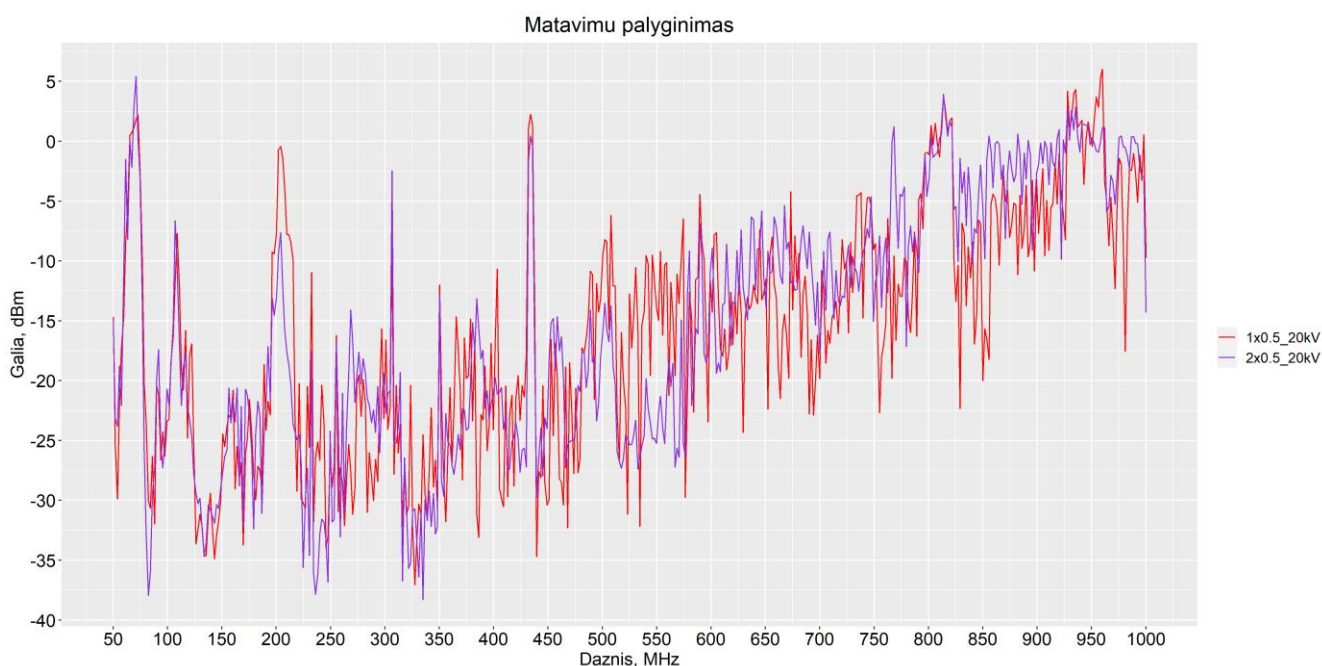


**40 pav.** Plokštelių su 1 ir 2 mm storio bei 2 mm skersmens defektu palyginimas, veikiant 10 kV įtampa

Taigi, visuose 10 kV bandymuose dalinių išlydžių galios pobūdis nuo 0 iki 350 MHz išduoda mėginio defektą. Tačiau pažymėtina, kad esant mažiausio skersmens izoliacijos gedimui daliniai išlydžiai aktyviausi buvo 1 mm storio gedime. Kai defekto skersmuo padidėja iki 1 mm, savaime gęstantys elektros lankai aktyviau rusena 2 mm storio gedime. O nuo 2 mm izoliacijos gedimo skersmens, jo storis nebeįtakoja dalinių išlydžių intensyvumo.

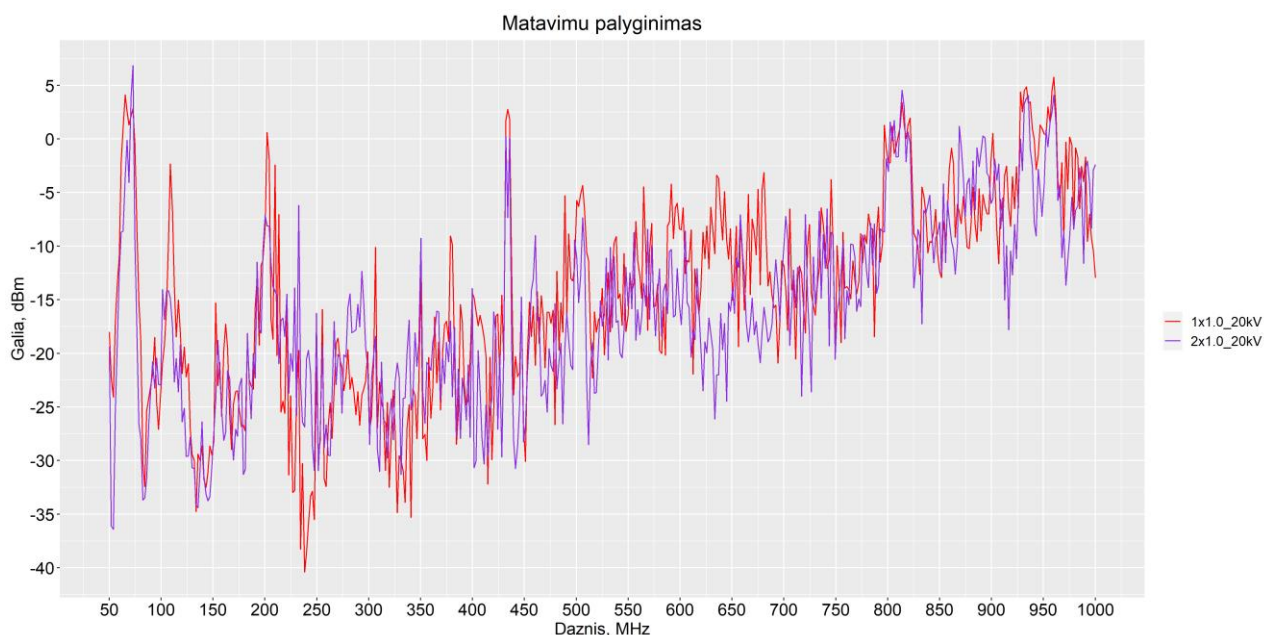
## 4.2 Defekto atpažinimas veikiant 20 kV įtampai

Padidinus įtampą iki 20 kV 0,5 mm skersmens defektui, gautos kreivės šiek tiek skiriasi nuo 38 – 41 paveiksluose pateiktų dalinių išlydžių charakteristikų. Akivaizdu, kad sumažėjo svyravimų amplitudė. Vietoje buvusių 10 dBm maksimumų dabar matomi tik 5 dBm pikai. Privalu paminėti ir tai, kad negalima išskirti kokio storio defekte daliniai išlydžiai stipresni, nes nebėra aiškaus skirtumo tarp jų. Taip pat nors ir iki 0,5 GHz matuojamo dažnio dalinių išlydžių galios svyravimų pobūdis išliko panašus kaip ir veikiant 10 kV, tačiau dažniui didėjant dalinių išlydžių galios vertė taip pat auga. Tai yra veikiamo įtampos lygio ir bandomo izoliacijos gedimo pasekmė, išduodanti imituojamą defektą.



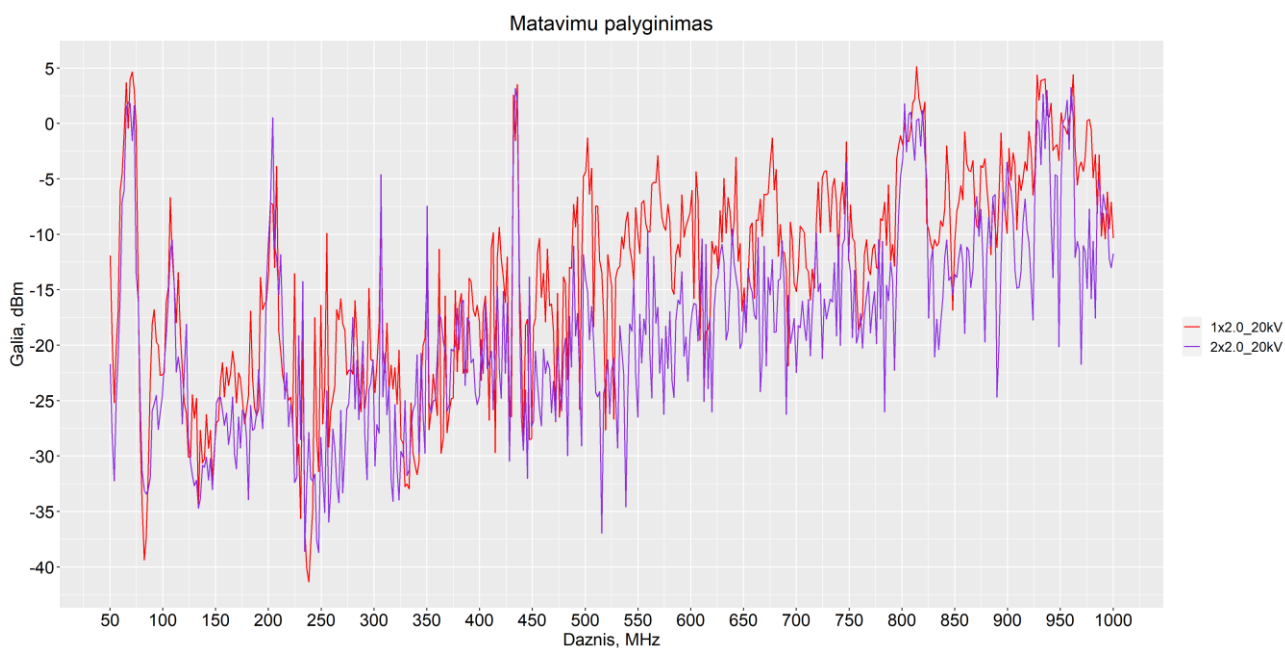
**41 pav.** Plokštelių su 1 ir 2 mm storio bei 0,5 mm skersmens defektu palyginimas, veikiant 20 kV įtampa

Kai imituojamas gedimas buvo padidintas dvigubai t. y. iki 1 mm skersmens, gautos trijų ir keturių sluoksnių plokštelių dalinių išlydžių kreivės, savo svyravimų forma, labiau panašios į tas kurios buvo gautos veikiant 10 kV įtampai. Nors negalima aiškiai išskirti kurio storio mėginiui dalinių išlydžių galia buvo didžiausia, bet galima pasakyti, kad gedimas, abejose kreivėse, aiškiai atsispindi 0,05 – 0,3 GHz dažnio intervale.



**42 pav.** Plokštelių su 1 ir 2 mm storio bei 1 mm skersmens defektu palyginimas, veikiant 20 kV įtampa

Padidinus mėginio defekto skersmenį iki 2 mm išryškėja, kad esant 1 mm storio gedimui, visame dažnio intervale daliniai išlydžiai yra stipresni nei plokštelėje su 2 mm storio gedimu.



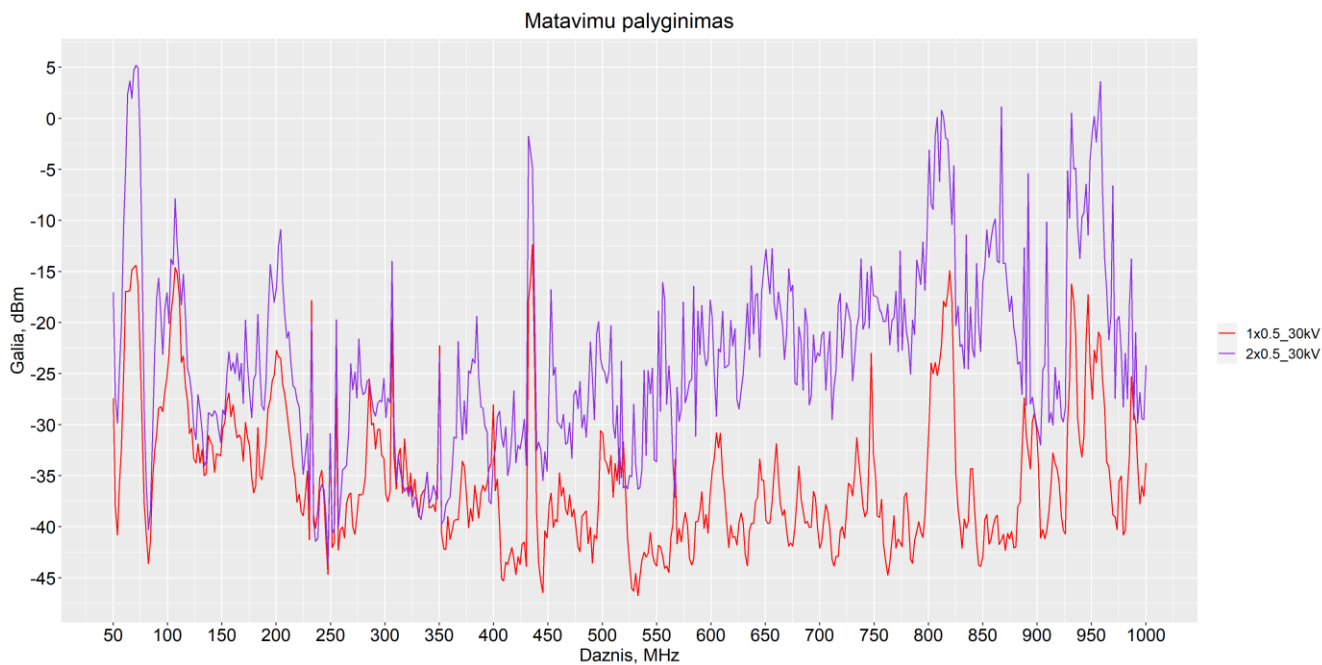
**43 pav.** Plokštelių su 1 ir 2 mm storio bei 2 mm skersmens defektu palyginimas, veikiant 20 kV įtampa

Apibendrinant bandymų su 20 kV rezultatus, būtina paminėti 0,05 – 0,5 GHz dažnio ruožą, kuris kaip ir 10 kV bandymuose išduoda imituojamą gedimą. Pažymėtina, kad keičiant izoliacijos gedimo parametrus nebėra tokio aiškaus skirtumo tarp jų storių. Būtina atkreipti dėmesį ir į tai, kad visi šio poskyrio bandymų

rezultatai rodo aiškią dalinių išlydžių, galios didėjimą dažnio juostoje nuo 0,5 iki 1 GHz. Tai taip pat izoliacijos gedimo sufleris.

### 4.3 Defekto atpažinimas veikiant 30 kV įtampai

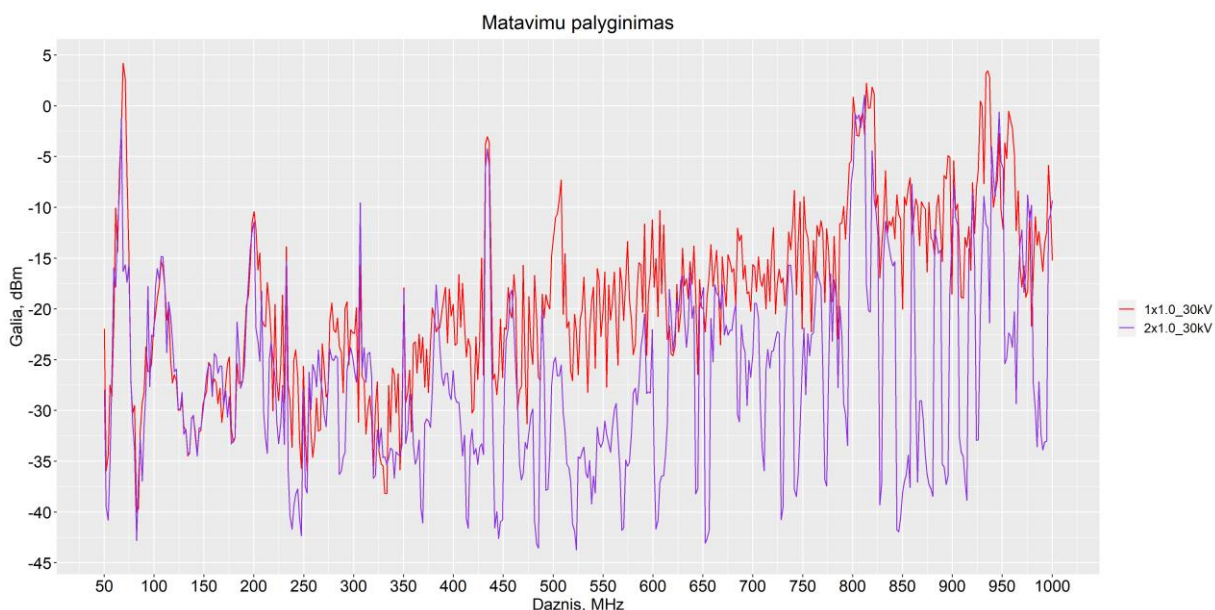
Kai eksperimente buvo naudota elektrotechninio popieriaus plokštelė su 0,5 mm skersmens skylute, veikiant 30 kV įtampai aiškiai atsiskyrė 1 ir 2 mm gedimų storis. Pažvelgus į trijų sluoksnių plokštelės dalinių išlydžių charakteristiką (raudona kreivė), matyti, kad visame matuojamame dažnyje jos galia yra mažesnės nei 2 mm gedimo storio (violetinė kreivė). Tačiau abejos charakteristikos nuo pat 50 iki 1000 MHz matomi dideli galios pokyčiai. Tai reiškia, kad bandomas izoliacijos gedimas aiškiai matomas visame dažnio intervale .



**44 pav.** Plokštelių su 1 ir 2 mm storio bei 0,5 mm skersmens defektu palyginimas, veikiant 30 kV įtampa

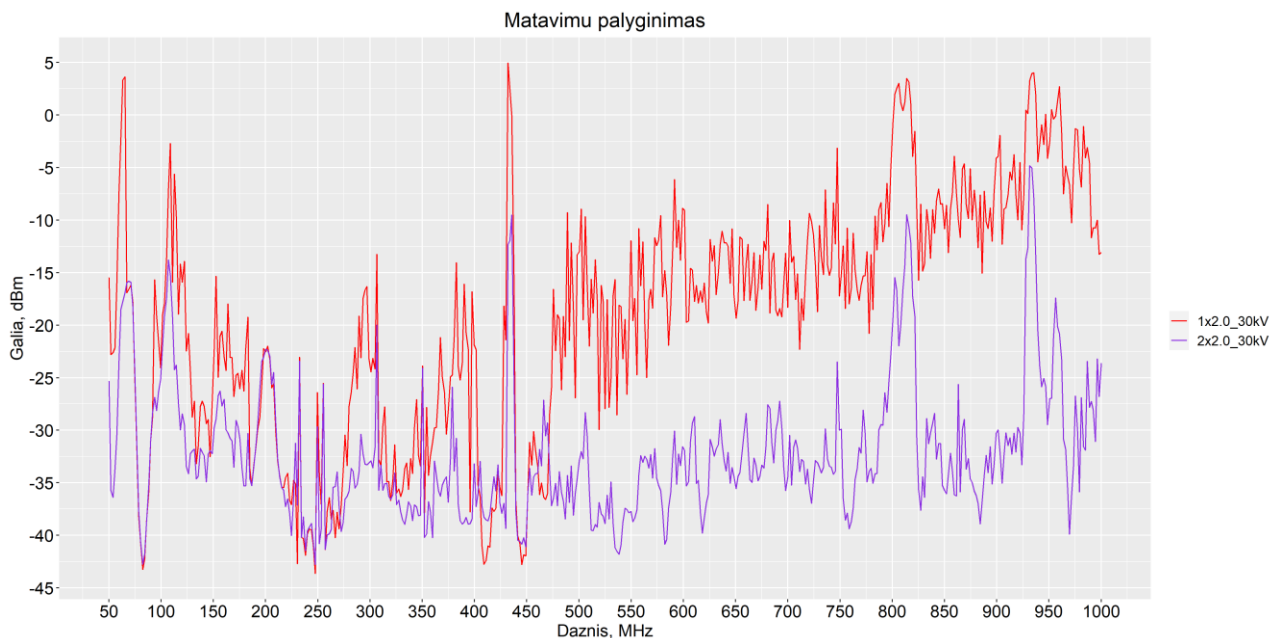
Padidinus defekto skersmenį iki 1 mm, plonesniame mėginyje daliniai išlydžiai pasidaro stipresni nei 4 sluoksnių plokštelėje. Taip pat ši kreivė savo svyravimų pobūdžiu labiau primena 20 kV bandymus, kai iki 0,5 GHz dažnio juostoje dar galima nustatyti gedimą, o 0,5 – 1 GHz intervale, dalinių išlydžių amplitudė slopsta, svyravimai mažėja ir gedimą identifikuoti darosi sudėtinga.

Tačiau visiškai kitoks dalinių išlydžių lygis vyrauja 2 mm storio gedime. Čia visame matuojamame intervale matomas galios svyravimų periodo mažėjimas ir amplitudės didėjimas. Tokio pobūdžio dalinių išlydžių kreivė užtikrintai nusako esamą gedimą izoliacijoje.



**45 pav.** Plokštelių su 1 ir 2 mm storio bei 1 mm skersmens defektu palyginimas, veikiant 30 kV įtampa

2 mm skersmens defektų dalinių išlydžių dažninės charakteristikos panašios į jau apratą atvejį 43 pav. Matomi galios svyravimai abejoms kreivėms aiškiai nusako izoliacijos defektą. Skirtumas lyginant su minėtu pavyzdžiu tas, kad esant 0,5 mm skersmeniui, daliniai išlydžiai aktyviai rusena 2 mm storio gedime, o kai izoliacijos gedimo skersmuo padidėja iki 2 mm, plonesnis defektas lemia didesnius dalinius išlydžius.



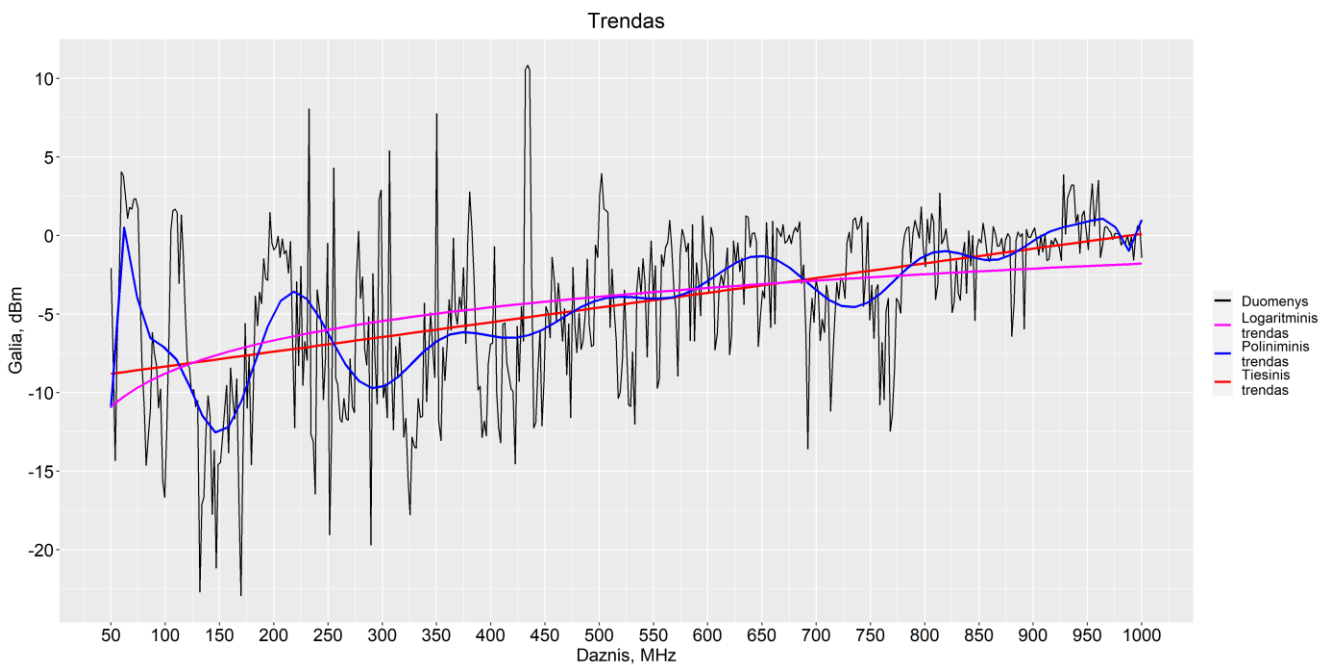
**46 pav.** Plokštelių su 1 ir 2 mm storio bei 2 mm skersmens defektu palyginimas, veikiant 30 kV įtampa

Taigi, eksperimento rezultatai su 30 kV įtampa skiriasi nuo 10 ir 20 kV bandymų metu gautų dalinių išlydžių kreivių. Visuose mėginiuose išlydžių lygis priklausė nuo imituojamo gedimo storio. Tiesa 1 mm storio ir 1 mm skersmens defektas išsiskyrė iš matavimų savo galios svyravimų pobūdžiu, kuris panašesnis į bandymų rezultatus su 20 kV. Pažymėtina, kad visuose mėginiuose buvo galima įžvelgti imituojamą izoliacijos gedimą.

## 5 Eksperimento rezultatų apibendrinimas

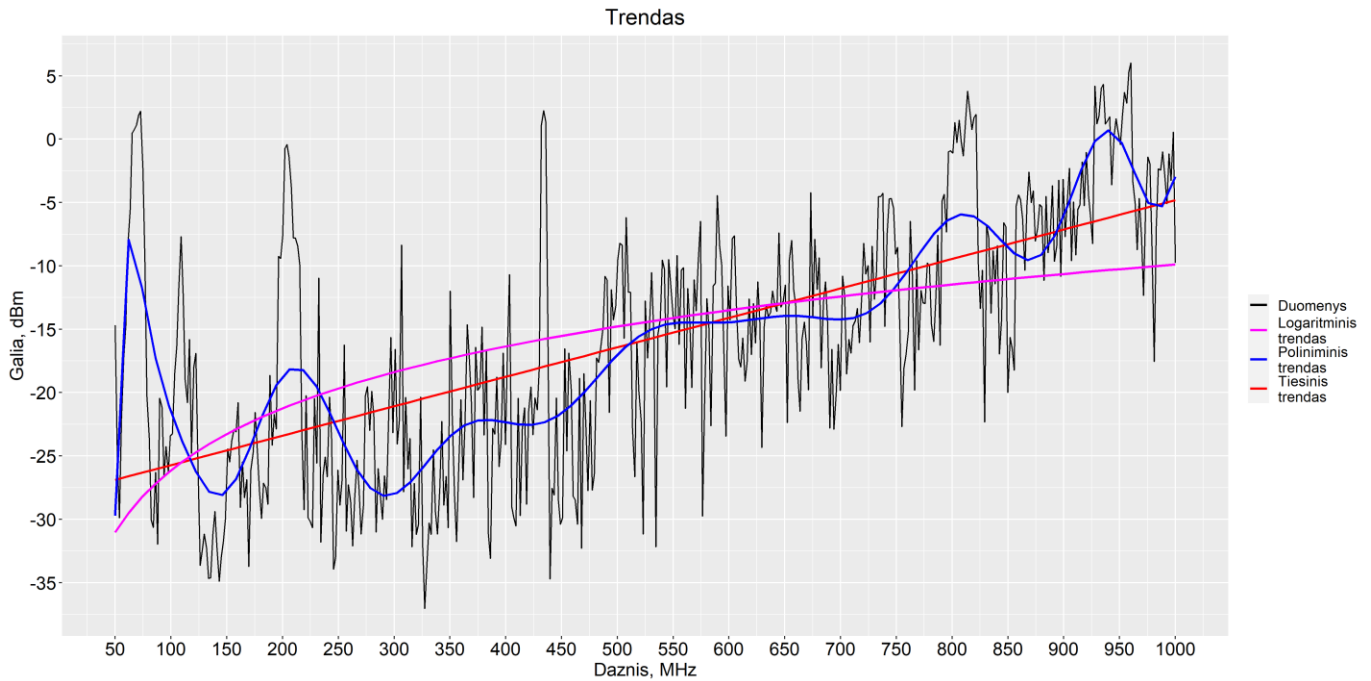
Visiems eksperimento bandymo atvejams buvo pritaikyti trys matematiniai modeliai: logaritminis trendas, polinominis trendas ir tiesinis trendas. Pagal šiuos modelius galima nusakyti ar defekto skersmuo, jo storis, turi reikšmingą įtaką nusakant eksploatuojamo įrenginio izoliacijos gedimo pobūdį bei identifikuoti kiekvieno įtampos lygio dalinių išlydžių lygį.

Modelius pritaikius bandymų rezultatams gautus pajungus 10 kV įtampą, visiems imituojamo gedimo dydžiams vyrauja tokios pačios tendencijos: duomenyse, yra dalinių išlydžių galios didėjimas augant dažniui. Tai parodo tiek tiesinis, tiek ir logaritminis trendai (47 pav.). Pastarasis parodo ir tai, kad dažniui didėjant galios augimas mažėja, pradeda nusistovėti. Polinominė kreivė atskleidžia kur kas daugiau. Minimo modelio – svyravimų amplitudė mažėja, kylant dažniui. Tai reiškia, kad jeigu tiriamo aukštos įtampos įrenginio izoliacija turi pažeidimus, kurie yra ne didesni nei 2 mm storio ir 2 mm skersmens, aukšto dažnio impulsų metodu atlikti 10 kV galios transformatoriaus matavimai, būtų tokių pačių tendencijų t. y. dalinių išlydžių galios svyravimų amplitudė, augant dažniui, slopsta didėjančiai.



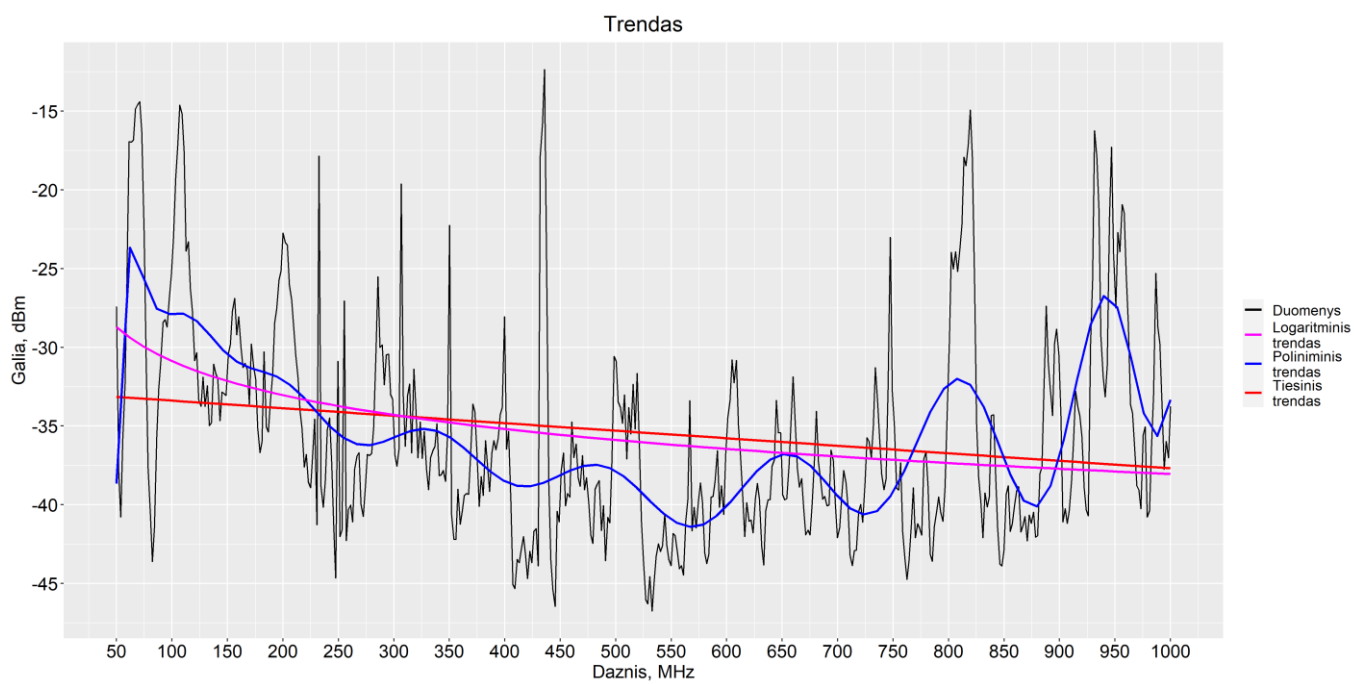
**47 pav.** 1 mm storio ir 0,5 mm skersmens izoliacijos defekto veikiamo 10 kV įtampa trendas

Šiuos trendus pritaikius 20 kV bandymų duomenims, imituojamo gedimo parametrai taip pat aiškiai neišsiskyrė. Visuose mėginiuose tiesinis ir logaritminis trendai rodė dalinių išlydžių galios didėjimą kylant dažniui (48 pav. pateikia vieną pvz. su 1 mm storio ir 0,5 mm skersmens izoliacijos defektu). Polinominis trendas šį augimą parodė tiksliau: Dalinio išlydžių galiai augant nuo 50 iki 500 MHz galios svyravimų amplitudė slopsta, o nuo 500 iki 1000 MHz ji vėl stiprėja. Pagal šia kreivę galima atpažinti nežymius 20 kV įtampos galios transformatoriaus kietosios izoliacijos pakitimus



**48 pav.** 1 mm storio ir 0,5 mm skersmens izoliacijos defekto veikiamo 20 kV įtampa trendas

Išanalizavus 30 kV bandymų rezultatus su minėtais modeliais, gauti rezultatai pateikti 49 pav. Čia taip stipriai neišsiskyrė izoliacijos gedimo parametrai. Aiškiausiai izoliacijos būklę 30 kV galios transformatoriuje nurodo polinominė kreivė (mėlyna spalva) kuri teigia, kad jeigu yra nedidelis defektas izoliacijoje, dalinių išlydžių galios svyravimai stiprės visame matuojamame dažnyje, tačiau šios tendencijos nebus vienareikšmės. Nuo 50 iki 500 MHz galia mažėja, o dažniui augant nuo 500 MHz ji pradeda didėti.



**49 pav.** 1 mm storio ir 0,5 mm skersmens izoliacijos defekto veikiamo 30 kV įtampa trendas

## Išvados

1. Išskirtos pagrindinės dalinių išlydžių charakteristikos – tai tariamasis krūvis, dalinių išlydžių pasikartojimo intensyvumas, vidutinė srovė, galia ir kvadratinis greitis. Šiuos parametrus galima nustatyti naudojant aukštų dažnio impulsų, optinį ar akustinį dalinių išlydžių aptikimo metodus. Darbe buvo naudotas aukštų dažnio impulsų metodas, kuris pasižymėjo didžiausiu jautrumu fiksuojant dalinių išlydžių galią.
2. Sukurti izoliacijos 6 badiniai. Trys iš jų yra su 1 mm, kiti trys su 2 mm storio gedimu, korio skersmuo 0,5, 1 ir 2 mm. Bandomojoje kapsulėje tiriamieji objektai buvo veikiami 10, 20 ir 30 kV įtampomis. Defekto sukelti daliniai išlydžiai išmatuoti naudojantis Doble DFA 300 matuokliu ir atvaizduoti grafiškai kartu su laboratorijos fonu.
3. Analizuojant matavimų duomenis metu paaiškėjo, kad aiškių priklausomybių nuo izoliacijos defekto parametrų matuojant dalinių išlydžių galią nustatyti nepavyko. Tačiau pagal įtampos lygius sudarytos tendencijos galios transformatorių izoliacijos defekto pobūdžio nustatymui. Esant nedideliam gedimui 10 kV transformatoriaus izoliacijoje, dalinių išlydžių galia auga, svyravimai slopsta – pradeda nusistovėti. Prastos izoliacijos 20 kV įrenginiui daliniai išlydžiai, išlaikant didėjančią tendą, matuojamo dažnio pradžioje svyruoja smarkiai, vėliau slopsta ir dažnio pabaigoje vėl išauga galios svyravimai. 30 kV transformatoriui su nežymiais izoliacijos pakitimais, visame matuojamame dažnyje matomas dalinių išlydžių galios svyravimų augimas ir trendo mažėjimas matavimų pradžioje bei augimas matuojamo dažnio pabaigoje.

## Literatūros sąrašas

1. Michał Kunicki, Andrzej Cichon, Łukasz Nagi, "Statistics based method for partial discharge identification in oil paper insulation systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 163, pp. 560–561, 2018.
2. A.J. Christinaa, M.A. Salama, Q.M. Rahmanb, Md Aminul Islamd, Fushuan Wena, S.P. Anga, Syeed Hasanb, W. Voonc, "Investigation of failure of high voltage bushing at power transformer," *Journal of Electrostatics*, vol. 96, pp. 49–55, 2018.
3. Dr. Leoš Valenta, Eng. Ivan Černý, „Power Transformers and Environmental Protection," *Elsevier*, vol. 49, pp. 18–22, 2016.
4. Brunt, R. J. Van, "Stochastic Properties of Partial-discharge Phenomena," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 28 No. 5, p. 903, 1991.
5. A. Morkvėnas, R. Stanionienė, ELEKTROS ĮRENGINIŲ BANDYMŲ IR GEDIMŲ DIAGNOSTIKOS METODAI, 2007.
6. Mirza Batalović, Kemo Sokolija, Mesud Hadžialić, Nejra Batalović, "PARTIAL DISCHARGES AND IEC STANDARDS 60840 AND 62067: SIMULATION SUPPORT," *Technical Gazette*, 216.
7. Yan-Bo Wang, Ding-Ge Chang, Yu-Hang Fan, Guan-Jun Zhang, Jiang-Yang Zhan, Xian-Jun Shao, Wen-Lin He, "Acoustic Localization of Partial Discharge Sources in Power Transformers Using a Particle-Swarm-Optimization-RouteSearching Algorithm," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, 2017.
8. A.G. Ovsyannikov, S.M. Korobeynikov, ""Apparent" And True Charges of Partial Discharges," *IEEE International Conference on Dielectrics (ICD)*, vol. 1, 2016.
9. E. C. f. E. Standardization, "High-voltage test techniques – Partial discharges measurements (IEC 60270:2000)". Brussel Patent (IEC 60270:2000, 03 2001.
10. Adnan Carsimamovica, Adnan Mujezinovic, Salih Carsimamovic, Zijad Bajramovic, Milodrag Kosarac, Koviljka Stankovic, "Analyzing of AC Corona Discharge Parameters of Atmospheric Air," *Procedia Computer Science*, vol. 83, p. 767, 2016.
11. Nasir A. Al-geelani, M. Afendi M. Piah, Nouruddeen Bashir, "A review on hybrid wavelet regrouping particle swarm optimization neural networks for characterization of partial discharge," *Elsevier*, vol. 45, 2015.

12. R. Sarathi, A.V. Giridhar, "Analysis of partial discharge activity by a conducting particle in liquid nitrogen," *Elsevier*, vol. 50, pp. 43–49, 210.
13. Ching–Chau Su, Cheng–Chi Tai, Chien–Yi Chen, Ju–Chu Hsieh, and Jiann–Fuh Chen, "Partial Discharge Detection Using Acoustic Emission Method for a Waveguide Functional High–Voltage Cast–Resin Dry–Type Transformer," in *2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis*, Beijing, China, 2008.
14. M. D. Judd, O. Farish and B. F. Hampton, "The Excitation of UHF Signals by Partial Discharge in GIS," *IEEE Trans Dielect Electr Insul*, vol. 3, 1996.
15. R. Sarathi, A.J. Reid, M.D. Judd, "Partial discharge study in transformer oil due to particle," *Elsevier*, vol. 78, pp. 1819–1825, 2008.
16. Hasan Reza Mirzaei, Asghar Akbari, Ernst Gockenbach, Mojtaba Zanjani, Karim Miralikhani, "A Novel Method for Ultra–HighFrequency Partial Discharge Localization in Power Transformers using the Particle Swarm," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 29, pp. 30–31, 2013.
17. Amir Mohammadirad, A.A. Shayegani Akmal, Ramin Vakili, "Localization of partial discharge in a transformer winding using frequency response assurance criterion and LMS adaptive filter," *Elsevier*, vol. 163, pp. 469–464, 2018.
18. Dingjun Wen, Guangdong Zhang , Xiubin Zhang, Dawei An\* , Lin Du , Shuncheng Liu, "Study on Simulator of Ultra–high Frequency Partial Discharge Signal," *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 2016.
19. Ming Ren, Bo Song, Tianxin Zhuang, Shujing Yang, "Optical partial discharge diagnostic in SF6 gas insulated system via multi–spectral detection," *Elsevier*, vol. 75, 2018.
20. Bo Song, Ming Ren, Jierui Zhou, Ming Dong, "A New Optical Method of Partial Discharge distant Positioning in GIS," in *IEEE Conferences*, San Antonio, TX, USA, 2018.
21. Xu Yang, Yu Ming, Cao Xiaolong, Qiu Changrong, Qiu Changrong, "Comparison between Optical and Electrical Methods for Partial Discharge Measurement," *Proceedings of The 6th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, 2000.
22. Yongpeng Xu, Yong Qian, Gehao Sheng Xiuchen Jiang, "Simulation Analysis on the Propagation of the Optical Partial Discharge Signal in I–shaped and L–shaped GILs," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 25, 2018.
23. Yan–Bo Wang, Ding–Ge Chang, Yu–Hang Fan, Guan–Jun Zhang, Jiang–Yang Zhan, Xian–Jun Shao and Wen–Lin He, "Acoustic Localization of Partial Discharge Sources in Power Transformers Using a Particle–Swarm–Optimization–Route–Transformers Using a Particle–

- Swarm–Optimization–Route," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 24, 217.
24. Kristy E. Primeaua, David E. Witt, "Soundscapes in the past: Investigating sound at the landscape level," *Elsevier*, vol. 9, 2009.
  25. T.R Black burn, R.E James, Q. Su. T. Phung, R. Tychsen, J. Simpson, "AN IMPROVED ELECTRIC/ACUSTIC METHOD FOR THE LOCATION OF PARTIAL DISCHARGES IN POWER TRANSFORMER," in *Properties and Applications of Dielectric Matirials*, Tokyo, 1991.
  26. Gyung–Suk Kil, Il– Kwon Kim, Dae–Won Park, Su–Yeon Choi, Chan–Yong Park, "Measurements and analysis of the acoustic signals produced by partial discharges in insulation oil," *Eslevier*, vol. 9, 2009.
  27. W. Opydo, "Study of elastic waves of acoustic frequencies generated by surface partial discharges of solid insulators in vacuum," *Elsevier*, vol. 74, pp. 85–92, 2004.
  28. A. Hekmati, "A novel acoustic method of partial discharge allocation considering structure–borne waves," *Elsevier*, vol. 77, 2016.
  29. N. A. M. Ishak, N. A. M. Jamail, N. A. Othman, "High voltage characteristics of kraft paper insulator with effect of palm oil and coconut oil," in *4th IET Clean Energy and Technology Conference (CEAT 2016)*, 2016.
  30. I. Sutan Chairul, S. Ab Ghani, M.S. Ahmad Khair, Y.H. Md Thayoob, Y.Z. Yang Ghazali, "Kraft Paper Insulation’s Life Assessment and Effects of Oxygen and Moisture to Paper Insulation’s Deterioration Rate," in *2012 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, Kota Kinabalu Sabah, Malaysia, 2–5 December 2012.
  31. A. R. M. J. R. Sarathi, "Partial discharge study in transformer oil due to particle," *Elsevier*, vol. 78, pp. 1819–1825, 2008.

## Priedai

### 1. priedas. Eksperimento metu gautų duomenų apdorojimo ir atvaizdavimo R programos kodas.

```
#Tyrimo duomenų nuskaitymas
#libraries:
library(XML)
library(methods)
library(dplyr)
library(ggplot2)

##### Automatinis #####

#Setting working directory:
setwd("T:/Univero darbai/Magistras/Magistrinis/Eksperimentas/Rezultatai/FREQ 2020-01-09/")

##### FONAS #####

result <- xmlParse(file = "FREQ0912fonas.xml")
# Print the result
print(result)
# Extract the root node form the xml file.
rootnode <- xmlRoot(result)
# Find number of nodes in the root.
rootsize <- xmlSize(rootnode)
# Get the fourth node
print(rootnode[4])
# Get the second element of the fourth node.
print(rootnode[[4]][[2]])
# XML file to data frame
df <- xmlToDataFrame(node=getNodeSet(result,"//PDSData/Spectrum/d"))
# Print the result
print(df)

###

# Writing df file into laikinas.txt file due to open it without commas
write.table(df, "laikinas_FN.txt", sep="", col.names=FALSE, quote=FALSE, row.names=FALSE)
# Opening laikinas.txt file, adding columns names and changing commas into tab.
ndf<-read.delim("laikinas_FN.txt", header = F, sep = ",", dec = ".",
col.names=c("Frequency1", "Amplitudel"))
#Plotting ndf data
graph<- plot(ndf, type="l")

###

# Converting Amplitude from dBm to kV (or another units)

##### Iraomas koeficientas, kuris i dBm pavers i mV #####

t <- transform(ndf, Amplitudel = Amplitudel * 1)
# Plotting new date set
#graph<- plot(t, type="l")

##### PRTIAL DISCHARGE #####

##### Automatinis #####
```

```

### XML Failu nuskaitymas ir irašymas i .txt failus ###

xmlfiles <- list.files(pattern = "*.xml")
for (i in xmlfiles){
result1 <- xmlParse(i)
# Print the result1
#print(result1)
# XML file to data frame
df1 <- xmlToDataFrame(node=getNodeSet(result1,"//PDSData/Spectrum/d"))
# Print the result1
#print(df1)

# Writing df file into laikinas.txt file due to open it without commas
write.table(df1, file= file.path(paste0("Log ",i,".txt")), sep="", col.names=FALSE,
quote=FALSE, row.names=FALSE)
}

### .txt failu nuskaitymas ###

txtfiles <- list.files(pattern="*.txt") # create list of all .txt files in folder
for (i in txtfiles){
#print(i)
ndf1 <- read.delim(i, header = F, sep = ",", dec = ".", col.names=c("Frequency2",
"Amplitude2"))
#print(ndf1)
#plot(ndf1, type= "l")

t1 <- transform(ndf1, Amplitude2= Amplitude2 * 1)
# Plotting new date set
#graph1<- plot(t1, type="l")

##### Bendras grafikas #####

#Meaking one data frame insted of two

double_df <- tbl_df(data.frame(t,t1))
double_df$Frequency2<- NULL

print(double_df)

PDplot <- ggplot()+

  geom_line(data=double_df,aes(x=Frequency1, y=Amplitude2,colour="darkblue"),size=0.5) +
#Bandinys
  geom_line(data=double_df,aes(x=Frequency1, y=Amplitude1,colour="blue"),size=0.5) +
#Fonas
  scale_color_discrete(name = " ", labels = c("Fonas", "Bandinys"))+
#Pirmi du "Fonas", "Bandinys",
  ylab("Galia, dBm") + xlab("Dažnis, MHz") +
  ggtitle("Daliniai išlydiniai") +
  theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5))+
  theme(text = element_text(size = 15))+
  theme(axis.text.x = element_text(size = 15))+
  theme(axis.text.y = element_text(size = 15))+
  theme(axis.text.x = element_text(colour = "black"))+
  theme(axis.text.y = element_text(colour = "black"))+
  scale_x_continuous(breaks = seq(0, 1000, by = 50)) +
  scale_y_continuous(breaks = seq(-80, 0, by = 5))
PDplot

```

```

ggsave(PDplot , file=paste0("Bandinys-fonas_", i, ".png"), width = 40, height = 20, units =
"cm")
}

#Duomenys - laboratorijos fonas
library(XML)
library(methods)
library(dplyr)
library(ggplot2)

#Setting working directory:
setwd("T:/Univero darbai/Magistras/Magistrinis/Eksperimentas/Rezultatai/FREQ 2020-01-09/Be
fono/")

##### Automatinis #####

### XML Failu nuskaitymas ir irasymas i .txt failus ###

xmlfiles <- list.files(pattern = "*.xml")
for (i in xmlfiles){
  result1 <- xmlParse(i)
  # Print the result1
  print(result1)
  # XML file to data frame
  df1 <- xmlToDataFrame(node=getNodeSet(result1,"//PDSData/Spectrum/d"))
  # Print the result1
  #print(df1)

  # Writing df file into laikinas.txt file due to open it without commas
  write.table(df1, file= file.path(paste0("Log ",i, ".txt")), sep="", col.names=FALSE,
quote=FALSE, row.names=FALSE)
}

#Setting working directory:
setwd("T:/Univero darbai/Magistras/Magistrinis/Eksperimentas/Rezultatai/FREQ 2020-01-09/Be
fono/")

#####
#####
##### Duomenys-fonas atvaizdavimas
#####
#####

# Visi .txt failai nuskaitomi i atskirus kintamuosius ir pasalinam Frequency stulepiliai.
# Paliekamas tik fono Frequency stulpelis.

Fonas <- read.delim("Log FREQ0912fonas.xml.txt", header = F, sep = ",", dec = ".",
col.names=c("Frequency", "Fono_Amplitude"))

##### 1 mm storio defektas
#####

Ix0.5_10kV <- read.delim("Log FREQ09241x0.5 10kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec = ".",
col.names=c("Frequency", "1x0.5_10kV_Amplitude"))
#Ix0.5_10kV$Frequency<- NULL
Ix0.5_20kV <- read.delim("Log FREQ09401x0.5 20kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec = ".",
col.names=c("Frequency", "1x0.5_20kV_Amplitude"))
Ix0.5_20kV$Frequency<- NULL
Ix0.5_30kV <- read.delim("Log FREQ09881x0.5 30kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec = ".",
col.names=c("Frequency", "1x0.5_30kV_Amplitude"))
Ix0.5_30kV$Frequency<- NULL

```

```

Ix1.0_10kV <- read.delim("Log FREQ09461x1.0 10kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec = ".",
col.names=c("Frequency", "1x1.0_10kv_Amplitude"))
Ix1.0_10kV$Frequency<- NULL
Ix1.0_20kV <- read.delim("Log FREQ09561x1.0 20kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec = ".",
col.names=c("Frequency", "1x1.0_20kv_Amplitude"))
Ix1.0_20kV$Frequency<- NULL
Ix1.0_30kV <- read.delim("Log FREQ09821x1.0 30kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec = ".",
col.names=c("Frequency", "1x1.0_30kv_Amplitude"))
Ix1.0_30kV$Frequency<- NULL
Ix2.0_10kV <- read.delim("Log FREQ09611x2.0 10kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec = ".",
col.names=c("Frequency", "1x2.0_10kv_Amplitude"))
Ix2.0_10kV$Frequency<- NULL
Ix2.0_20kV <- read.delim("Log FREQ09711x2.0 20kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec = ".",
col.names=c("Frequency", "1x2.0_20kv_Amplitude"))
Ix2.0_20kV$Frequency<- NULL
Ix2.0_30kV <- read.delim("Log FREQ09761x2.0 30kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec = ".",
col.names=c("Frequency", "1x2.0_30kv_Amplitude"))
Ix2.0_30kV$Frequency<- NULL

```

```

##### 2 mm storio defektas
#####

```

```

IIx0.5_10kV <- read.delim("Log FREQ09952x0.5 10kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec =
".", col.names=c("Frequency", "2x0.5_10kv_Amplitude"))
IIx0.5_10kV$Frequency<- NULL
IIx0.5_20kV <- read.delim("Log FREQ10002x0.5 20kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec =
".", col.names=c("Frequency", "2x0.5_20kv_Amplitude"))
IIx0.5_20kV$Frequency<- NULL
IIx0.5_30kV <- read.delim("Log FREQ10052x0.5 30kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec =
".", col.names=c("Frequency", "2x0.5_30kv_Amplitude"))
IIx0.5_30kV$Frequency<- NULL
IIx1.0_10kV <- read.delim("Log FREQ10142x1.0 10kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec =
".", col.names=c("Frequency", "2x1.0_10kv_Amplitude"))
IIx1.0_10kV$Frequency<- NULL
IIx1.0_20kV <- read.delim("Log FREQ10232x1.0 20kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec =
".", col.names=c("Frequency", "2x1.0_20kv_Amplitude"))
IIx1.0_20kV$Frequency<- NULL
IIx1.0_30kV <- read.delim("Log FREQ10322x1.0 30kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec =
".", col.names=c("Frequency", "2x1.0_30kv_Amplitude"))
IIx1.0_30kV$Frequency<- NULL
IIx2.0_10kV <- read.delim("Log FREQ10412x2.0 10kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec =
".", col.names=c("Frequency", "2x2.0_10kv_Amplitude"))
IIx2.0_10kV$Frequency<- NULL
IIx2.0_20kV <- read.delim("Log FREQ10502x2.0 20kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec =
".", col.names=c("Frequency", "2x2.0_20kv_Amplitude"))
IIx2.0_20kV$Frequency<- NULL
IIx2.0_30kV <- read.delim("Log FREQ10582x2.0 30kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec =
".", col.names=c("Frequency", "2x2.0_30kv_Amplitude"))
IIx2.0_30kV$Frequency<- NULL

```

```

# Visi duomenys sukeliami i veina datafreama

```

```

dataframe <- tbl_df(data.frame(Fonas,Ix0.5_10kV, Ix0.5_20kV, Ix0.5_30kV, Ix1.0_10kV,
Ix1.0_20kV, Ix1.0_30kV,
                                Ix2.0_10kV, Ix2.0_20kV, Ix2.0_30kV, IIx0.5_10kV, IIx0.5_20kV,
IIx0.5_30kV,
                                IIx1.0_10kV, IIx1.0_20kV, IIx1.0_30kV, IIx2.0_10kV,
IIx2.0_20kV, IIx2.0_30kV))

```

```

# Is bandinio matavimu atimami fono matavimai

```

```

for( i in 3:length(dataframe) ) {
  dataframe[i] <- (dataframe[i] - dataframe[2])*(-1)
}

```

```

}

# Kiekvinam bandiniui priskiriama spalva grafike ir legendoje

colors <- c(
  # "Fono_Amplitude" = "black",

  "1x0.5_10kV" = "red",
  # "1x0.5_20kV" = "red",
  # "1x0.5_30kV" = "red",
  # "1x1.0_10kV" = "red",
  # "1x1.0_20kV" = "red",
  # "1x1.0_30kV" = "red",
  # "1x2.0_10kV" = "red",
  # "1x2.0_20kV" = "red",
  # "1x2.0_30kV" = "red",

  "2x0.5_10kV" = "blueviolet"      #Nutrinti kableli nuo nereikialingo kintamojo
  # "2x0.5_20kV" = "blueviolet"
  # "2x0.5_30kV" = "blueviolet",
  # "2x1.0_10kV" = "blueviolet",
  # "2x1.0_20kV" = "blueviolet",
  # "2x1.0_30kV" = "blueviolet",
  # "2x2.0_10kV" = "blueviolet",
  # "2x2.0_20kV" = "blueviolet",
  # "2x2.0_30kV" = "blueviolet"
)

# Piesiamas grafikas visiems duomenims is karto. Nereikiamus uzkomentuoti

grafikas <- ggplot()+
  # geom_line(data=dataframe, aes(x=Frequency, y=Fono_Amplitude, color="Fono_Amplitude" ),
  size=0.5)+
  geom_line(data=dataframe, aes(x=Frequency, y=X1x0.5_10kV_Amplitude, color="1x0.5_10kV"),
  size=0.5) +
  # geom_line(data=dataframe, aes(x=Frequency, y=X1x0.5_20kV_Amplitude,
  color="1x0.5_20kV"), size=0.5) +
  # geom_line(data=dataframe, aes(x=Frequency, y=X1x0.5_30kV_Amplitude,
  color="1x0.5_30kV"), size=0.5) +
  # geom_line(data=dataframe, aes(x=Frequency, y=X1x1.0_10kV_Amplitude,
  color="1x1.0_10kV"), size=0.5) +
  # geom_line(data=dataframe, aes(x=Frequency, y=X1x1.0_20kV_Amplitude,
  color="1x1.0_20kV"), size=0.5) +
  # geom_line(data=dataframe, aes(x=Frequency, y=X1x1.0_30kV_Amplitude,
  color="1x1.0_30kV"), size=0.5) +
  # geom_line(data=dataframe, aes(x=Frequency, y=X1x2.0_10kV_Amplitude,
  color="1x2.0_10kV"), size=0.5) +
  # geom_line(data=dataframe, aes(x=Frequency, y=X1x2.0_20kV_Amplitude,
  color="1x2.0_20kV"), size=0.5) +
  # geom_line(data=dataframe, aes(x=Frequency, y=X1x2.0_30kV_Amplitude,
  color="1x2.0_30kV"), size=0.5) +

  geom_line(data=dataframe, aes(x=Frequency, y=X2x0.5_10kV_Amplitude, color="2x0.5_10kV"),
  size=0.5) +
  # geom_line(data=dataframe, aes(x=Frequency, y=X2x0.5_20kV_Amplitude,
  color="2x0.5_20kV"), size=0.5) +
  # geom_line(data=dataframe, aes(x=Frequency, y=X2x0.5_30kV_Amplitude,
  color="2x0.5_30kV"), size=0.5) +
  # geom_line(data=dataframe, aes(x=Frequency, y=X2x1.0_10kV_Amplitude,
  color="2x1.0_10kV"), size=0.5) +
  # geom_line(data=dataframe, aes(x=Frequency, y=X2x1.0_20kV_Amplitude,
  color="2x1.0_20kV"), size=0.5) +

```

```

# geom_line(data=dataframe, aes(x=Frequency, y=X2x1.0_30kv_Amplitude,
color="2x1.0_30kV"), size=0.5) +
# geom_line(data=dataframe, aes(x=Frequency, y=X2x2.0_10kv_Amplitude,
color="2x2.0_10kV"), size=0.5) +
# geom_line(data=dataframe, aes(x=Frequency, y=X2x2.0_20kv_Amplitude,
color="2x2.0_20kV"), size=0.5) +
# geom_line(data=dataframe, aes(x=Frequency, y=X2x2.0_30kv_Amplitude,
color="2x2.0_30kV"), size=0.5) +
scale_color_manual(values = colors)+
labs(x = "Daznis, MHz", y = "Galia, dBm", color = " ") +
ggtitle("Matavimu palyginimas") +
theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5))+
theme(text = element_text(size = 15))+
theme(axis.text.x = element_text(size = 15))+
theme(axis.text.y = element_text(size = 15))+
theme(axis.text.x = element_text(colour = "black"))+
theme(axis.text.y = element_text(colour = "black"))+
scale_x_continuous(breaks = seq(0, 1000, by = 50)) +
scale_y_continuous(breaks = seq(-45, 15, by = 5))

```

grafikas

```
# Naujoje vietoje issaugomi grafikai
```

```
setwd("T:/Univero darbai/Magistras/Magistrinis/Nuotraukos/Tyrimo rezultatai/")
ggsave(grafikas , file=paste0("1-2mm_0.5mm_10kV.png"), width = 40, height = 20, units =
"cm")
```

```
# TRENDAS
#libraries:
```

```
library(methods)
library(dplyr)
library(ggplot2)
library(minpack.lm)
```

```
##### Automatinis #####
```

```
#Setting working directory:
```

```
setwd("T:/Univero darbai/Magistras/Magistrinis/Eksperimentas/Rezultatai/FREQ 2020-01-09/Be
fono/")
```

```
#####
#####
##### Duomenys-fonas atvaizdavimas
#####
#####
```

```
# Visi .txt failai nuskaitomi i atskirus kintamuosius ir pasalinam Frequency stulepiliai.
# Paliekamas tik fono Frequency stulpelis.
```

```
Fonas <- read.delim("Log FREQ0912fonas.xml.txt", header = F, sep = ",", dec = ".",
col.names=c("Frequency", "Fono_Amplitude"))
```

```
##### 1 mm storio defektas
#####
```

```
Ix0.5_10kV <- read.delim("Log FREQ09241x0.5 10kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec = ".",
col.names=c("Frequency", "1x0.5_10kV_Amplitude"))
#Ix0.5_10kV$Frequency<- NULL
```

```

Ix0.5_20kV <- read.delim("Log FREQ09401x0.5 20kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec = ".",
col.names=c("Frequency", "1x0.5_20kv_Amplitude"))
Ix0.5_20kV$Frequency<- NULL
Ix0.5_30kV <- read.delim("Log FREQ09881x0.5 30kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec = ".",
col.names=c("Frequency", "1x0.5_30kv_Amplitude"))
Ix0.5_30kV$Frequency<- NULL
Ix1.0_10kV <- read.delim("Log FREQ09461x1.0 10kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec = ".",
col.names=c("Frequency", "1x1.0_10kv_Amplitude"))
Ix1.0_10kV$Frequency<- NULL
Ix1.0_20kV <- read.delim("Log FREQ09561x1.0 20kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec = ".",
col.names=c("Frequency", "1x1.0_20kv_Amplitude"))
Ix1.0_20kV$Frequency<- NULL
Ix1.0_30kV <- read.delim("Log FREQ09821x1.0 30kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec = ".",
col.names=c("Frequency", "1x1.0_30kv_Amplitude"))
Ix1.0_30kV$Frequency<- NULL
Ix2.0_10kV <- read.delim("Log FREQ09611x2.0 10kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec = ".",
col.names=c("Frequency", "1x2.0_10kv_Amplitude"))
Ix2.0_10kV$Frequency<- NULL
Ix2.0_20kV <- read.delim("Log FREQ09711x2.0 20kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec = ".",
col.names=c("Frequency", "1x2.0_20kv_Amplitude"))
Ix2.0_20kV$Frequency<- NULL
Ix2.0_30kV <- read.delim("Log FREQ09761x2.0 30kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec = ".",
col.names=c("Frequency", "1x2.0_30kv_Amplitude"))
Ix2.0_30kV$Frequency<- NULL

```

```

##### 2 mm storio defektas
#####

```

```

IIx0.5_10kV <- read.delim("Log FREQ09952x0.5 10kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec =
".", col.names=c("Frequency", "2x0.5_10kv_Amplitude"))
IIx0.5_10kV$Frequency<- NULL
IIx0.5_20kV <- read.delim("Log FREQ10002x0.5 20kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec =
".", col.names=c("Frequency", "2x0.5_20kv_Amplitude"))
IIx0.5_20kV$Frequency<- NULL
IIx0.5_30kV <- read.delim("Log FREQ10052x0.5 30kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec =
".", col.names=c("Frequency", "2x0.5_30kv_Amplitude"))
IIx0.5_30kV$Frequency<- NULL
IIx1.0_10kV <- read.delim("Log FREQ10142x1.0 10kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec =
".", col.names=c("Frequency", "2x1.0_10kv_Amplitude"))
IIx1.0_10kV$Frequency<- NULL
IIx1.0_20kV <- read.delim("Log FREQ10232x1.0 20kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec =
".", col.names=c("Frequency", "2x1.0_20kv_Amplitude"))
IIx1.0_20kV$Frequency<- NULL
IIx1.0_30kV <- read.delim("Log FREQ10322x1.0 30kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec =
".", col.names=c("Frequency", "2x1.0_30kv_Amplitude"))
IIx1.0_30kV$Frequency<- NULL
IIx2.0_10kV <- read.delim("Log FREQ10412x2.0 10kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec =
".", col.names=c("Frequency", "2x2.0_10kv_Amplitude"))
IIx2.0_10kV$Frequency<- NULL
IIx2.0_20kV <- read.delim("Log FREQ10502x2.0 20kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec =
".", col.names=c("Frequency", "2x2.0_20kv_Amplitude"))
IIx2.0_20kV$Frequency<- NULL
IIx2.0_30kV <- read.delim("Log FREQ10582x2.0 30kv.xml.txt", header = F, sep = ",", dec =
".", col.names=c("Frequency", "2x2.0_30kv_Amplitude"))
IIx2.0_30kV$Frequency<- NULL

```

```

# Visi duomenys sukeliami i veina datafreama

```

```

dataframe <- tbl_df(data.frame(Fonas,Ix0.5_10kV, Ix0.5_20kV, Ix0.5_30kV, Ix1.0_10kV,
Ix1.0_20kV, Ix1.0_30kV,
                                Ix2.0_10kV, Ix2.0_20kV, Ix2.0_30kV, IIx0.5_10kV, IIx0.5_20kV,
IIx0.5_30kV,

```

```

IIx1.0_10kV, IIx1.0_20kV, IIx1.0_30kV, IIx2.0_10kV,
IIx2.0_20kV, IIx2.0_30kV))

# Is bandinio matavimu atimami fono matavimai

for( i in 3:length(dataframe) ) {
  dataframe[i] <- (dataframe[i] - dataframe[2])*(-1)
}

#####Trendas

colors <- c(
  "Duomenys" = "black",
  "Tiesinis\ntrendas" = "red",
  "Poliniminis\ntrendas" = "blue",
  "Logaritminis\ntrendas" = "magenta"
)

trendline <- ggplot(dataframe, aes(x = Frequency, y = X2x2.0_30kv_Amplitude)) + #Irasyti
reikiama matavima
  geom_line(aes(colour = 'Duomenys')) +
  stat_smooth(method = 'lm', aes(colour = 'Tiesinis\ntrendas'), se = FALSE, formula = y ~ x)
+
  stat_smooth(method = 'lm', formula = y ~ poly(x,19), aes(colour = 'Poliniminis\ntrendas'),
se= FALSE) + # PAREguliuoti "poly" koeficienta
  stat_smooth(method = 'nls', formula = y ~ a * log(x) + b, aes(colour =
'Logaritminis\ntrendas'), se = FALSE, method.args = list(start = list(a = 1, b = 1))) +
  scale_color_manual(values = colors)+
  #theme_bw()+
  #scale_colour_brewer(name = ' ', palette = 'Set2')+
labs(x = "Daznis, MHz", y = "Galia, dBm", color = " ") +
  ggtitle("Trendas") +
  theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5))+
  theme(text = element_text(size = 15))+
  theme(axis.text.x = element_text(size = 15))+
  theme(axis.text.y = element_text(size = 15))+
  theme(axis.text.x = element_text(colour = "black"))+
  theme(axis.text.y = element_text(colour = "black"))+
  scale_x_continuous(breaks = seq(0, 1000, by = 50)) +
  scale_y_continuous(breaks = seq(-45, 15, by = 5))

trendline

setwd("T:/Univero darbai/Magistras/Magistrinis/Nuotraukos/Tyrimo rezultatai/")
ggsave(trendline , file=paste0("Trendas_2_2.0_30kV.png"), width = 40, height = 20, units =
"cm") # Pavadinimas turi atitikti matavimo pavadinima

```